



兰州理工大学  
LANZHOU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 第39届中国高等学校电力系统 及其自动化专业学术年会

The 39th Chinese University Conference on Power Systems and Automation

## 论文集

主办单位

中国高等学校电力系统及其自动化专业学术年会组织委员会

承办单位

兰州理工大学

2024 | 8月14-16日  
甘肃·兰州



# 目录

|                                                    |     |
|----------------------------------------------------|-----|
| P10006 TLUD 与变压器效率关系研究与检测分析                        | 1   |
| P10007 弱电网下 LCL 型并网逆变器鲁棒性增强控制策略                    | 7   |
| P10008 级联型双向准 Z 源 DC-DC 变换器                        | 12  |
| P10009 基于频率跟踪技术的电动汽车无线充电系统研究                       | 16  |
| P10017 基于故障电流旁路的混合式直流断路器                           | 21  |
| P10052 一种非整数大变比、低损耗的平面型变压器开发                       | 30  |
| P10057 基于 Boost 变换器的光伏发电 MPPT 技术原理及性能研究            | 35  |
| P10065 基于 BILSTM-Adaboost 的短期风电功率预测                | 41  |
| P10085 基于模糊 PI 控制的三电平双向 DC/DC 变换器                  | 46  |
| P10086 基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制                         | 51  |
| P10099 基于等效惯性常数的 VSG 惯量支撑能力定量分析                    | 56  |
| P10102 考虑光伏出力与负荷波动匹配性的配电网集群划分方法研究                  | 61  |
| P10113 一种三相级联式桥臂复用型模块化多电平换流器                       | 66  |
| P10124 双桥臂复用型 MMC 电路拓扑及其调制策略                       | 72  |
| P10157 基于灵敏度分析的地铁杂散电流泄漏点定位方法研究                     | 77  |
| P10163 一种基于分层核 PCA 和层次聚类的电费支付行为模式识别方法              | 82  |
| P10169 基于 LC 滤波型多电平级联 H 桥逆变器通用离散模型及分岔与混沌行为分析       | 87  |
| P20005 基于换流站滤波器组投切与触发角调节配合下的 LCC-HVDC 交流系统等值阻抗识别方法 | 92  |
| P20123 新能源基地稳态运行风险评估方法                             | 98  |
| P20166 基于线性二次控制的柔性互联台区负载均衡策略                       | 103 |
| P30051 基于轻量化 YOLOv5 的电力绝缘子缺陷检测研究                   | 107 |
| P30095 特高压直流系统变压器空载合闸引发换相失败评估方法                    | 114 |
| P30130 一起换流变阀侧套管异常原因分析及提升建议                        | 119 |
| P30136 环氧浸渍纸多层复合材料的空间电荷特性仿真研究                      | 128 |
| P30156 基于参数识别的地铁杂散电流泄漏区域识别方法研究                     | 133 |
| P30176 端羟基聚醚砜增韧环氧树脂的性能研究                           | 139 |
| P40010 基于注意力机制的 CNN-WaveNet-GRU 短期风电功率预测           | 143 |
| P40011 基于 CNN 与改进的 K-means 聚类的工业环境非侵入式负荷识别方法       | 148 |
| P40033 考虑灵活性的含电转氢综合能源系统优化调度                        | 153 |
| P40039 含高比例光伏的低压配电网储能鲁棒配置策略                        | 158 |



|                                                 |     |
|-------------------------------------------------|-----|
| P40053 基于改进哈里斯鹰优化算法的微电网优化调度研究·····              | 167 |
| P40062 基于多智能体有限时间一致性的孤岛异构微电网分布式二次控制·····        | 173 |
| P40075 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度·····               | 177 |
| P40080 考虑不确定性的电热氢综合能源系统优化配置·····                | 182 |
| P40131 一起调相机励磁系统故障分析及措施建议·····                  | 188 |
| P40146 基于协调方波惯性控制的并网双馈风机快速频率支撑研究·····           | 192 |
| P50071 基于双层聚类算法的柔性可调控负荷用电模式分析·····              | 198 |
| P50098 计及网络安全约束与新能源消纳的机组组合问题研究·····             | 203 |
| P60014 基于模糊无迹卡尔曼滤波的风光互补发电储能系统研究·····            | 209 |
| P60018 基于主从博弈的多区域综合能源系统电能共享运行优化策略·····          | 217 |
| P60043 混合卷尾猴差分进化算法的光伏电池参数辨识·····                | 222 |
| P60055 燃料电池对于综合能源系统平抑风电波动的影响研究·····             | 228 |
| P60056 平抑风电波动的综合能源系统电氢优化运行研究·····               | 235 |
| P60076 考虑冷热电联供的光伏光热 AA-CAES 容量优化配置·····         | 241 |
| P60096 构网型电化学储能参与系统一次调频的控制方法·····               | 254 |
| P60117 基于有限时间事件触发一致性的微电网经济调度策略研究·····           | 260 |
| P60125 基于建筑水系统的可调度建筑光伏小水电微电网研究 ·····            | 265 |
| P60140 考虑新能源消纳及经济性的园区风光储系统定容优化研究·····           | 269 |
| P70021 考虑深冷液化空气储能的虚拟电厂优化调度·····                 | 276 |
| P70094 基于状态估计精度的配电网量测配置优化方法·····                | 281 |
| P70104 基于改进 DeepLab V3+神经网络的多栋屋顶建筑图像语义分割研究····· | 286 |
| P70135 基于虚拟现实技术与 SLIC 超像素分割法的电气设备三维红外可视化方案····· | 291 |
| P70172 基于双模传感器的电力设备表面温度三维模型构建方法·····            | 297 |
| P80022 基于灰狼算法的电网静态等值方法·····                     | 302 |
| P80023 含贯通式供电的电气化铁路负荷与电力系统联合潮流计算方法·····         | 307 |
| P80026 光伏组件开路故障前后参数变化分析·····                    | 312 |
| P80027 含氢储系统的煤矿微电网经济优化运行·····                   | 317 |
| P80038 基于暂态电压波形特征的柔性直流输电线路纵联保护方案·····           | 321 |
| P80044 基于改进行波特征频率法的配电网故障测距·····                 | 326 |
| P80045 基于漏感电动势法的交流电机定子换位线棒故障数据集的计算方法·····       | 331 |
| P80050 基于语义分割和坐标变换的油田井场光伏装机容量检测·····            | 336 |
| P80054 面向碳中和的分布式光伏并网对配电网可靠性评估与研究·····           | 343 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| P80058 新能源消纳下的综合能源系统灵活性优化研究.....            | 349 |
| P80069 风核打捆输电系统建模与暂态稳定性分析.....              | 354 |
| P80074 基于改进蜜獾算法的油田单井光伏容量优化配置方法.....         | 359 |
| P80087 基于 PCA 的改进 SVDD 的风电机组故障检测.....       | 364 |
| P80097 含直驱风电场电力系统的暂态功角稳定性研究.....            | 368 |
| P80100 计及分布式光伏接入的配电网安全保障措施灵敏度分析.....        | 374 |
| P80122 基于改进量子遗传算法的分布式调相机参数优化.....           | 380 |
| P80145 基于多源信息融合的海上风电机组逆变模块故障诊断.....         | 384 |
| P90040 基于改进组合赋权 MARCOS 的配电网运行状态评估研究.....    | 390 |
| P90048 基于组合赋权改进遗传算法的配电网承载力评估.....           | 395 |
| P90174 基于动态社区划分的广义负荷两阶段调控策略.....            | 400 |
| P110152 双碳目标下电机前沿技术课程思政教学实践.....            | 405 |
| P110173 虚拟同步发电机转动惯量、阻尼系数和虚拟电感协同自适应控制策略..... | 409 |

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# TLUD 与变压器效率关系研究与检测分析

姚伟<sup>1</sup>, 刘彦彦<sup>1,\*</sup>, 帕提合努尔·叶列解甫<sup>2</sup>, 郭志明<sup>3</sup>

(1.伊犁职业技术学院机电化工学院, 新疆 伊宁 835000; 2.国网伊犁伊河供电有限责任公司, 新疆 伊宁 835000; 3.国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

## Research and detection of the relationship between TLUD and transformer efficiency

YAO-wei<sup>1</sup>, LIU Yan-yan<sup>1,\*</sup>, Pahetinuier Yeliejiefu<sup>2</sup>, GUO Zhi-ming<sup>3</sup>

(1.College of mechanical and electrical engineering of Yili vocational and technical college, Yining 835000, Xinjiang;2. State Grid Yili Yihe Power Supply Co., Ltd., Yining, Xinjiang 835000;3.Changji Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd, Changji 831100 ,Xinjiang)

**ABSTRACT:** A concise algorithm has not yet been established to establish the relationship between the Three-phase Load Unbalance Degree (TLUD) and transformer efficiency. In order to establish the relationship between TLUD and transformer efficiency, a combination of experimental and simulation research was adopted based on the current operating status of the low-voltage power grid to simulate various experimental conditions of three-phase load unbalance. Grouping sampling analysis was conducted and combined with existing TLUD algorithms to obtain the most effective TLUD algorithm model. Based on this, the efficiency measurement formula of transformers containing TLUD was derived, and the relationship curve of TLUD's impact on transformer efficiency was established and analyzed for detection. After the treatment of three-phase unbalance, energy saving was quantified, and measures to improve transformer efficiency and energy saving were proposed, providing reference for the treatment of three-phase load unbalance.

**KEY WORDS:** TLUD algorithm; Transformer efficiency; Detection and analysis; Relation curve; Energy saving measures

**摘要:** 三相负荷不平衡度 (Three-phase Load Unbalance Degree, TLUD) 与变压器效率的关系至今未建立一套简明算法, 为了建立 TLUD 与变压器效率关系, 根据低压电网运行状态, 采取实验与仿真研究相结合的办法, 模拟三相负荷不平衡的各种试验条件, 分组取样分析并结合现有 TLUD 算法, 得出最有效的 TLUD 算法模型, 并以此推导出含 TLUD 的变压器效率度量式, 建立 TLUD 对变压器效率影响的关系曲线并进行检测分析, 将三相不平衡得到治理后节能量化, 提出提高变压器效率与节能措施, 为三相负荷不平衡的治理提供参考。

**关键词:** TLUD 算法; 变压器效率; 检测分析; 关系曲线; 节能措施

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 前言

目前国外提高变压器效率的主要方法是使用节能变压器, 国内还根据国家标准中电流三相不平衡度不超过 20% 的规定, 试图合理选择配电变压器容量, 并尽可能的在配电时使三相负荷平衡以提高变压器效率<sup>[1]</sup>。文献[2]提出配电网三相不平衡产生的原因大致分为两类: 一类是由供电环节不平衡引起的系统三相不平衡, 另一类则是由负荷的不对称引起的系统三相不平衡。文献[3]提出基于前推法提出考虑负荷分布的不平衡修正系数的线损计算模型来表征三相不同分布对线损的影响, 仅仅适用于典型负荷特征。文献[4]提出基于三相不平衡度为目标, 利用遗传算法求解, 在降低换相终端损耗的情况下优化三相不平衡度, 实践中较难得到准确数据。文献[5]研究了三相负荷不平衡对电网带来的影响, 但没能建立相关算法。文献[6]研究了三相不平衡对配电变压器损耗影响分析, 并提出相对应的治理措施, 但仿真了功率因数不平衡的三相不平衡系统。文献[7]仿真分析了配电网附加损耗与配变负载率及最大电流不平衡度的关系, 并未导出三相不平衡度与变压器效率的关系。

分析大量文献, 关于 TLUD 对变压器效率的影响, 并未找到一套简明的能反映 TLUD 与配电变压器效率的关系式。本文针对上述问题进行分析研究, 尤其是变压器重载或超载情况下, 对三相负荷不平衡进行分析研究。根据低压电网运行状态, 搭建仿真实验平台, 并以新疆伊犁地区 180 台电力变压器运行参数为参考依据, 通过对实验数据分析研究, 建立 TLUD 对电力变压器效率的影响关

系曲线。在此基础上,通过比较现有三相不平衡度数学模型,建立适应低压供配电系统工作的三相不平衡度算法,并将三相负荷不平衡对电力变压器效率的影响进行量化,反映出三相负荷不平衡得到治理后,可以节约的成本,将更有助于提高电力系统的安全运行和管理水平。

## 1 TLUD 数学模型

假设 $I_A$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 为变压器二次侧三相相电流, $I_{pav}$ 为变压器二次侧三相平均电流, $I_0$ 为变压器二次侧零序电流, $I_2$ 为负序电流, $I_1$ 为正序电流, $\varepsilon_i$ 为三相不平衡度。根据定义将三相不平衡度算法<sup>[3-9]</sup>列举如下。

$$(1) \quad \varepsilon_{i1} = \frac{\text{Max}[I_A, I_B, I_C] - \text{Min}[I_A, I_B, I_C]}{I_{\text{Max}}} \quad (1)$$

$$(2) \quad \varepsilon_{i2} = \frac{\text{Max}(|I_A - I_{pav}|, |I_B - I_{pav}|, |I_C - I_{pav}|)}{I_{pav}} \quad (2)$$

$$(3) \quad \varepsilon_{i3} = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{式中 } I_1 = \frac{\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B + \alpha^2 \dot{I}_C}{3}, \quad I_2 = \frac{\dot{I}_A + \alpha^2 \dot{I}_B + \alpha \dot{I}_C}{3}$$

$$(4) \quad \varepsilon_{i4} = \frac{I_0}{I_{pav}} \times 100\% \quad (4)$$

## 2 TLUD 与变压器效率关系推导

变压器损耗看作铁损和铜损的总和<sup>[10]</sup>。近似认为铁损 $P_{Fe}$ 等于变压器空载损耗 $P_0$ ,  $P_{Fe} = P_0$ 。变量声明: $I_{2N}$ 、 $U_{2N}$ 、 $P_{2N}$ 、 $S_{2N}$ 分别为变压器二次侧额定电流、额定电压、额定功率及额定容量, $\cos\varphi_2$ 为变压器二次侧功率因数, $P_{KN}$ 为变压器短路铜损。

引入变压器单相负载率 $\beta$ ,并令

$$\beta_\sigma = \frac{I_\sigma}{I_{2N}}, \quad \sigma \in \{A, B, C\} \quad (5)$$

式中: $\sigma$ 下标号对应变压器A、B、C相。

同理,可得电压型和功率型参数的变压器单相负载率为

$$\beta_\sigma = \frac{U_\sigma}{U_{2N}}, \quad \sigma \in \{A, B, C\} \quad (6)$$

$$\beta_\sigma = \frac{P_\sigma}{P_{2N}}, \quad \sigma \in \{A, B, C\} \quad (7)$$

则,变压器损耗 $\Delta P$ 可以表示为

$$\Delta P = P_0 + P_{KN} \cdot ([\beta_A + \beta_B + \beta_C]/3)^2 \quad (8)$$

定义 $\beta_0$ 为变压器平均负载率,并令

$$\beta_0 = \frac{I_{pav}}{I_{2N}} \quad (9)$$

引入三相相间不平衡系数 $\alpha$ ,并令

$$\alpha_\sigma = \frac{I_\sigma - I_{pav}}{I_{2N}} \times 100\%, \quad \sigma \in \{A, B, C\} \quad (10)$$

把式(5)、式(9)代入式(10),可得

$$\beta_A + \beta_B + \beta_C = 3\beta_0 \quad (11)$$

把式(11)代入式(8)可得

$$\Delta P = P_0 + \beta_0^2 P_{KN} \quad (12)$$

变压器出口功率 $P_2$ 可以表示为

$$P_2 = U_{2N} I_{2N} \cos\varphi_2 = \beta_0 U_{2N} I_{2N} \cos\varphi_2 = \beta_0 S_{2N} \cos\varphi_2 \quad (13)$$

则,变压器效率<sup>[11-12]</sup> $\eta$ 可表示为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = (1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}) \times 100\% \quad (14)$$

把式(12)、式(13)代入式(14),则变压器效率<sup>[13-14]</sup> $\eta$ 为

$$\eta = (1 - \frac{P_0 + \beta_0^2 P_{KN}}{\beta_0 S_{2N} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta_0^2 P_{KN}}) \times 100\% \quad (15)$$

为了更好的反映TLUD与变压器效率关系,将式(15)进行改进推导。

假设三相变压器变比为 $K$ ,单相绕组铜抗为 $Z_{CU}$ ,三相变压器的损耗可以表示为

$$\Delta P = P_0 + \frac{1}{K} (\beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2) I_{2N}^2 Z_{CU} \quad (16)$$

令TLUD为 $K_\chi$ ,并令:

$$K_\chi = \beta_A^2 + \beta_B^2 + \beta_C^2, \quad \chi \in \{U, I, P\} \quad (17)$$

式中, $U$ 、 $I$ 、 $P$ 为三相负荷不平衡度的变量标号,分别对应三相电压不平衡度、三相电流不平衡度和三相功率不平衡度。

代入上述相关式,并进行化简可得:

$$\eta = \frac{\beta_0 S_{2N} \cos\varphi_2}{\beta_0 S_{2N} \cos\varphi_2 + P_0 + \frac{1}{K} K_\chi I_{2N}^2 Z_{CU}} \quad (18)$$

从式(18)可以看出变压器效率与TLUD(电流不平衡度、电压不平衡度、功率不平衡度)、功率因数、中性线电流与变压器效率的关系。

通过实验可以测得负载率与铁损、铜损及变压器效率关系,利用MATLAB进行仿真,结果如图1所示。

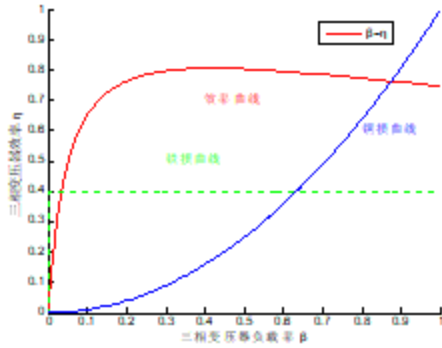


图 1 负载率与变压器效率关系曲线

Fig.1 Relationship curve between load rate and transformer efficiency

### 3 TLUD 与变压器效率关系实验分析

三相负荷不平衡条件可分为三种：三相功率因数平衡而三相负荷幅值不平衡；三相负荷幅值平衡而功率因数不平衡；三相负荷幅值不平衡而功率因数亦不平衡。基于 Proteus 仿真软件搭建仿真实验平台，如图 2 所示。

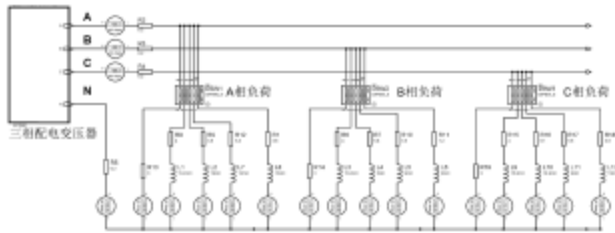


图 2 三相负荷不平衡实验平台

Fig. 2 Three phase load unbalance experimental platform

分别针对上述三种条件进行实验。 $\cos\varphi_a$ 、 $\cos\varphi_b$ 、 $\cos\varphi_c$ 分别变压器二次侧 A、相、B 相、C 相功率因数， $I_a$ 、 $I_b$ 、 $I_c$ 分别为变压器二次侧相电流， $I_n$ 为变压器二次侧中性线电流。实验如下：

(1) 三相功率因数平衡而三相负荷幅值不平衡，测得结果如表 1 所示。

表 1 三相负荷不平衡方式 1: TLUD 与变压器效率统计  
Table 1 Three phase load unbalance mode 1: TLUD and transformer efficiency statistics

| 方式 | 三相不平衡负载的<br>试验条件                                                                     | 电流不平衡度 $\varepsilon_I$ | 变压器效率 $\eta$ |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
|    | $I_s = I_{2N} = 1.389A$                                                              |                        |              |
| 1  | $I_b = (1+10\%)I_{2N} = 1.528A$<br>$I_c = (1-10\%)I_{2N} = 1.250A$<br>$I_n = 0.241A$ | 5.78%                  | 69.05%       |
|    | $I_s = I_{2N} = 1.389A$                                                              |                        |              |
| 2  | $I_b = (1+20\%)I_{2N} = 1.667A$<br>$I_c = (1-20\%)I_{2N} = 1.111A$<br>$I_n = 0.482A$ | 11.56%                 | 68.29%       |
|    | $I_s = I_{2N} = 1.389A$                                                              |                        |              |
| 3  | $I_b = (1+30\%)I_{2N} = 1.806A$<br>$I_c = (1-30\%)I_{2N} = 0.972A$<br>$I_n = 0.722A$ | 17.32%                 | 67.02%       |
|    | $I_s = I_{2N} = 1.389A$                                                              |                        |              |
| 4  | $I_b = (1+40\%)I_{2N} = 1.945A$<br>$I_c = (1-40\%)I_{2N} = 0.833A$                   | 23.11%                 | 65.22%       |

|   |                                                                                      |        |        |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|
|   | $I_s = 0.963A$<br>$I_s = I_{2N} = 1.389A$                                            |        |        |
| 5 | $I_b = (1+50\%)I_{2N} = 2.084A$<br>$I_c = (1-50\%)I_{2N} = 0.694A$<br>$I_n = 1.204A$ | 28.89% | 62.98% |

利用 Origin2021 进行仿真，其关系曲线如图 3 所示：

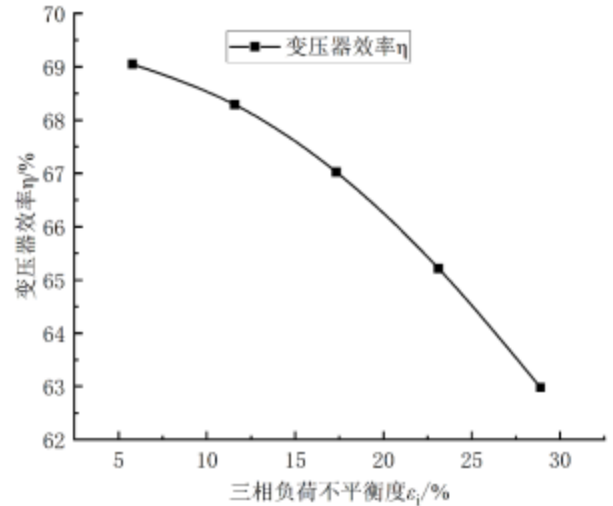


图 3 TLUD 与变压器效率关系曲线

Fig.3 TLUD and Transformer Efficiency Relationship Curve

由表 1 和图 3 可知，变压器效率随 TLUD 增大而减小。

(2) 三相负荷幅值平衡而功率因数不平衡。测试结果如表 2 所示。

表 2 三相负荷不平衡方式 2: TLUD 与变压器效率统计  
Table 2 Three phase load unbalance mode 2: TLUD and transformer efficiency statistics

| 方式 | 三相不平衡负载的<br>试验条件                                                   | 电流不平衡度 $\varepsilon_I$ | 变压器效率 $\eta$ |
|----|--------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
|    | $\cos\varphi_a = 1$                                                |                        |              |
| 1  | $\cos\varphi_b = 0.866$<br>$\cos\varphi_c = 0.5$<br>$I_s = 1.389A$ | 36.60%                 | 66.19%       |
|    | $\cos\varphi_a = 1$                                                |                        |              |
| 2  | $\cos\varphi_b = 0.5$<br>$\cos\varphi_c = 0.866$<br>$I_s = 1.389A$ | 26.79%                 | 66.19%       |
|    | $\cos\varphi_a = 0.866$<br>$\cos\varphi_c = 1$<br>$I_s = 1.389A$   | 26.79%                 | 66.19%       |
|    | $\cos\varphi_a = 0.5$                                              |                        |              |
| 4  | $\cos\varphi_b = 1$<br>$\cos\varphi_c = 0.866$<br>$I_s = 1.017A$   | 36.60%                 | 67.34%       |
|    | $\cos\varphi_a = 0.866$<br>$\cos\varphi_c = 0.5$                   |                        |              |
| 5  | $\cos\varphi_b = 0.5$<br>$\cos\varphi_c = 1$<br>$I_s = 1.017A$     | 36.60%                 | 67.34%       |
|    | $\cos\varphi_a = 1$<br>$\cos\varphi_c = 0.866$                     |                        |              |
| 6  | $\cos\varphi_b = 1$<br>$\cos\varphi_c = 0.5$<br>$I_s = 1.389A$     | 26.79%                 | 66.19%       |

由表2可以看出, TLUD与负载功率因数有关, 总功耗及变压器效率与中性线电流有关。三相电流不平衡度越大不一定中性线电流越大, 取决于三相功率因数的平衡性。

(3) 三相负荷幅值不平衡而功率因数亦不平衡。测试结果如表3所示:

表3 三相负荷不平衡方式3: TLUD与变压器效率统计  
Table 3 Three Phase Load Unbalance Mode 3: TLUD and Transformer Efficiency Statistics

| 方式 | 三相不平衡负载的<br>试验条件                                                                                 | 电流不平衡度 $\varepsilon_i$ | 变压器效率 $\eta$ |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------|
| 1  | $I_a=I_{N1}=1.389$<br>$I_b=(1+10\%)I_{N1}=1.528A$<br>$I_c=(1-10\%)I_{N1}=1.250A$<br>$I_n=0.761A$ | 40.23%                 | 67.78%       |
| 2  | $I_a=I_{N1}=1.389$<br>$I_b=(1+20\%)I_{N1}=1.667A$<br>$I_c=(1-20\%)I_{N1}=1.111A$<br>$I_n=0.516A$ | 44.07%                 | 67.63%       |
| 3  | $I_a=I_{N1}=1.389$<br>$I_b=(1+30\%)I_{N1}=1.806A$<br>$I_c=(1-30\%)I_{N1}=0.972A$<br>$I_n=0.317A$ | 48.08%                 | 67.03%       |
| 4  | $I_a=I_{N1}=1.389$<br>$I_b=(1+40\%)I_{N1}=1.945A$<br>$I_c=(1-40\%)I_{N1}=0.833A$<br>$I_n=0.280A$ | 52.15%                 | 65.84%       |
| 5  | $I_a=I_{N1}=1.389$<br>$I_b=(1+50\%)I_{N1}=2.084A$<br>$I_c=(1-50\%)I_{N1}=0.694A$<br>$I_n=0.446A$ | 56.29%                 | 64.13%       |

利用MATLAB进行仿真, 其仿真结果如图4所示:

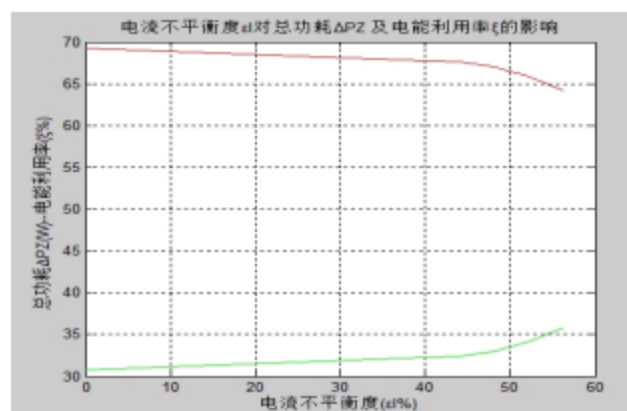


图4 三相电流不平衡度与总功耗及变压器效率关系曲线  
Fig. 4 Relationship curve between three-phase current unbalance and total power consumption and transformer efficiency

由表3和图4可以看出, 当变压器三相负荷幅值不平衡而功率因数亦不平衡时, 三相电流的不平衡度越大, 总损耗越大, 变压器效率越小。

按照上述5种三相负荷不平衡实验方式进行试验, 并对5种三相电流不平衡度算法比较(对 $K_{\varepsilon}$ 进行归一化)结果如表4所示。

表4 5种三相电流不平衡度比较统计

Table 4 Comparison and statistics of five types of three-phase current unbalances

| 方式 | $\varepsilon_{I1}$ | $\varepsilon_{I2}$ | $\varepsilon_{I3}$ | $\varepsilon_{In}$ | $K_{\varepsilon}$ |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1  | 18.2%              | 10.0%              | 40.2%              | 54.8%              | 2.0%              |
| 2  | 33.4%              | 20.0%              | 44.1%              | 37.1%              | 8.0%              |
| 3  | 46.2%              | 30.0%              | 48.1%              | 22.8%              | 18.0%             |
| 4  | 57.2%              | 40.0%              | 52.1%              | 20.2%              | 32.0%             |
| 5  | 66.7%              | 50.0%              | 56.3%              | 32.1%              | 50.1%             |

从表4可以看出第四种三相电流不平衡度算法不能有效分析TLUD与变压器效率的关系特性, 文中提出的第五种三相电流不平衡度算法较前三种来看, 能明显反映TLUD与变压器效率的关系特性, 具有较强的实用性。

**案例量化:** 在低压配电系统中, 已知伊犁地区2021年全年用电量为22.6亿千瓦时, 若三相负荷长期工作在三相负荷不平衡情况下, 按照每度电0.55元计算, 则造成的经济损失约为4.5亿元。调查的180台变压器, 每台每年损耗约为11000kW·h, 每年造成的直接经济损失约108.9万元。

#### 4 TLUD与变压器效率检测分析

为了验证所提算法的有效性以及为治理三相负荷不平衡、提高变压器效率提供参考, 根据(18)式对TLUD与变压器效率进行检测分析如下: 利用采样模块对电力系统进行采样, 借助CPU运算控制系统, 对采样数据进行运算, 将TLUD检测值与变压器效率计算值, 通过液晶显示模块实时显示, 结构框图如图5所示。

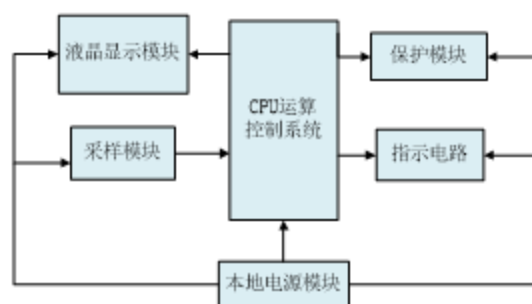


图5 TLUD与变压器效率检测框图  
Fig. 5 TLUD and Transformer Efficiency Detection Block Diagram

针对本文提出的TLUD进行检测, 并实时检测变压器效率, 其算法流程如图6所示。

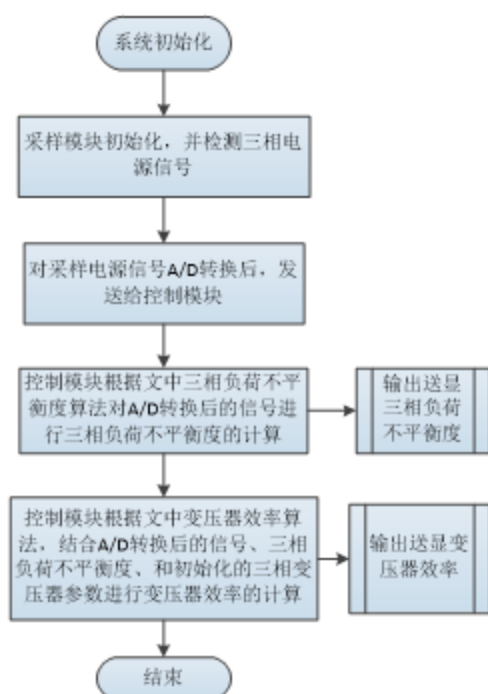


图6 TLUD与变压器效率检测算法

Fig. 6 TLUD and Transformer Efficiency Detection Algorithm

将TLUD与变压器效率检测算法应用到实际工程中如图7所示。

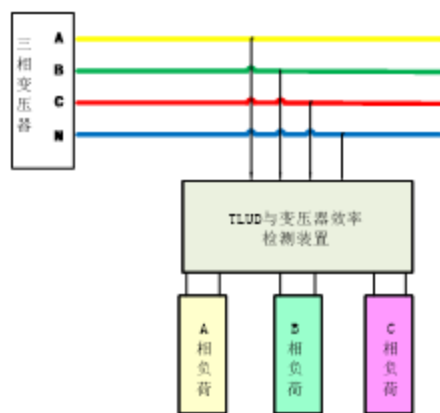


图7 TLUD与变压器效率检测装置应用图

Fig.7 Application diagram of TLUD and transformer efficiency detection device

## 5 提高变压器效率的措施

(1) 根据中性线电流与变压器效率关系曲线可知: 建立完善的测量中性线电流的制度, 检测变压器线路出口电流不平衡度超过20%时, 做出调整策略以提高变压器效率。

(2) 根据TLUD与变压器效率关系曲线可知: 在配电时应尽量使三相平衡, 6户以上不宜采用单相供电。将单相用电负荷均匀的分配到三相线路中以降低TLUD提高变压器效率。

(3) 根据(14)式: 采用无功补偿方式可大大减少零序电流与负序电流, 使三相不平衡系统转变成基本平衡系统来降低损耗<sup>[15-16]</sup>, 进而降低TLUD提高变压器效率。

(4) 根据三相负荷不平衡的治理策略: 采用基于用电信息采集系统的三相不平衡调整的方法<sup>[17]</sup>及三相不平衡预计算控制策略<sup>[18]</sup>, 动态调整三相负荷以降低TLUD进而提高变压器效率。

(5) 根据图1可知: 选择合适的配电变压器类型及合适的配电方式, 使 $\beta=0.4-0.6$ 之间, 对应的 $P_{KN}$ 与 $P_0$ 之比为3~4时变压器的效率较高。

## 6 结论

本文从三相负荷不平衡对变压器效率影响关系研究出发, 分别为TLUD及变压器效率建立了数学模型, 并找到了二者之间的有机联系, 以实验数据与仿真分析为依靠, 建立了TLUD及变压器效率关系曲线。以全新的角度针对三相功率因数平衡而三相负荷幅值不平衡; 三相负荷幅值平衡而功率因数不平衡; 三相负荷幅值不平衡而功率因数亦不平衡, 三种情况下, 三相负荷不平衡对变压器效率影响的仿真实验研究和分析, 验证了所提TLUD与变压器效率关系, 并以具体实例量化说明了三相负荷不平衡造成的电能浪费和经济损失。提出了TLUD与变压器效率检测的算法及可能的装置应用, 并基于本文研究还提出了提高变压器效率的措施, 为提高供电质量和节能减排提供了参考依据。

## 参考文献

- [1] 王俊融, 欧家祥, 等. 基于智能负荷开关动态节能降耗技术研究[J]. 电力大数据, 2017, 20(11): 29-31.  
Wang Junrong, Ou Jiaxiang, et al. Research on Dynamic Energy Conservation and Loss Reduction Technology Based on Intelligent Load Switch [J]. Electric Power Big Data, 2017, 20(11): 29-31.
- [2] 蔡小斌, 陈国良, 孙丽兵, 等. 微网电能质量新特性及其治理方案综述[J]. 电源技术, 2015, 39(09): 2041-2044.  
Mu Xiaobin, Chen Guoliang, Sun Libing, et al. Review of New Characteristics and Governance Solutions of Microgrid Power Quality [J]. Power Technology, 2015, 39(09): 2041-2044.
- [3] 刘科研, 贾东烈, 王磊, 耿光飞, 魏琛豪. 考虑负荷不平衡分布的低压配电网线损实用计算策略[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(06): 81-86.  
Liu Kexue, Jia Dongli, Wang Weijia, Geng Guangfei, Wei Chenhao. Practical Calculation Strategy for Low Voltage Distribution Network Line Loss Considering Unbalanced Load Distribution [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(06): 81-86.
- [4] 邓琨, 孙俊, 魏恩伟, 郑杰, 刘仲夏. 基于遗传算法优化的三相不平衡多目标控制策略研究[J]. 电气开关, 2022, 60(02): 25-29.  
Deng Kun, Sun Jun, Wei Enwei, Zheng Jie, Liu Zhongxia. Research on multi-objective control strategy for three-phase imbalance based on genetic algorithm optimization [J]. Electrical Switch, 2022, 60(02): 25-29.



- [5] 邱梓霖.三相不平衡对配电网的影响分析[J].大众用电,2021,36(10):27-28.  
Qiu Zilin. Analysis of the impact of three-phase imbalance on distribution networks [J]. Volkswagen Electric, 2021, 36 (10): 27-28.
- [6] 何兆磊,古连藏,王景,等.提高变压器的三相不平衡损耗精度的方法[J].数字通信世界,2022(07):91-93+96.  
He Zhaolei, Gu Lianmeng, Wang Jing, et al. Methods to improve the accuracy of three-phase unbalanced losses in transformers [J]. Digital Communication World, 2022 (07): 91-93+96.
- [7] 黄明欣,曹毅,葛阳,等.考虑平衡三相负荷的低压配电网降损方案[J].广东电力,2022,35(04):39-46.  
Huang Mingxin, Tang Niang, Ge Yang, et al. Low voltage distribution network loss reduction scheme considering balanced three-phase load [J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35 (04): 39-46.
- [8] 汪清.配电网三相不平衡度计算方法研究[J].电子制作,2020,(20):21-22.  
Wang Qing. Research on the calculation method of three-phase imbalance in distribution networks [J]. Electronic Manufacturing, 2020, (20): 21-22.
- [9] 姚伟,刘彦彦,彭龙生,等.关于低压配电网系统三相不平衡度监测的研究[J].电子设计工程,2021,29(14):106-110.  
Yao Wei, Liu Yanyan, Peng Longsheng, et al. Research on three-phase imbalance monitoring in low-voltage distribution network systems [J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29 (14): 106-110.
- [10] 刘锐宇.配电网三相不平衡原因分析及治理系统仿真研究[J].农业科技与装备,2020,(2):39-41.  
Liu Xiaoyu. Analysis of the causes of three-phase imbalance in distribution networks and simulation research on governance systems [J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2020, (2): 39-41.
- [11] 李强,陆玉军,陈毅,等.三相不平衡下配电变压器损耗计算方法研究[J].机械与电子,2020,(9):32-36.  
Li Cheng, Lu Yujun, Chen Hao, et al. Research on the Calculation Method of Distribution Transformer Losses under Three Phase Unbalance [J]. Mechanical and Electronics, 2020, (9): 32-36.
- [12] 姚伟,刘彦彦.低压线路三相负荷不平衡电容补偿算法及仿真研究[J].电子设计工程,2017,(25):370-157-160.  
Yao Wei, Liu Yanyan. Algorithm and simulation research on three-phase unbalanced capacitor compensation for low-voltage transmission lines [J]. Electronic Design Engineering, 2017, (25): 370-157-160.
- [13] 赖哲.三相不平衡对配网变压器效率影响分析[J].机电信息,2020,(11):13-15.  
Lai Zha. Analysis of the impact of three-phase imbalance on the efficiency of distribution network transformers [J]. Electromechanical Information, 2020, (11): 13-15.
- [14] 郑黎明.一种新的电力变压器效率评价方法[J].机电工程技术,2021,50(07):181-183.  
Zheng Liming A new method for evaluating the efficiency of power transformers [J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2021, 50 (07): 181-183.
- [15] 孙一帆.低压配电网线损影响因素与降损策略研究[D].东南大学,2018.  
Sun Yifan. Research on Factors Influencing Line Loss and Loss Reduction Strategies in Low Voltage Distribution Networks [D]. Southeast University, 2018.
- [16] 王子豪.配电网侧三相平衡降损策略的研究[D].西安理工大学:研究生院,2020年.  
Wang Zihao. Research on three-phase balance loss reduction strategy on the distribution network side [D]. Xi'an University of Technology:

Graduate School, 2020.

- [17] 余伟,郭其峰,郑新,等.基于用电信息采集系统的三相不平衡调整的装置及方法[P].中国:201811442153.6,2019-03-22.  
Yu Wei, Guo Qifeng, Zheng Xin, et al. Device and method for three-phase imbalance adjustment based on electricity consumption information acquisition system [P]. China: 201811442153.6, 2019-03-22.
- [18] 李永霞,龚宇馨,赵燕燕,郭修育.三相不平衡预计算控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(03):20-24.  
Li Yongxia, Gong Yuxin, Zhao Yanyan, et al. Three-phase Imbalance Control Strategy Based on Precomputation [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2020, 32 (03): 20-24.

收稿日期:2024-5-13; 修回日期:2024-08-05



姚伟(1988.09—),男,硕士,讲师,主要研究方向:三相负荷不平衡与治理研究、低压电力系统保护与自动控制。E-mail: 511489138@qq.com

刘彦彦(1991.02—),通信作者,女,学士,讲师,主要研究方向:电气自动化、自动控制。E-mail: 1371549419@qq.com

帕提合努尔·叶列解甫(1985.05—),男,高级工程师,主要研究方向:电力系统变配电设备运行维护,电力系可靠性研究。E-mail: 443990164@1qq.com

郭志明(1983—),男,高级工程师,研究方向为电气工程及其自动化、电气设备故障诊断。

(编辑 五号楷体,居右,段前空6pt)



文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 464

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 弱电网下 LCL 型并网逆变器鲁棒性增强控制策略

张宗阳, 张磊, 高春侠, 王贝宁, 李阳

(中国石油大学(华东) 新能源学院 青岛 266580)

## Robustness Enhancement Control Strategy of LCL Type Grid- Connected Inverter under Weak Grid

Zongyang Zhang, Lei Zhang, Chunxia Gao, Beining Wang, Yang Li

(College of New Energy China University of Petroleum (East China) Qing Dao 266580 China)

**ABSTRACT:** In order to ensure the stability of the LCL grid-connected inverter system, the method of suppressing the instability and oscillation of the system by capacitive current feedback is widely used. In the case of digital control, the capacitive current feedback strategy will exhibit negative damping characteristics in the frequency band higher than  $1/6$  sampling frequency ( $1/6f_s$ ), and the system stability conditions are harsh. In order to solve the above problems, a capacitive current feedback active damping strategy based on time delay compensation is proposed, which compensates the critical frequency to the Nyquist frequency ( $1/2f_s$ ) by adding the delay of time delay, which greatly avoids the serious impact of digital control delay, and the simulation results verify the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the control strategy.

**KEY WORDS:** Digital Control Delay, LCL-Filter, Capacitive Current Feedback, Weak Grid

**摘要:** 为保证 LCL 型并网逆变器系统稳定, 采用电容电流反馈抑制该系统失稳振荡的方法被广泛使用。在数字控制的情况下, 电容电流反馈策略会在高于  $1/6$  采样频率( $1/6f_s$ )的频带内表现出负阻尼特性, 系统稳定条件苛刻; 同时, 在弱电网下, 电网阻抗具有时变及感性特性, 进一步导致系统鲁棒性减弱。针对以上问题, 提出了一种基于时滞补偿的电容电流反馈有源阻尼策略, 该方法通过增加时滞补偿环节, 将临界频率补偿到奈奎斯特频率( $1/2f_s$ )附近, 极大避免了数字控制延时带来的严重影响, 仿真结果验证了文中的理论分析的正确性和控制策略的有效性。

**关键词:** 数字控制延时, LCL 滤波器, 电容电流反馈, 弱电网

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.P10007

## 0 引言

在“多能互补”的能源体系下, 以风能、光能等为主的新能源正不断并入电网。并网逆变器在新能源和电网之间的连接中发挥着关键作用, 为了减

少逆变器输出电流的高次谐波, 通常会在逆变器和电网之间插入 LCL 滤波器。由于 LCL 滤波器自身谐振问题, 国内外学者提出了无源阻尼和有源阻尼等方法去抑制 LCL 滤波器的谐振尖峰。无源阻尼会产生额外的损耗<sup>[1]</sup>, 所以无额外损耗的有源阻尼方法被广泛使用。

控制策略需要通过数字控制来实现, 由于数字控制的计算以及采样延时, 会大大减弱有源阻尼方法的有效性<sup>[2-6]</sup>。有源阻尼不再等效为纯电阻, 而是呈现出与采样频率  $f_s$  有关的阻抗特性。如文献[2-6]所示, 该特性会产生一个临界频率, 最坏的情况下为  $1/6f_s$ , 在  $(0, 1/6f_s)$  频段内, 该等效阻抗实部为正, 在  $(1/6f_s, 1/2f_s)$  频段内, 该等效阻抗实部为负, 正负实部会导致不同的系统约束且会在临界频率附近产生频率禁区<sup>[7]</sup>, 即 LCL 滤波器谐振频率在临界频率附近, 系统无法稳定。

围绕上述问题, 国内外学者提出了大量的解决方案。文献[2]在电容电流反馈通道使用了非常规二阶相位超前补偿器, 并分析了所提出的二阶相位补偿器所适用的离散规则, 将正阻尼区域拓展到  $0.403f_s$ 。文献[3]提出电容电流反馈与电容电压反馈结合的方法, 相当于电容并联两个阻抗拓展正阻尼区域。将正阻尼区域拓展到  $0.48f_s$ 。但是增加了传感器数量。文献[4]为了使临界频率拓展到奈奎斯特频率附近, 将电容电流反馈回路增益等效一分为二, 将延时环节在电容电流反馈环路中消除, 但是存在超越方程, 不容易实现。文献[5]在电容电压反馈回路中插入了一个高通滤波器, 拓展了正阻尼区域直至  $1/3f_s$ 。

可见, 提高弱电网条件下并网逆变器系统的稳定性已经取得了一定的研究成果, 但是在降低成本的情况下进一步增强系统鲁棒性也是有必要研究的。本文提出了一种简单的时滞补偿环节, 对其进

行了有理化二阶近似,发现该环节相当于一种不稳定的二阶相位补偿器,选择了其适用的离散规则。

本文首先建立了弱电网下并网逆变器的数学模型,分析了有源阻尼在数字时滞下产生的阻抗特性,提出了时滞补偿策略并分析了该策略的有效性;其次,选择了合适的离散规则;最后通过 MATLAB 仿真验证了本文的理论分析的正确性和所提控制策略的有效性。

## 1 系统数学模型及问题分析

### 1.1 系统描述

LCL 型三相并网逆变器如图 1 所示,其中  $V_{dc}$  为直流电压,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C$  分别为逆变器侧电感、网侧电感以及滤波电容,  $V_{pcc}$ 、 $V_g$  分别为并网点电压和电网电压,  $i_{Labc}$ 、 $i_{gabc}$ 、 $i_{cabc}$  分别为逆变器输出电流、并网电流以及电容电流。为模拟最恶劣的工况,本文仅考虑纯感性电网阻抗  $Z_g$ 。

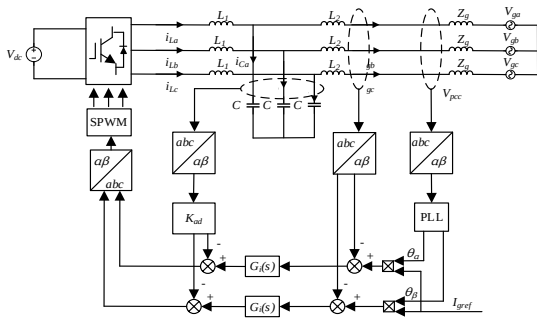


图 1 LCL 型并网逆变器电容电流反馈有源阻尼控制系统

Fig.1 LCL grid-connected inverter capacitance current feedback active damping control system

首先对并网电流相位控制使其同步电网电压,再对并网电流的幅值控制,通过外部电压环得来电流参考值,使并网电流跟踪其幅值,由于电压外环的响应速度要比电流内环慢得多,所以可以单独分析电流环。将电流参考值与相位相乘得到正弦参考值,与并网电流反馈值做差经过电流控制器  $G_i(s)$  调节,再经过电容电流反馈阻尼 LCL 滤波器谐振尖峰,最终经过 SPWM 调制,期间会产生控制延时  $G_d(s)$ ,系统控制过程如图 2 所示。

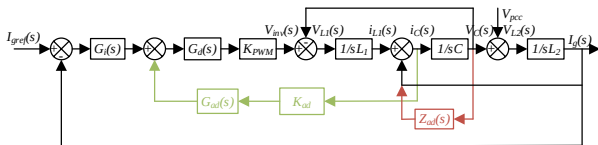


图 2 LCL 型并网逆变器电容电流反馈有源阻尼控制策略

Fig.2 LCL grid-connected inverter capacitance current feedback active damping control strategy

由于  $\alpha\beta$  轴没有耦合项,所以这里仅对单轴分析。其中,  $K_{ad}$  为电容电流反馈系数。  $G_d(s)$  为数字控制延时,通常由零阶保持器引入的 0.5 拍延时和滞后  $\lambda$  拍装裁延时组成<sup>[11]</sup>,最坏情况下为 1 拍<sup>[7]</sup>。  $T_s$  为采样时间,即采样频率的倒数。

$$G_d(s) = e^{-(0.5+\lambda)sT_s} \quad (1)$$

式(2)为系统环路开环增益,表达式如下:其中  $\omega_r$  为 LCL 谐振频率,  $K_{ad}$  为电容电流反馈系数,  $G_{ad}(s)$  为补偿环节,此时为 1。

$$T(s) = \frac{G_i(s)G_d(s)K_{PWM}}{L_1L_2Cs[s^2 + \frac{1}{L_1}sG_d(s)G_{ad}(s)K_{ad}K_{PWM} + \omega_r^2]} \quad (2)$$

$$\omega_r = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1L_2C}} \quad (3)$$

### 1.2 数字控制下有源阻尼方法的局限性

在图 2 中,  $Z_{ad}(s)$  是由电容电流反馈等效而来,也就是有源阻尼,相当于在滤波电容处并联了一个虚拟阻抗<sup>[8-9]</sup>。虚拟阻抗由虚拟电阻  $R_{ad}(s)$  和虚拟电抗  $X_{ad}(s)$  并联组成。如图 3 所示。

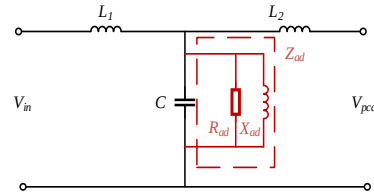


图 3 虚拟阻抗等效图

Fig.3 Virtual impedance equivalence diagram

此时,  $Z_{ad}(s)$  表达式如式(4)所示,令  $s=j\omega$  可以得出虚拟电阻  $R_{ad}(\omega)$  和虚拟电抗  $X_{ad}(\omega)$  如式(5)所示 ( $\lambda=1$ ) 此时  $G_{ad}(\omega)=1$ :

$$Z_{ad}(s) = \frac{L_1}{CG_{ad}(s)K_{ad}(s)G_d(s)K_{PWM}} = R_{ad}(s) // X_{ad}(s) \quad (4)$$

$$\begin{cases} R_{ad}(\omega) = \frac{L_1}{CK_{PWM}K_{ad}\cos(1.5\omega T_s)} \\ X_{ad}(\omega) = \frac{L_1}{CK_{PWM}K_{ad}\sin(1.5\omega T_s)} \end{cases} \quad (5)$$

当  $K_{ad}>0$  时根据式(5)不难推出:

1) 当  $\omega < \omega_s/6$  时,  $R_{ad}(\omega)>0$ , 在  $\omega_s/6 < \omega < \omega_s/2$  时,  $R_{ad}(\omega)<0$ ; 可知  $\omega_s/6$  为正负阻尼的临界频率。

2) 在  $\omega < \omega_s/3$  时,  $X_{ad}(\omega)>0$  成感性,随着  $K_{ad}$  的增大,谐振频率会增大且不超过  $\omega_s/3$ ; 在  $\omega_s/3 < \omega < \omega_s/2$  时,  $X_{ad}(\omega)<0$  成容性,随着  $K_{ad}$  的增大,谐振频率会减小且不小于  $\omega_s/3$ 。

根据式(2)以及文献[10]-[12], 可以得出系统稳定条件, 如表 1 所示。其中,  $\omega_r$  为 LCL 谐振频率,  $\omega_r'$  为加入反馈系数后的 LCL 谐振频率,  $K_c$  为临界系数,  $P$  为右半平面极点数。(-)与(+)分别为负穿越和正穿越。根据表 1, 可以看出只有情况 1 的稳定要求最容易实现, 通常我们会把 LCL 的谐振频率设置在  $f_s/6$  以外, 此时不需要阻尼也能稳定, 但是随着电网阻抗的变化, LCL 谐振频率会变化到情况 3 和情况 2。

表 1 系统稳定性条件

Tab1. System stability conditions

|   | $\omega_r$                 | $K_{ad}$                     | $\omega_r'$                | $R_{ad}$ |
|---|----------------------------|------------------------------|----------------------------|----------|
| 1 | $(0, \omega_s/6)$          | $(0, K_c)$                   | $(0, \omega_s/6)$          | +        |
| 2 | $(0, \omega_s/6)$          | $(K_c, +\infty)$             | $(\omega_s/6, \omega_s/2)$ | -        |
| 3 | $\omega_s/6$               | 无                            | $(\omega_s/6, \omega_s/2)$ | -        |
| 4 | $(\omega_s/6, \omega_s/2)$ | $(0, +\infty)$               | $(\omega_s/6, \omega_s/2)$ | -        |
|   | $P$                        | -180° 穿越                     | 幅值裕度要求                     | 相位裕度要求   |
| 1 | 0                          | $\omega_r(-)$                | GM1>0dB                    | PM>0°    |
| 2 | 2                          | $\omega_r(-), \omega_s/6(+)$ | GM1>0dB,<br>GM2<0dB        | PM>0°    |
| 3 | 2                          | 无                            | 不稳定                        | 不稳定      |
| 4 | 2                          | $\omega_s/6(-), \omega_r(+)$ | GM1<0dB,<br>GM2>0dB        | PM>0°    |

针对这一问题, 本文认为将临界频率拓展到奈奎斯特频率  $f_s/2$  附近, 即拓展正阻尼区域, 则虚拟电阻  $R_{ad}$  将在奈奎斯特频率内呈现正阻尼特性, 这样系统在整个频带中的稳定性条件为情况 1。这样做不仅可以消除 LCL 谐振频率禁区(临界频率附近), 而且系统稳定性约束也会简单。

## 2 基于帕德近似的时滞补偿方案

从式(5)中可以看到时间延迟  $e^{-1.5sT_s}$  决定了虚拟阻抗正负阻尼特性, 随着时间延迟的降低, 正阻尼区域会逐渐增加, 当时间延迟降低到 0.5 拍时, 此时的正阻尼区域以拓展至  $0.5f_s$ 。如式(6)所示。

$$R_{ad}(\omega) = \frac{L_1}{CK_{PWM}G_{ad}(\omega)K_{ad}\cos(0.5\omega T_s)} \quad (6)$$

因此为减少时间延迟本文在电容电流反馈通道加入 1 拍的超前环节, 即  $e^{sT_s}$ 。由于超前环节是超越函数形式, 所以无法将其实现于控制环节, 因此需要将超前环节有理化近似处理。

根据图 4 可知, 泰勒近似与帕德近似在低频段与理想延时一致, 高频段逐渐偏离, 但是帕德近似相较于泰勒近似更接近于理想延时, 且阶数越高误差越小, 因此本文采用二阶帕德近似。即:

$$G_{ad}(s) = e^{sT_s} = \frac{(sT_s)^2 + 6(sT_s) + 12}{(sT_s)^2 - 6(sT_s) + 12} \quad (7)$$

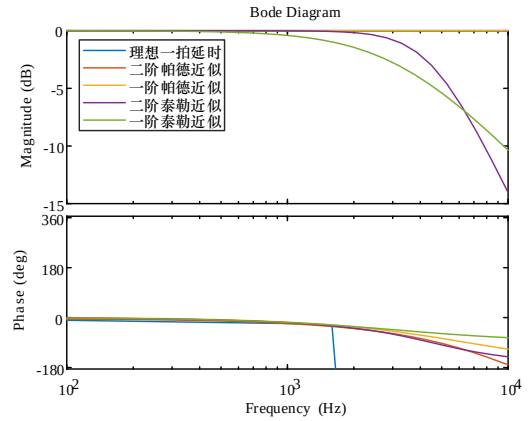


图 4 有理化近似比较

Fig.4 Comparison of mathematical and physical approximation

式(7)等效于一种不稳定的二阶相位补偿器<sup>[2]</sup>, 其形式如式(8)所示。

$$G_f = K_{ad} \frac{s^2 + 2\alpha\varphi_\alpha s + (\varphi_\alpha)^2}{s^2 - 2\beta\varphi_\beta s + (\varphi_\beta)^2} \quad (8)$$

这种非常规的不稳定二阶相位补偿器只有在后向差分法离散规则<sup>[2]</sup>下才会有一定范围的  $K_{ad}$  使系统稳定。将式(7)中的  $s$  等效为  $\frac{z-1}{T_s z}$ 。  $G_{ad}(z)$  如下:

$$G_{ad}(z) = \frac{19z^2 - 8z + 1}{7z^2 + 4z + 1} \quad (9)$$

## 3 稳定性分析

为验证系统的鲁棒性以及可行性, 对其进行稳定性分析, 并对传统电容电流反馈进行对比。本文均按照表 2 的参数进行分析和仿真。

表 2 系统参数

Tab2. System parameters

| 参数          | 值         | 参数               | 值         |
|-------------|-----------|------------------|-----------|
| 输出侧电感 $L_1$ | 5mH       | 直流侧电压 $V_{dc}$   | 720V      |
| 电网侧电感 $L_2$ | 1mH       | 开关频率 $f_{sw}$    | 10kHz     |
| 滤波器电容 $C$   | 1.5uF     | 采样频率 $f_s$       | 20kHz     |
| 输出功率 $P_o$  | 33kW      | PWM 增益 $K_{PWM}$ | 360       |
| 电网电压 $V_g$  | 220V(RMS) | 谐振频率 $f_r$       | 4501.58Hz |

### 3.1 传统电容电流反馈控制

根据式(2)观察传统电容电流反馈随着电网阻抗变化( $L_g=0\sim 2mH$ )时的开环伯德图。由图 5 所示。由图 5 可见当没有电网阻抗时即( $f_r=4501.58Hz$ )在  $f_s/6(3333.33Hz)$  之外, 此时不需要有源阻尼系统也

可稳定；但是随着电网阻抗的增大，谐振频率不断下降，当电网阻抗为  $0.8\text{mH}$  ( $f_r=3571.96\text{Hz}$ ) 时，此时谐振频率已在  $f_s/6$  附近，系统不再稳定。

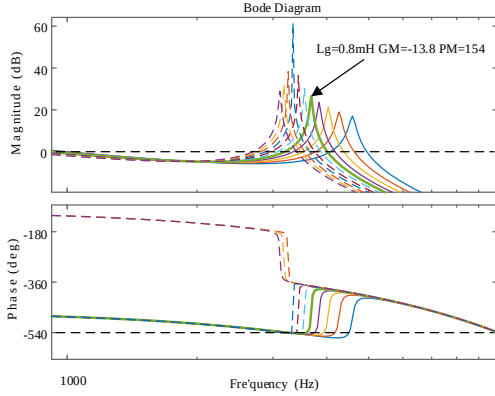


图 5 传统电容电流反馈控制开环伯德图

Fig.5 Conventional capacitive current feedback controls an open-loop Bode diagram

### 3.2 基于时滞补偿的电容电流反馈控制

将式(7)代入式(4)可以得出新的虚拟电阻如式(9)所示。图 6 为式(9)的图像化，根据图 6 可见此时正阻尼区域已拓展至  $0.45f_s$ 。

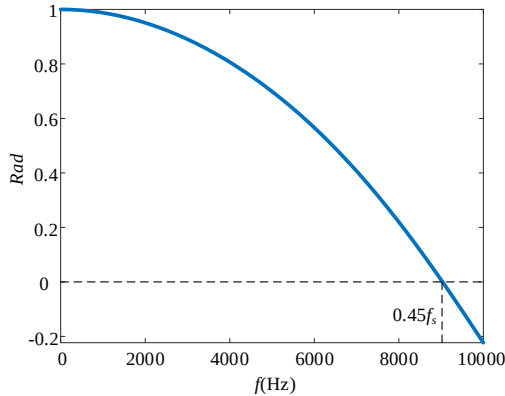


图 6 正阻尼区域

Fig.6 Positive damping area

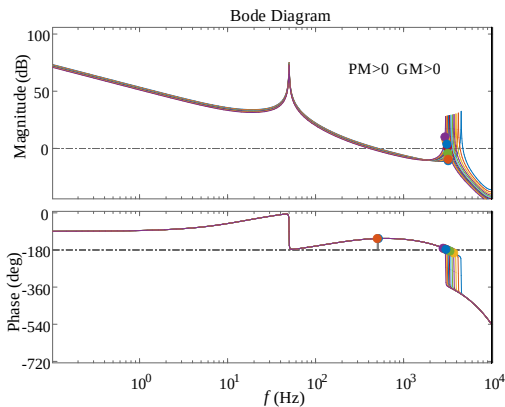


图 7 改进电容电流反馈控制开环伯德图

Fig.7 Improved capacitive current feedback controls an open-loop Bode diagram

$$R_{ad}(\omega) = \frac{[(12 - T_s^2 \omega^2)^2 - 36 T_s^2 \omega^2] \cos(1.5 \omega T_s) + (144 - 12 T_s^2 \omega^2) \omega T_s \sin(1.5 \omega T_s)}{(12 - T_s^2 \omega^2)^2 + 36 T_s^2 \omega^2} \quad (9)$$

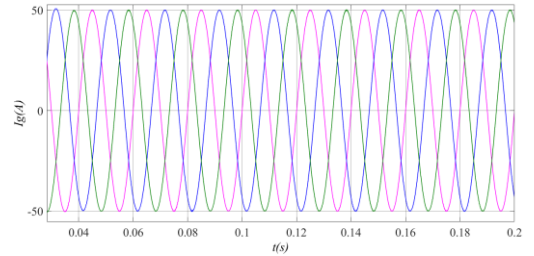
将式(7)代入式(2)观察基于时滞补偿的电容电流反馈随着电网阻抗变化 ( $L_g=0\sim 2\text{mH}$ ) 时的开环伯德图。由图 7 所示。可见加入时滞补偿以后即使穿越频率禁区依然满足系统稳定。

## 4 仿真验证

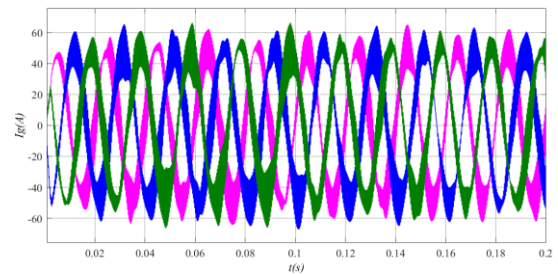
为验证所提时滞补偿策略的鲁棒性，根据表 2 中的参数在 MATLAB 中搭建了相应的系统模型。并对传统的电容电流反馈控制进行了对比。

### 4.1 传统电容电流反馈控制

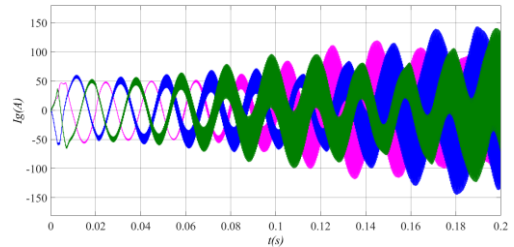
图 8 是传统电容电流反馈在不同电网阻抗值下的并网电流波形。



(a)  $L_g=0\text{mH}$



(b)  $L_g=0.8\text{mH}$



(c)  $L_g=2\text{mH}$

图 8 电网阻抗变化下的并网电流

Fig.8 Grid connected current under changes in grid impedance

在没有电网阻抗时，系统处于稳定状态，随着电网阻抗的增大，LCL 谐振频率达到频率禁区附近，系统不再稳定，发生了高频振荡；再随着电网阻抗的增大，LCL 谐振频率则处于正阻尼区域，此



时满足情况3的稳定性条件却不满足情况1的稳定性条件,系统失稳。

#### 4.2 基于时滞补偿的电容电流反馈控制

由于本方案采用  $\alpha\beta$  坐标系,为保证无静差调节,电流控制器采用准比例谐振控制器(QPR)。

$$G_i(s) = k_p + \frac{2k_r\omega_i s}{s^2 + 2\omega_i s + \omega_0^2} \quad (10)$$

令  $K_{ad}=0.05$ ,  $k_p=0.1$ ,  $k_r=30$ ,  $\omega_i=1$ 。图9是所提控制策略在电网阻抗变化下的并网电流波形。系统在电网阻抗  $0\sim 7\text{mH}$ (SCR=2)的变化下仍保持稳定,充分验证了该策略的鲁棒性。

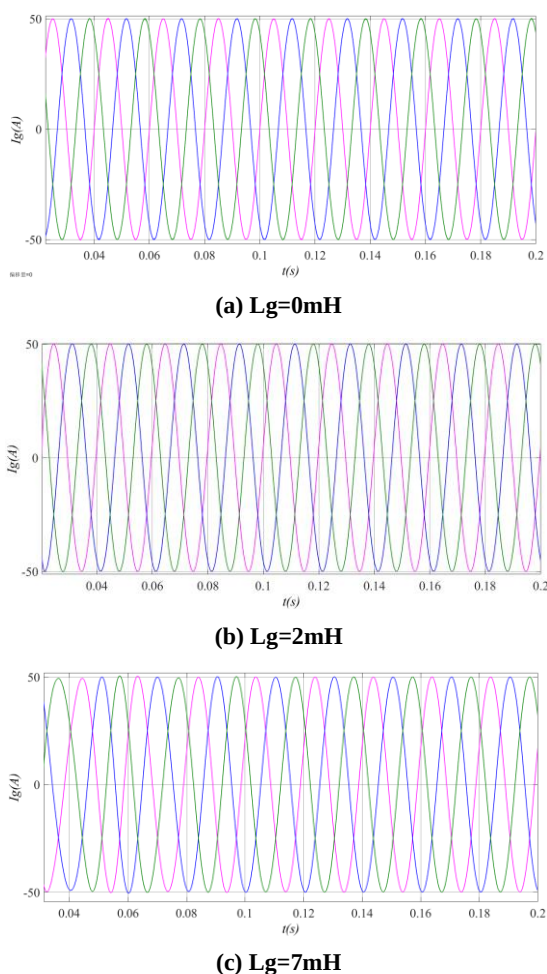


图9 电网阻抗变化下的并网电流

Fig.9 Grid connected current under changes in grid impedance

## 5 结论

本文采用的时滞补偿策略取得较好效果。针对  $0.45f_s$  频带内的谐振频率变化(LCL 参数变化、电网阻抗参数变化)等具有良好的阻尼效果及高鲁棒性。

## 参考文献

- [1] D. Solatalkaran, F. Zare, T. K. Saha and R. Sharma, "A Novel Approach in Filter Design for Grid-Connected Inverters Used in Renewable Energy Systems," in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 11, no. 1, pp. 154-164, Jan. 2020.
- [2] S. Li and H. Lin, "A Capacitor-Current-Feedback Positive Active Damping Control Strategy for LCL-Type Grid-Connected Inverter to Achieve High Robustness," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 6, pp. 6462-6474, June 2022.
- [3] Y. He, X. Wang, X. Ruan, D. Pan, X. Xu and F. Liu, "Capacitor-Current Proportional-Integral Positive Feedback Active Damping for LCL-Type Grid-Connected Inverter to Achieve High Robustness Against Grid Impedance Variation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 12, pp. 12423-12436, Dec. 2019.
- [4] H. Zhang, X. Wang, Y. He, D. Pan and X. Ruan, "A Compensation Method to Eliminate the Impact of Time Delay on Capacitor-Current Active Damping," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 7, pp. 7512-7516, July 2022.
- [5] Y. Geng, X. Song, X. Zhang, K. Yang and H. Liu, "Stability Analysis and Key Parameters Design for Grid-Connected Current-Source Inverter With Capacitor-Voltage Feedback Active Damping," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 6, pp. 7097-7111, June 2021.
- [6] B. Liu, Q. Wei, C. Zou and S. Duan, "Stability Analysis of LCL-Type Grid-Connected Inverter Under Single-Loop Inverter-Side Current Control With Capacitor Voltage Feedforward," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 2, pp. 691-702, Feb. 2018.
- [7] 阮新波,王学华,潘冬华等. LCL 型并网逆变器的控制技术[M].北京: 科学出版社,2015.
- [8] W. Chen, Y. Zhang, Y. Tu, K. Shen and J. Liu, "Active Damping Control for LCL Filters With Inverter-Side Current Feedback Only," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 9, pp. 10065-10069, Sept. 2022.
- [9] W. Chen, Y. Zhang, Y. Tu, Y. Guan, K. Shen and J. Liu, "Unified Active Damping Strategy Based on Generalized Virtual Impedance in LCL-Type Grid-Connected Inverter," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 8, pp. 8129-8139, Aug. 2023.
- [10] D. Yang, X. Wang, F. Liu, K. Xin, Y. Liu, and F. Blaabjerg, "Adaptive reactive power control of PV power plants for improved power transfer capability under ultra-weak grid conditions," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1269-1279, Mar. 2019.
- [11] 周斯琪. 并网逆变器控制时延分析及补偿研究[D].华中科技大学,2022.
- [12] 华铤. 基于数字控制的并网变换器性能分析与改善[D].华中科技大学,2023.

作者照片



作者姓名  
张宗阳

收稿日期: 2013-07-04。

作者简介:

张宗阳(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为并网逆变器控制及稳定性分析, E-mail: 412614072@qq.com;

张磊(1977), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子转换器、无线充电技术和工业驱动器的设计和控制等, E-mail: zl@upc.edu.cn。

(编辑 五号楷体, 居右, 段前空 6pt)

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 级联型双向准 Z 源 DC-DC 变换器

王贝宁, 张磊, 高春侠, 李阳, 张宗阳

(中国石油大学(华东) 新能源学院 青岛 266580)

## Cascaded Bidirectional Quasi-Z-Source DC-DC Converter

Lei Zhang, BeiNing Wang

(College of New Energy China University of Petroleum (East China) Qing Dao 266580 China)

**ABSTRACT:** This paper presents a novel quasi-Z-source structured DC-DC converter with cascaded and bidirectional conduction capability to facilitate the application of electrical energy storage in high-power scenarios with multiple voltage levels. The proposed topology first identifies the quasi-Z-source structure as the main framework, then replaces the diode components in the quasi-Z-source with switch structures, enabling bidirectional conduction capability. Finally, the quasi-Z-source structure replaces the inductor components in the quasi-Z-source structure. The proposed topology not only addresses the issue of unidirectional conduction in quasi-Z-source converters but also enhances its boost capability. Simulation verification of the proposed topology is conducted under various duty cycles.

**KEY WORDS:** Quasi-Z-Source Converter Bidirectional High Gain

**摘要:** 本文提出一种具有级联和可以双向导通的准 Z 源结构型 DC-DC 变换器, 以实现电储能等多种电压等级下的大功率场合的应用。本文提出的拓扑首先确定使用准 Z 源结构作为主体, 其次使用开关结构替换准 Z 源中的二极管元件, 使得其具备双向导通的能力, 最后使用准 Z 源结构替换准 Z 源结构中的电感元件。本文提出的拓扑既解决了准 Z 源仅能进行单向导通的问题, 也增加了其升压效果。并在不同占空比下对所提出的拓扑进行了仿真验证。

**关键词:** 准 Z 源结构 双向 高增益

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号(小五号 Times New Roman 字体加黑)

## 0 引言

随着世界人均汽车拥有量的增加, 化石燃料消耗和温室气体排放的增加正在对气候和环境产生严重影响[1]-[5]。以可再生能源为动力的新能源汽车, 可以实现零污染排放, 被认为是有效缓解能源危机的解决方案之一, 能源在国家工业发展中占据极其重要的地位。与交通有关的环境污染[6], [7]。作为最重要的“新能源”汽车之一, 混合能源电动汽

车(EV)主要包括高能量密度动力电池和高功率密度超级电容器。低压电池用于在稳态期间维持直流总线的高电压, 即使所需能量具有低频波动。超级电容器可用于在电动汽车的加速或制动过程中提供或吸收高频瞬时功率。因此, 这两种混合能源可以大大降低电动汽车负载突变对动力电池的退化影响, 以及改善整个动力系统的动态响应低的电压。

对于宽电压增益范围的双向 DC—DC 变换器, 基本上可以分为隔离型和非隔离型两类。隔离型双向转换器包括反激转换器、正激转换器以及半桥和全桥双向转换器。这些双向 DC—DC 转换器的优点之一是它们在升压和降压模式下具有宽的电压增益范围。非隔离双向转换器包括传统的两电平转换器和多电平转换器、Cuk/SePIC/Zeta 转换器、耦合电感器转换器、开关电容器和开关电感器转换器以及 Z 源和准 Z 源转换器。传统的两电平变换器在功率开关上具有高电压应力、窄电压增益范围, 并且它们的效率和动态响应受到功率开关的极端占空比的限制。

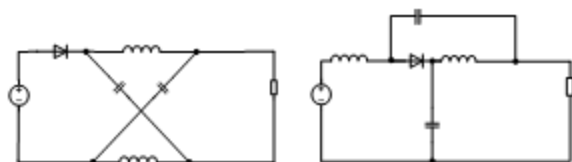


图 1 (a) Z 源变换器 (b) 准 Z 源变换器

Fig.1 (a) Z-source inverter (b) Quasi-Z-source inverter

文献[8]介绍了 Z 源网络最早由彭方正教授在 2004 年所提出, 如图 1(a)所示, 利用其独特的无源网络, 允许同一桥臂上管直通从而实现其升降压变换的功能, 提高了可靠性, 并且避免了由死区引起的输出波形畸变。因此 Z 源变换器在直流链电压大范围变换的领域得到了广泛的应用。交流调速系统、燃料电池供电系统、光伏和风电等分布式发电系统以微电网都有随负载和环境因素的变化输出

电压波动范围很大的共同特点,因此具有独特升降压特性的Z源网络在这些领域有着很广阔的应用价值。Z源网络为X型阻抗网络可应用于DC-DC、DC-AC、AC-AC中。Z源逆变器可以利用传统电压源逆变器不允许的直通状态来提升电压。利用其独特的无源网络,允许同一桥臂上管直通从而实现其升降压变换的功能,提高了可靠性,并且避免了由死区引起的输出波形畸变。因此Z源变换器在直流链电压大范围变换的领域得到了广泛的应用。交流调速系统、燃料电池供电系统、光伏和风电等分布式发电系统以微电网都有随负载和环境因素的变化输出电压波动范围很大的共同特点,因此具有独特升降压特性的Z源网络在这些领域有着很广阔的应用价值。Z源网络为X型阻抗网络可应用于DC-DC、DC-AC、AC-AC中。Z源逆变器可以利用传统电压源逆变器不允许的直通状态来提升电压。此外,还保留了降压电压反转能力。

为了解决上述问题,本文提出了一种可以双向导通并且可进行级联的准Z源型DC-DC变换器。在第一节中,介绍了所提出的变换器的拓扑结构和工作原理。在第二节中,分析了变换器的稳态特性。对所提出的变换器与其他DC-DC变换器进行了比较研究。第三节中进行了仿真验证。最后,在第四节中,对所提出的变换器进行了总结。

## 1 电路与工作原理

变换器实际电路往往存在各种的寄生参数,为了减小理论分析的难度,在电流连续工作模式下对所提出的变换器的工作条件做出以下假设:

- (1) 忽略该变换器的所有功率开关管以及其他电路元件的等效电阻对电路的影响。
- (2) 所有电容的容值都足够大。
- (3) 拓扑结构中的相对应的电感及电容分别相等。
- (4) 电路工作在电流连续导通模式(CCM)

### 1.1 电路结构

本文提出一种可以双向导通的级联型准Z源DC-DC变换器,该拓扑的结构如图2所示。该拓扑使用开关管结构对准Z源结构中的二极管进行替换,并且使用准Z源结构对电感进行替换,得到本文所提的双向导通级联型准Z源DC-DC变换器,如图2所示。该拓扑由3个电感、6个电容、4个开关组成。该拓扑电压具有比图1中的变换器更出色的升压效果,其增益为:

$$M = \frac{1}{(1-3D)} \quad (1)$$

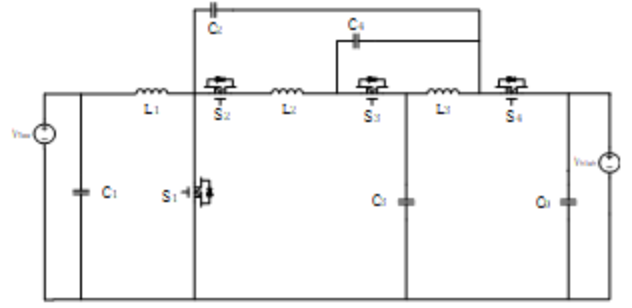


图2 级联型双向准Z源DC-DC变换器

Fig.2 Cascaded Bidirectional Quasi-Z-Source DC-DC Converter

### 1.2 电路结构

如图2所示,分析提议的变换器的工作原理和性能。如图2所示为所提出的双向DC-DC变换器的拓扑结构,其电路的主要构成:3个电感 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ ;5个电容 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ ;4个开关由 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 所构成。

非直通模式下电感电压可以表示为:

$$\begin{cases} V_{L1} = V_m - V_{c1} \\ V_{L2} = V_{c4} - V_{c2} = V_{c1} - V_{c3} \\ V_{L3} = -V_{c4} \end{cases} \quad (2)$$

直通模式下电感电压表示为:

$$\begin{cases} V_{L1} = V_m + V_{c2} \\ V_{L2} = V_{c4} - V_{c1} \\ V_{L3} = V_{c3} \end{cases} \quad (3)$$

直通和非直通状态的占空比分别 $DT_s$ 和 $(1-D)T_s$ ,电感器在一个开关周期内的平均电压为零:

$$V_{L1} = \int_t^{t+T} v_{L1} dt = 0 \quad (4)$$

$$V_{L2} = \int_t^{t+T} v_{L2} dt = 0 \quad (5)$$

$$V_{L3} = \int_t^{t+T} v_{L3} dt = 0 \quad (6)$$

通过(4)-(6)可得:

$$\begin{cases} V_{L1} = D(V_m + V_{c2}) + (1-D)(V_m - V_{c1}) = 0 \\ V_{L2} = D(V_{c4} + V_{c1}) + (1-D)(V_{c4} - V_{c2}) = 0 \\ V_{L3} = D(V_{c4} + V_{c1}) + (1-D)(V_{c4} - V_{c3}) = 0 \\ V_{L3} = DV_{c3} - (1-D)V_{c4} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解(7)解得 $V_{c1}$ 、 $V_{c2}$ 、 $V_{c3}$ 、 $V_{c4}$ 为:

$$V_{c1} = V_m \frac{1-2D}{1-3D} \quad (8)$$

$$V_{c1} = V_m \frac{2D}{1-3D} \quad (9)$$



$$V_{C1} = V_{in} \frac{1-D}{1-3D} \quad (10)$$

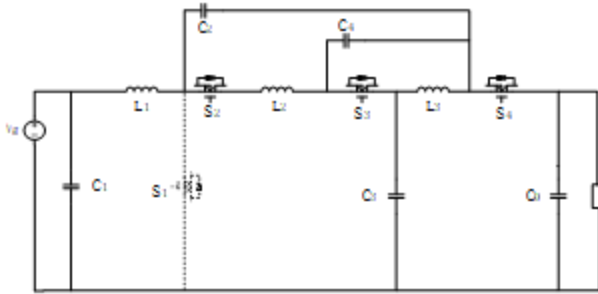
$$V_{C1} = V_{in} \frac{D}{1-3D} \quad (11)$$

最后得到输出电压为:

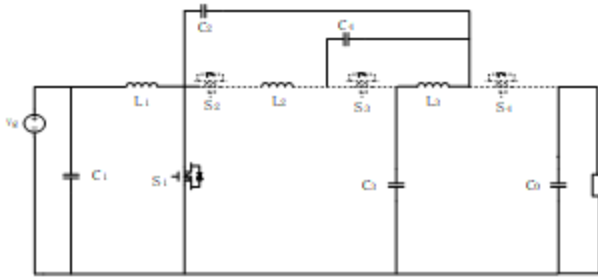
$$V_0 = V_{C1} + V_{C2} = V_{C3} + V_{C4} = V_{in} \frac{1}{1-3D} \quad (12)$$

当拓扑替换  $n$  次电感时, 输出电压为:

$$V_0 = V_{in} \frac{1}{1-(n+2)D} \quad (13)$$



(a) 模式 I



(b) 模式 II

图3 所提变换器工作模式

Fig.3 Equivalent circuits of step-up mode of the proposed converter

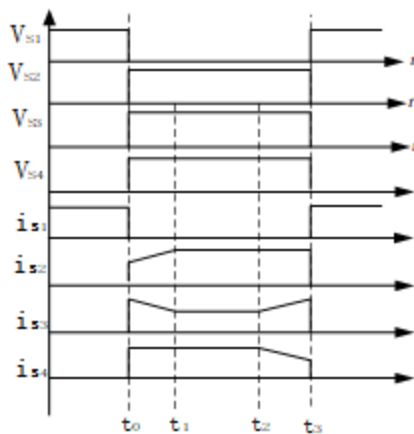


图4 变换器的模态波形

Fig.4 The characteristic waveform of the proposed

## 2 变换器性能分析

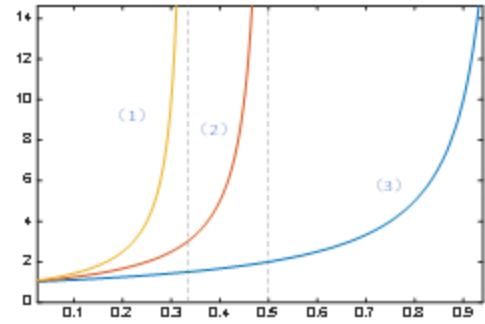


图5 电压增益的比较

Fig.5 Comparison of the voltage gain ratio

变换器可以通过多相扩展改善电压增益并减少开关应力既通过准 Z 源结构替换电感。替换次数越多则开关期间所担的压力越小 3 变换器性能分图 5 比较了升压模式下转换器的电压增益与占空比的关系。(1) 为本文提出的变换器 (2) 为文献[8]所提变换器 (3) 为 boost 变换器。由图可以看出, 在占空比 0~1/3 的范围内, 所提变换器的电压增益为 2~∞ 倍。与其他变换器相比, 所提出的变换器在升压状态下具有最高的电压增益。

## 3 仿真验证

表 1 仿真参数

| 参数                | 值     |
|-------------------|-------|
| 输出额定功率: $P_{max}$ | 1000W |
| 输入电压: $V_{in}$    | 20V   |
| 输出电压: $V_0$       | 50V   |
| 线路电容:             | 390μF |
| 电感:               | 240μH |
| 输出电容:             | 390μF |

为了验证所提出的 DC-DC 变换器的性能, 通过 PSIM 搭建仿真对提出的 DC-DC 变换器进行了仿真验证。开关频率为 100kHz, 占空比为 0.2, 输入电压为 10V, 测得输出电压为 25V。



图6 d=0.2时 (1) 输出电压 50V 和 (2) 输入电压 20V 波形

Fig 6 d=0.2, the waveform includes (1) an output

voltage of 120V and (2) an input voltage of 20V

由图7可得当输入电压为20V时,占空比由于本拓扑为交错并联型升压拓扑,元器件中电容 $C_1$ 起至关重要的作用, $C_1$ 进行充放电完成拓扑的升压任务,因此对其电容电压进行测验,承受电压为输出电压的一半与理论值相同。为0.2时输出电压为50V与理论值一致。

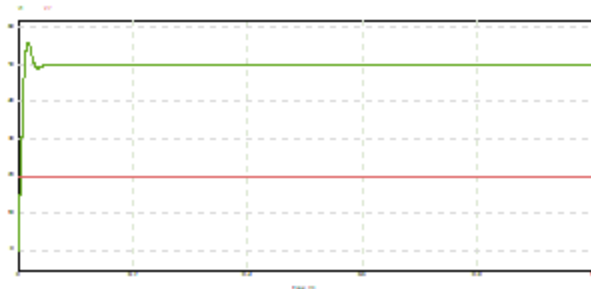


图7  $d=0.2$ 时(1)输出电压50V和(2)输入电压20V波形

Fig 7  $d=0.2$ , the waveform includes (1) an output voltage of 120V and (2) an input voltage of 20V

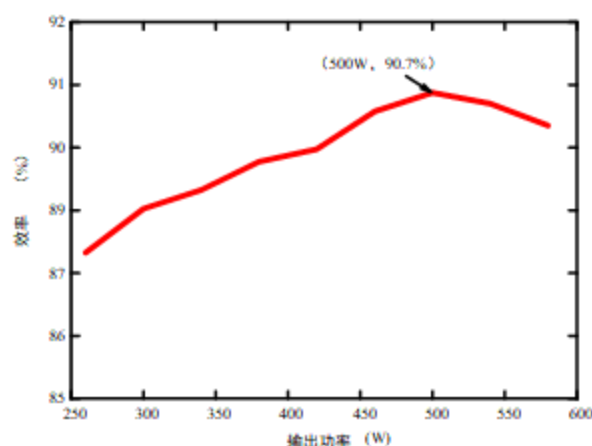


图8 所提拓扑的效率分析

Fig.8 Efficiency analysis of the proposed topology

当变换器工作在输入电压20V且升压比为2.5时,其整体转换效率在90%以上,并且效率随着功率的增加而增长。该转换器在高电压比下仍能保持高转换效率。转换器的损耗分布是在最大功率点下计算的,根据图8,计算效率为90.7%。

#### 4 结论

所提出的转换器具有以下优点:

- 1) 实现了高电压增益,允许根据实际应用选择扩展相数以获得更高的电压增益;
- 2) 低器件应力和所有开关器件相同的电压应力有助于器件选择;
- 3) 快速的动态响应和良好的动态性能;

#### 参考文献

- [1] M. A. Salvador, T. B. Lazzarin, and R. F. Coelho, "High Step-Up DC-DC Converter With Active Switched-Inductor and Passive Switched-Capacitor Networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 7, pp. 5644-5654, Jul. 2018.
- [2] Y. Zhang, Q. Liu, Y. Gao, J. Li, and M. Sumner, "Hybrid Switched-Capacitor/Switched-Quasi-Z-Source Bidirectional DC-DC Converter With a Wide Voltage Gain Range for Hybrid Energy Sources EVs," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 4, pp. 2680-2690, Jun. 2018.
- [3] D. F. Cortez, G. Waltrich, J. Fraigneaud, H. Miranda, and I. Barbi, "DC-DC Converter for Dual-Voltage Automotive Systems Based on Bidirectional Hybrid Switched-Capacitor Architectures," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3296-3304, May. 2015.
- [4] J. Chen, K. Ding, Y. Zhong, F. Deng, and S. Abulanwar, "A Double Input-parallel-output-series Hybrid Switched-capacitor Boost Converter," *Proceedings of the CSEE*, vol. 6, no. 4, pp. 15-27, Dec. 2020.
- [5] X. Zhu, B. Zhang and D. Qiu, "A New Nonisolated Quasi-Z-Source Inverter With High Voltage Gain," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 7, no. 3, pp. 2012-2028, Sept. 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2873805.
- [6] M. M. Haji-Esmaili, M. Naseri, H. Khoun-Jahan and M. Abapour, "Fault-Tolerant and Reliable Structure for a Cascaded Quasi-Z-Source DC-DC Converter," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 8, pp. 6455-6467, Aug. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2621411.
- [7] D. Vinnikov, I. Roasto, R. Strzelecki and M. Adamowicz, "Step-Up DC/DC Converters With Cascaded Quasi-Z-Source Network," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 10, pp. 3727-3736, Oct. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2178211.
- [8] Zhu Kai. A Study on an Improved High-Gain Switched Inductor Z-Source Inverter. 2021. China University of Mining and Technology, MA thesis. doi:10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.001669.
- [9] 35.08(2020):77-81+86.doi:10.19557/j.cnki.1001-9944.2020.08.016. Ma Yuhui, et al. High-Gain DC-DC Converter Operating in Four-Phase Interleaved Parallel. *Automation and Instrumentation*, 35.08 (2020): 77-81+86. doi:10.19557/j.cnki.1001-9944.2020.08.016.

收稿日期: 2013-07-04。

作者照片



作者简介: 王贝宁

姓名(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为高增益DC-DC变换器, E-mail: 2279982484@qq.com  
姓名(1977), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子变换器、无线充电技术和工业驱动器的设计和控制等, E-mail: zl@upc.edu.cn.

(编辑 五号楷体, 居右, 段前空 6pt)

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 724 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于频率跟踪技术的电动汽车无线充电系统研究

李阳, 张磊, 高春侠, 张宗阳, 王贝宁

(中国石油大学(华东) 新能源学院 青岛 266580)

## Research on wireless charging system for electric vehicles based on frequency tracking technology

Zhang Lei, Li Yang, Gao Chunxia, Zhang Zongyang, Wang Beining

(College of New Energy China University of Petroleum (East China) Qing Dao 266580 China)

**ABSTRACT:** Aiming at the wireless power transmission (WPT) system, the frequency splitting phenomenon generated when the position between the transmitting coil and the receiving coil is relatively shifted causes a shift in the optimal operating point of the system, which reduces the transmission performance of the system. In this paper, a transmission power optimization control technique with coupling coefficient identification is proposed, which is capable of monitoring the coupling coefficient between the transmitting and receiving coils in real time. However, the method used to recognize the coupling coefficient may cause a large error. On this basis, a frequency tracking technique based on fuzzy PI algorithm is proposed, and the experimental results show that the proposed frequency tracking technique has the advantages of higher output power and load stability, which verifies the feasibility and correctness of the proposed frequency tracking technique.

**KEY WORDS:** Wireless power transfer, frequency splitting, frequency tracking, finite element analysis

**摘要:** 针对无线电能传输(WPT)系统在发射线圈和接收线圈之间的位置发生相对偏移时产生的频率分裂现象造成的系统最佳工作点偏移,使系统传输性能降低的问题。本文提出了一种具有耦合系数辨识的传输功率优化控制技术,该方法能够实时监测收发线圈之间的耦合系数。但该方法用来识别耦合系数可能会造成很大的误差。在此基础上,提出了一种基于模糊PI算法的频率跟踪技术,试验结果表明所提出的频率跟踪技术具有较高输出功率和负载稳定性的优点,验证了所提出的频率跟踪技术的可行性与正确性。

**关键词:** 无线电能传输, 频率分裂, 频率跟踪, 有限元分析

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号(小五号 Times New Roman 字体加黑)

## 0 引言

当前世界各国均面临环境恶化及传统化石能源匮乏等问题。发展新能源汽车能有效减少环境污染和化石能源匮乏等问题,是国家的重大可持续发展

展战略。传统电动汽车有线充电方式面临线路老化、安全性差、接口限制等问题。而电动汽车无线充电技术具有安全性好、线路不易老化、不受接口限制、不占据地上空间等优势,近几年掀起了研究热潮<sup>[1-2]</sup>。而在实际应用场合中,电动汽车的发射线圈和接收线圈之间的相对位置会不可避免地发生偏移,使两线圈之间的耦合系数发生改变,造成无线电能传输系统最佳工作点偏移,产生频率分裂现象,使系统的传输性能降低<sup>[3-4]</sup>。对于最佳工作点对应的功率极大值发生分裂的问题,可采用频率跟踪技术改善<sup>[5]</sup>。

文献[6]通过分析原副边电压和电流的相位关系,提出了一种崭新的方法,利用PLL对WPT系统进行串联-串联结构补偿拓扑。相较于当前基于原边电压和电流的频率跟踪方法,该方法在特定互感和负载条件下能够持续追踪原始谐振频率,且在系统运行时不受分频谐振现象的干扰。另一方面,在文献[7]中,利用FPGA程序设计,提出了一种全数字锁相环的方法,并对锁相环的数学模型进行了分析。然而,该研究仅关注频率跟踪控制方式,而未深入探讨频率跟踪范围,也未提供相关程序以确保系统零电压电路软开关的实现。

本文首先对频率分裂的原理进行数学上的分析,得到理论上的三个谐振角频率点。其次,通过建立系统收发线圈的有限元模型,验证了理论分析的正确性,并得到了频率分裂对传输性能的影响。最后,同时考虑在线圈偏移和负载变化的情况,提出了一种基于模糊PI算法的频率跟踪方法,能够在线圈偏移及负载变化的情况下使系统维持谐振状态,使负载电压稳定并获得高输出功率,并验证了其有效性。

## 1 频率分裂原理分析

本文研究的无线电能传输系统由直流电源、逆变桥、补偿拓扑、收发线圈、整流桥、负载组成。其中两侧的补偿拓扑均选用较稳定的串联型（SS）拓扑。其等效电路图如图1所示。

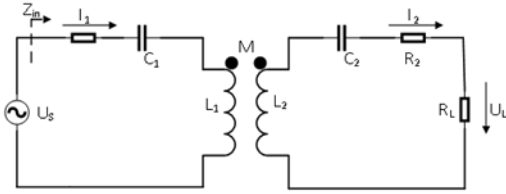


图1 S-S型互感模型

Fig.1 S-S Mutual Inductance Model

假设收发线圈两侧的固有参数完全相同，即  $L_1 = L_2 = L$ ,  $C_1 = C_2 = C$ ,  $R_1 = R_2 = R$ 。设一次侧和二次侧的电抗为  $X = \omega L - 1/\omega C$ 。定义参数如下：耦合因数为  $K_M = \omega M/R$ ，负荷比为  $K_L = R_L/R$ ，失谐比为  $\xi = X/R$ 。

$$\begin{cases} Z_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 - \dot{U}_s = 0 \\ Z_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由于负载功率与负载电压成正相关，因此对负载功率曲线图中频率分裂点的研究可转为对负载电压的研究。

负载电压  $U_L$  模值为：

$$|\dot{U}_L| = |\dot{I}_2 R_L| = \frac{K_M K_L |\dot{U}_s|}{|(1 + j\xi)^2 + (1 + j\xi)K_L + K_M^2|} \quad (2)$$

因  $\xi$  定义为失谐比，故对负载电压模值求关于  $\xi$  的偏导数，并令之为 0，即可解得频率分裂后的谐振角频率点。可得：

$$\frac{\partial |\dot{U}_L|}{\partial \xi} = D \cdot E \cdot F = 0 \quad (3)$$

对方程进行整理并解得关于  $\xi$  的表达式如下：

$$2\xi^3 + \xi(2 - 2K_M^2 + 2K_L + K_L^2) = 0 \quad (4)$$

由上式可解得三个谐振角频率为：

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \\ \omega_{2,3} = \sqrt{\frac{-H \pm \sqrt{H^2 - 4GP}}{2G}} \end{cases} \quad (5)$$

其中， $G, H, P$  分别为：

$$\begin{cases} G = (L^2 - M^2)C^2 \\ H = C^2 \left( RR_L + \frac{1}{2}R_L^2 + R^2 - \frac{2L}{C} \right) \\ P = 1 \end{cases} \quad (6)$$

令  $\Delta = H^2 - 4GP$ ，当  $\Delta \leq 0$  时，有且仅有一个谐振角频率  $\omega_1$  使得  $P_{out}$  取得极大值；当  $\Delta > 0$  时，有三个谐振角频率使得  $P_{out}$  取得极值， $\omega_1$  使  $P_{out}$  取极小值， $\omega_2$  和  $\omega_3$  使  $P_{out}$  取得极大值。此现象即为频率分裂。

求解  $\Delta = 0$ ，可知当耦合系数大于临界耦合系数  $K_0$  时，存在三个谐振角频率：

$$\begin{cases} K_0 = \sqrt{\frac{4LCR_L^2 - C^2 R_L^4}{4L^2}} \\ K > K_0 \end{cases} \quad (7)$$

此外，当  $K = K_0$  时为临界耦合状态， $K < K_0$  时为欠耦合状态。

## 2 频率分裂对系统传输性能的影响分析

通过建立表1所示参数的有限元模型验证上述理论分析的正确性及频率分裂对传输性能的影响。

表1 有限元仿真参数设置

| Tab1. Parameters of two magnetic couplers |              |
|-------------------------------------------|--------------|
| 参数                                        | 数值           |
| $L_1$ ( $L_2$ )                           | 120 $\mu$ H  |
| $C_1$ ( $C_2$ )                           | 20nF         |
| $R_1$ ( $R_2$ )                           | 0.1 $\Omega$ |
| $R_L$                                     | 10 $\Omega$  |
| $U_{DC}$                                  | 100V         |
| $K$                                       | 0-1          |
| $f_0$                                     | 85kHz        |
| 线径                                        | 2mm          |
| 匝数                                        | 10 匝         |

在有限元软件中按照上述参数建立发射线圈和接收线圈的三维有限元模型如图2所示，当收发线圈之间的距离位于过耦合区域时，得到如图3所示的功率曲线图。

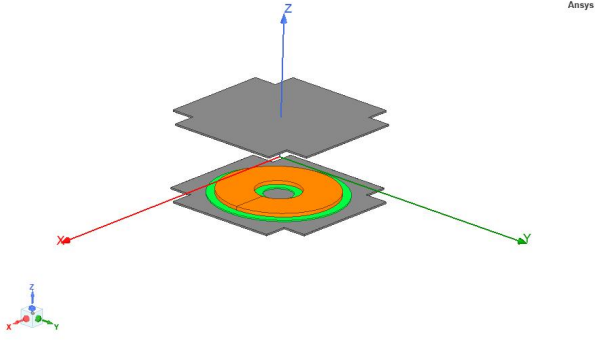


图2 三维有限元模型图

Fig.2 3D finite element model diagram

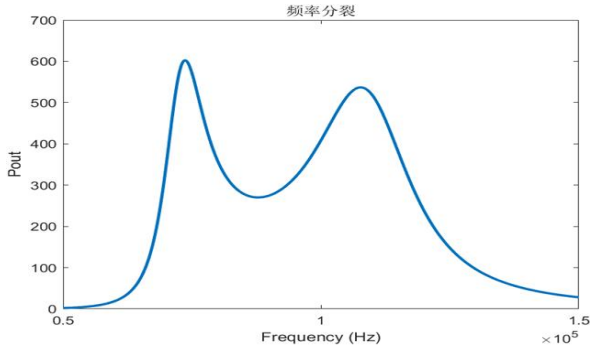


图3 频率分裂现象示意图

Fig.3 Schematic diagram of the frequency splitting phenomenon

由图3可得,在原谐振频率处的功率变为极小值,在原谐振频率两侧各出现一个功率极大值点。

通过取不同的耦合系数值(偏移距离),得到系统负载功率随耦合系数及系统频率的关系曲线如图4所示。

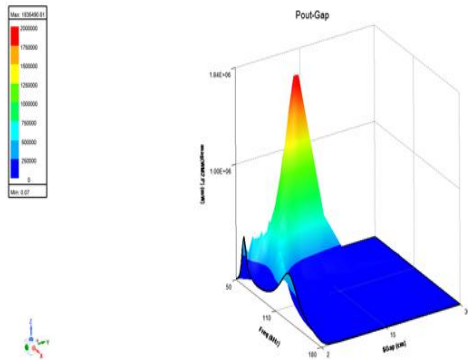


图4 不同耦合系数下负载功率曲线图

Fig.4 Load power profile with different coupling factors

由图4可知仿真结果中Pout的极大值所对应的谐振频率点与理论计算结果基本一致。当系统工作频率为 $f_2$ 或 $f_3$ 时,有且仅有 $K > K_0$ 时Pout最大。当系统频率为 $f_1$ 时,若 $K < K_0$ ,则Pout随K的增大而增大;当 $K = K_0$ 时,Pout有最大值;当 $K > K_0$ 时,Pout随K的增大而减小。

可得结论:无线充电系统在过耦合、临界耦合

工作状态下输出功率在谐振点处达到峰值,然而在欠耦合工作状态下输出功率在唯一谐振点处始终达不到前述峰值,且会因耦合系数的变化而不同。当无线充电系统发生频率分裂时,将工作频率由固有角频率 $\omega_1$ 调整到分裂角频率 $\omega_{2,3}$ ,可保证输出功率始终为最大值。以上分析结果可为无线充电系统频率分裂的传输性能优化提供理论指导。

### 3 应用于无线电能传输的频率跟踪策略

#### 3.1 基于耦合系数辨识的频率跟踪策略

根据公式(7),若要对频率分裂进行抑制,就需要系统具备监测线圈间耦合系数大小的功能。如图5所示为基于耦合系数辨识的WPT系统。主要由主电路、耦合系数辨识电路、临界耦合系数计算模块、分裂频率计算模块、最大功率跟踪电路组成。

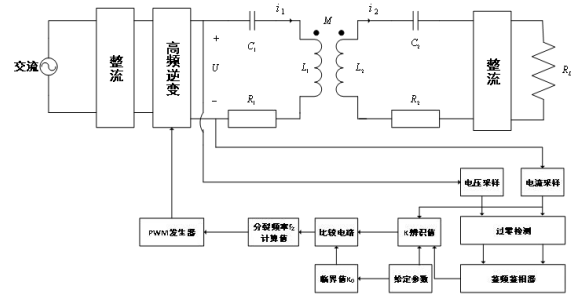


图5 基于耦合系数辨识的调频仿真模型

Fig.5 FM simulation model based on coupling coefficient identification

由上一节可得输入阻抗 $Z_{in}$ 为:

$$Z_{in} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{(\omega M)^2}{R_2 + R_L + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \quad (8)$$

对输入阻抗 $Z_{in}$ 进行整理可得其实部,虚部分为:

$$\begin{cases} R_{in} = R_1 + \frac{(\omega M)^2 (R_L + R_2)}{(R_L + R_2)^2 + X_1^2} \\ X_{in} = X_1 - \frac{(\omega M)^2 X_2}{(R_L + R_2)^2 + X_2^2} \end{cases} \quad (9)$$

由耦合系数的定义式及公式(13)得耦合系数K得表达式:

$$K = \frac{1}{\omega \sqrt{L_1 L_2}} \sqrt{\frac{[R_{in} - R_1] [(R_L + R_2)^2 + X_1^2]}{R_L + R_2}} \quad (10)$$

即通过公式(10)中的 $R_{in}$ 即可求得耦合系数K。 $R_{in}$ 的表达式还可表示为:

$$R_{in} = \frac{\dot{U}_s}{\dot{I}_1} \cos \psi \quad (11)$$

即  $R_{in}$  可由一次侧电流幅值及逆变器输出电压和电流的相位差求得。因此通过检测一次侧逆变器输出电流  $I_1$  的幅值,利用鉴相器检测出一次侧逆变器输出电压电流的相位差,再由公式(10)可求出耦合系数  $K$ ,完成耦合系数辨识。

但是由公式(8)可得:

$$\frac{(\omega M)^2}{Z_{in} - Z_1} = R_L + R_2 + jX_2 \quad (12)$$

当系统频率接近系统固有频率时,得到:

$$(\omega M)^2 = \frac{X_2}{\text{Im}(Z_{in} - Z_1)} \approx \frac{0}{0} \quad (13)$$

由公式(13)可知,此时公式为未定式,在求解耦合系数时可能出现无法求解的情况。

因此,用该方法识别耦合系数可能会造成较大的误差,甚至会出现无法求解的问题。且由图5可较直观看出该方法所需的功能模块较多,结构较复杂。因此需要一种可靠性高,所需功能模块较少的算法。

### 3.2 基于模糊 PI 算法的频率跟踪策略

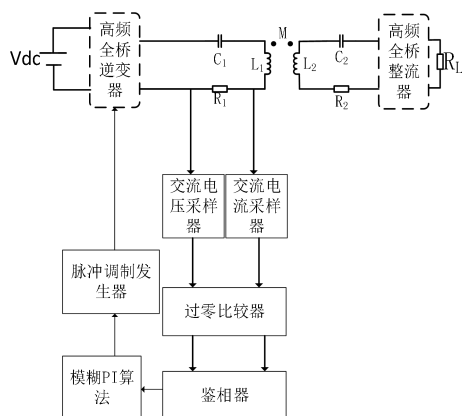


图6 基于模糊 PI 算法的频率跟踪原理图

Fig.6 Schematic diagram of frequency tracking based on fuzzy PI algorithm

如图6所示为基于模糊PI算法的频率跟踪原理框图,可以看到与基于耦合系数辨识的原理框图相比,其所需的功能模块大大减少。同时,模糊PI算法能够克服普通PI无法动态调节的缺点,可以提高控制的速度,减少控制过程中产生的超调,可靠性高,如图7所示。

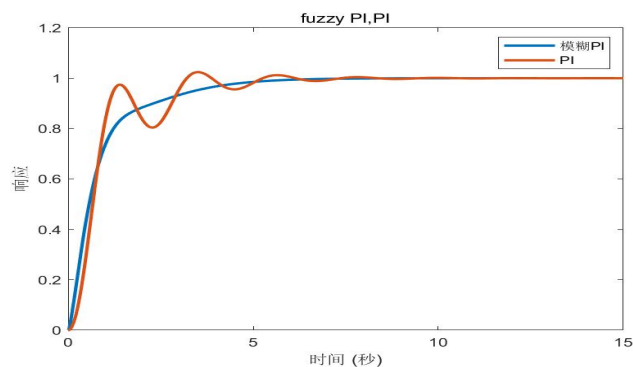


图7 普通PI和模糊PI的比较

Fig.7 Comparison of Normal PI and Fuzzy PI

模糊PI通过模糊规则来动态调整PI参数,其基本原理如图8所示。

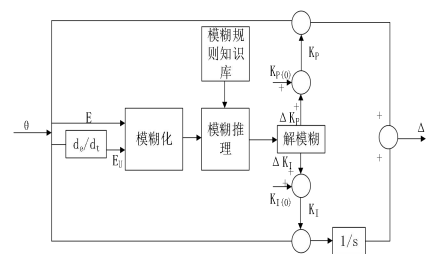


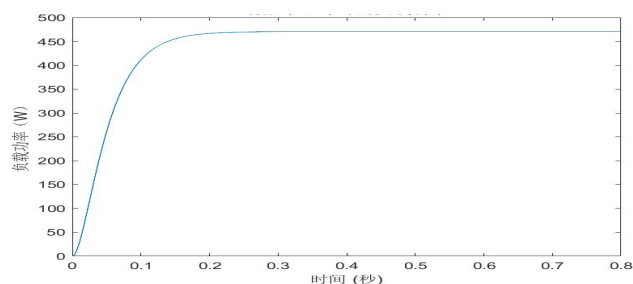
图8 模糊 PI 算法原理图

Fig.8 Fuzzy PI algorithm schematic

首先将逆变器输出电压电流之间的相位差输入,得到系统输入相位偏差  $E$  与相位偏差变化率  $EU$ ,再将二者模糊化,由模糊规则库求解模糊化后获得精确量,最后通过解模糊得到输出量。其中  $K_p(0)$  和  $K_i(0)$  为比例调节和积分调节的初始值,  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  为模糊PI算法输出的变化量,通过不断控制两个变化量在一定范围内变化,对  $K_p(0)$  和  $K_i(0)$  进行优化。

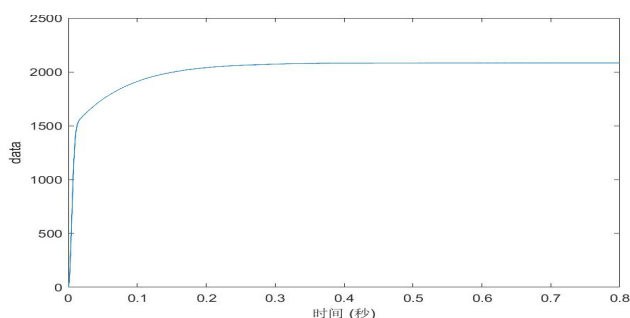
## 4 仿真分析

系统固有谐振频率定为85kHz,收发线圈之间发生偏移,系统最佳工作点偏移到分裂频率62kHz。系统未采取频率跟踪,采取频率跟踪后的负载功率曲线图如图9所示。



(a) 失谐时的负载功率





(b) 频率跟踪后的负载功率

图9 负载功率曲线图

Fig.9 Load Power Graph

可以看出发生频率分裂时,系统原谐振点处负载功率较低;采取频率跟踪控制及负载稳定性控制后,系统在调整后的频率处功率大大提高,相比之下系统的动态性能提升了很多,且起动时间更短。

系统负载发生变化时的输出电压波形图如图10所示。

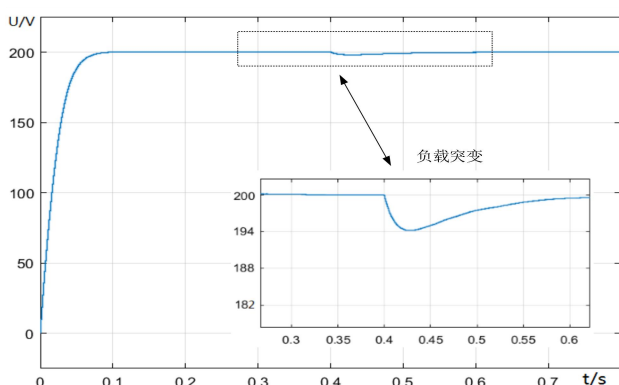


图10 负载变化时输出电压波形图

Fig.10 Output voltage waveform during load change

系统在0.4s时对负载进行切换,可以看到输出电压可以稳定的保持在200V,且在负载切换时输出也能很快恢复设定值。

系统逆变器输出电压与输出电流的相位关系如图11所示。

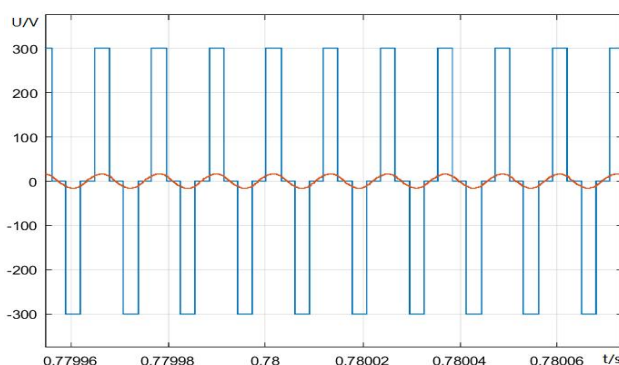


图11 逆变器输出电压和输出电流曲线图

Fig.11 Inverter Output Voltage and Output Current

Graphs

可以看出,无频率跟踪时系统处于失谐;有频率跟踪时,全桥逆变电路的输出电压和输出电流同相位,系统达到谐振状态。

## 5 结论

本文对电动汽车无线充电系统的频率分裂现象进行了研究,针对发生频率分裂时采用传统的耦合系数辨识策略的不足,提出了一种基于模糊PI算法的频率跟踪技术,有效的提高了频率分裂时的负载端输出功率,使系统稳定在谐振状态,使负载端的输出电压保持稳定。

## 参考文献

- [1] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(03): 1-13+21.
- [2] 赵争鸣,刘方,陈凯楠.电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报,2016,31(20):30-40.
- [3] Huang C, James J E, Covic G A. Design considerations for variable coupling lumped coil systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 680 — 689.
- [4] Lim Y, Tang H, Lim S, et al. An adaptive impedance-matching network based on a novel capacitor matrix for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4403 — 4413.
- [5] Diekhans T, Doncker R W D. A dual-side controlled inductive power transfer system optimized for large coupling factor variations and partial load [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6320 — 6328.
- [6] Liu S, Shen Y, Wu Y, et al. Study on frequency tracking for wireless power transfer system using magnetic resonant coupling[C]. 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2018:2569-2572.
- [7] 刘帼巾,李义鑫,崔玉龙.基于FPGA的磁耦合谐振式无线电能传输频率跟踪控制[J].电工技术学报, 2018, 33(14): 3185.

收稿日期: 2013-07-04。

作者简介:

李阳 2000 年生,男,硕士研究生,研究方向为无线充电技术, E-mail: 2576296423@qq.com;

张磊 1977 年生,男,副教授,硕士生导师,研究方向为电力电子转换器、无线充电技术和工业驱动器的设计和控制等, E-mail: zl@upc.edu.cn。

作者照片



作者姓名

李阳

# 基于故障电流旁路的混合式直流断路器

肖少典<sup>1</sup>, 刘增<sup>1</sup>, 杨亚超<sup>2</sup>, 江亚群<sup>1</sup>, 黄纯<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082;

2. 湖南工程学院电气与信息工程学院, 湖南省 湘潭市 411104)

## Fault Current Bypass-Based Hybrid DC Circuit Breakers

XIAO Shaodian<sup>1</sup>, LIU Zeng<sup>1</sup>, YANG Yachao<sup>2</sup>, JIANG Yaqun<sup>1</sup>, HUANG Chun<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

**ABSTRACT:** Hybrid DC circuit breaker (HCB) is an important equipment for rapid fault protection of DC power grid. However, existing hybrid DC circuit breakers still have issues such as slow fault section isolation speed and large conduction loss. To address these issues, this paper proposes a fault bypass current based HCB (Fault Current Bypass-based HCB, B-HCB), which transfers the fault current by constructing bypass branches, avoiding the continuous flow of fault current through the fault section during the fault breaking process, thereby achieving rapid isolation of the fault section. Moreover, The B-HCB uses active coupling injection to carry out fault current commutation, and the flow path does not contain power devices, thereby achieving ultra-low on-state losses. In addition, using diode clamps, arcless breaking of the mechanical switches can be achieved. In this paper, the working principle and parameter design of B-HCB are proposed and its superiority is verified based on PSCAD/EMTDC simulation.

**KEY WORDS:** DC current breaking, hybrid circuit breaker, fault current bypass-based, fast fault isolation, low conduction loss

**摘要:** 混合式直流断路器是直流电网实现故障快速保护的重要装备, 但现有混合式直流断路器存在故障区段隔离速度慢和导通损耗大的问题。本文提出了一种基于故障电流旁路的混合式直流断路器 (Fault Current Bypass-based HCB, B-HCB), 其通过构建旁路支路来转移故障电流, 避免故障开断期间故障电流持续流经故障部分, 从而实现故障区段的快速隔离。该 B-HCB 采用有源耦合注入的方式来进行故障电流

换流, 通流路径中不含功率器件, 从而实现了超低导通损耗。此外, 该断路器利用二极管钳位, 可实现机械开关的无弧开断。本文给出了所提断路器的工作原理以及参数设计, 并基于 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提 B-HCB 的优越性。

**关键词:** 直流电流开断; 混合式断路器; 故障电流旁路; 快速故障区段隔离; 低导通损耗

**DOI:** 论文序号

## 0 引言

目前, 随着电力系统远距离输电需求增多, 直流输电因具有电能损耗低、稳定性高和控制简单等优点, 发展前景十分广阔<sup>[1-3]</sup>。与交流系统不同的是, 当直流系统发生短路故障时, 故障电流上升迅速并且缺乏自然过零点<sup>[4-5]</sup>。特别是中高压直流系统通常呈现低惯性、弱阻尼的特性, 发生故障后仅需几毫秒, 故障电流就会超过额定值的数十倍<sup>[6-8]</sup>, 要求直流断路器 (DC Circuit Breaker, DCCB) 能够快速隔离故障电流, 保障了直流系统的安全稳定运行。

直流输电线路中所常用的直流断路器主要分为机械式断路器 (Mechanical Circuit Breaker, MCB)、固态式断路器 (Solid-State Circuit Breaker, SSCB) 以及混合式断路器 (Hybrid DC Circuit Breaker, HCB)。MCB 拓扑中机械开关的开断过程中伴随着电弧的产生, 这不仅使机械开关开断时间过长, 而且还会缩短机械开关的使用寿命<sup>[9]</sup>。SSCB 拓扑中电力电子器件的耐压能力有限, 多适用于中低压网络<sup>[10]</sup>。HCB 结合了机械式断路器导通损耗低和固态式断路器断故障速度快的优点<sup>[11-13]</sup>, 成为当前直流断路器研究的重点。

目前, 国内外学者对混合式直流断路器进行了

**基金项目:** 湖南省科技创新重大专项(2020GK1010); 湖南省教育厅优秀青年项目(21B0671)。

Project Supported by Major Project of Scientific Innovation of Hunan Province (2020GK1010); Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of Hunan Province (21B0671).

大量研究。ABB 公司生产的 320kV/2kA HCB 通过在通流路径中添加负载转换开关 (Load Commutation Switch, LCS) 来加速故障电流换向过程<sup>[14]</sup>。文献[15]提出了基于电容换流的混合式直流断路器, 通过电容反向充电及阻感支路来有效抑制故障电流的增长。文献[16-17]通过耦合电感辅助故障电流转移, 能够限制故障电流上升速度并加速电流换向。文献[18]提出一种新型晶闸管型混合式直流断路器, 其拓扑结构借助电容支路以加速故障电流换向过程。文献[19-20]在混合直流断路器拓扑中添加故障限流器, 通过在避雷器切断故障电流时旁路限流电感, 有效缩短了故障区段隔离时间。上述文献所提 HCB 一定程度上限制了故障电流的增长, 并提升了故障电流的换流速度。但是故障电流换流过程均为并联型<sup>[21]</sup>, 导致整个开断过程中总故障电流仍在增长并且持续流经故障区段, 若不能及时隔离故障区段, 将导致电力电子装置在过流状态下损坏 (见图 1)。另外, 上述文献所提 HCB 在主支路中加入 LCS 以实现快速故障换流, 但 LCS 的导通损耗大且需要为其安装昂贵的散热装置<sup>[22-24]</sup>。为此, 文献[25-26]提出了基于故障电流旁路的 SSCB (Fault Current Bypass-based SSCB, B-SSCB), 其通过提供一条旁路通路, 防止故障电流持续流经故障区段, 有效解决了故障区段隔离慢的问题。但其可靠运行仍依赖功率器件的快速阻断, 导通损耗大的局限性仍然存在。

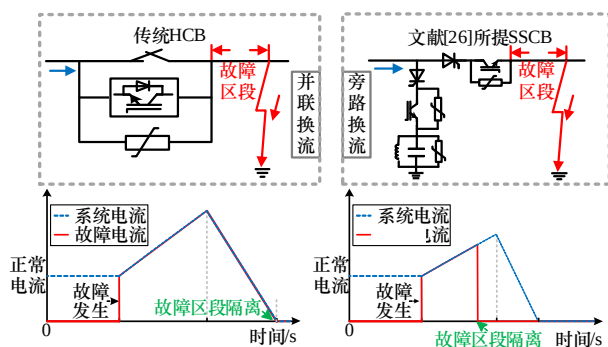


图 1 不同类型 HCB 故障区段隔离速度对比图

Fig.1 Comparison chart of isolation speed of different types of HCB fault sections

针对现有 HCB 故障区段隔离速度慢和导通损耗大的问题, 本文提出了一种基于故障电流旁路的混合式直流断路器 (Fault Current Bypass-based HCB, B-HCB), 其通过旁路支路转移故障电流, 可有效避免因故障电流持续流经故障区段而引起的电力电子装置过流损坏。同时, 该断路器通过基于晶闸管的有源耦合注入的方式来实现故障电流

的快速换向, 加快了故障区段的隔离速度。另外, 该断路器的通流路径中仅包括低阻机械开关和金属线, 大大降低了其导通损耗, 并利用二极管钳位, 成功实现了机械开关的无弧开断。

## 1 所提 B-HCB 拓扑及工作原理

### 1.1 拓扑介绍

本文所提 B-HCB 拓扑结构如图 2 所示, 其包括通流支路、旁路支路以及电压注入回路。通流支路由机械开关  $S_1$ 、二极管  $D_1$ 、耦合电感  $T$  的次级绕组  $L_{22}$ 、系统侧电感  $L_1$  和限流电感  $L_3$  构成, 其通过二极管钳位, 实现了机械开关的无弧开断。旁路支路由晶闸管  $Q_2$  和缓冲电容  $C_2$  组成, 当晶闸管  $Q_2$  导通时, 断路器能够迅速将故障电流旁路, 实现故障区段的快速隔离。同时, 为防止旁路支路发生短路故障, 引入缓冲电容  $C_2$ 。

电压注入回路则由晶闸管  $Q_1$ 、二极管  $D_2$ 、预充电电容  $C_1$ 、耦合电感  $T$  的初级绕组  $L_{21}$  和电阻  $R_1$  组成。其通过预充电电容  $C_1$  对耦合电感进行放电, 在通流支路中形成注入电压  $U_{vi}$ 。这迫使故障电流转移到旁路支路, 实现了故障区段的快速隔离, 同时也实现了机械开关的无弧开断。

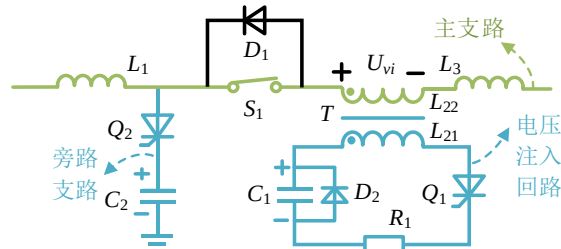


图 2 所提出的 B-HCB 的拓扑结构

Fig.2 The topology of the proposed B-HCB

### 1.2 启动操作

当断路器开断过程结束后,  $C_2$  储存了大量能量, 而预充电电容  $C_1$  储存的能量被耗散。对于所提出的 B-HCB, 实现快速重合闸的关键是将旁路支路和电压注入回路中的电容器电压在短时间内恢复到初始状态, 即启动操作。

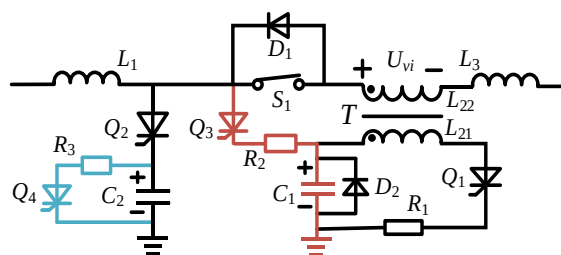


图 3 所提出的 B-HCB 的启动操作

Fig.3 Start-up operation of the proposed B-HCB

所提出的 B-HCB 的启动操作方案如图 2 所示,  $Q_3$  和  $Q_4$  是晶闸管,  $R_2$  和  $R_3$  是电阻器。通过开启  $Q_4$ ,  $C_2$  中存储的能量可以通过  $R_3$  快速耗散。通过开启  $Q_3$ ,  $C_1$  可以快速预充电至直流系统电压。另外,  $Q_3$  和  $Q_4$  可以在充放电过程完成后自动关闭。也就是说, 旁路支路和电压注入回路中电容器的电压无需复杂过程即可恢复到初始状态。因此, 所提

出的 B-HCB 在无需额外预充电电源的同时保证了其可靠的快速重合闸能力。

### 1.3 工作流程

本文所提 B-HCB 开断故障电流的概念波形和工作模式分别如图 4 和图 5 所示。初始状态下,  $C_1$  有预充电电压,  $C_2$  电压为零。断路器的详细工作流程如下所示。

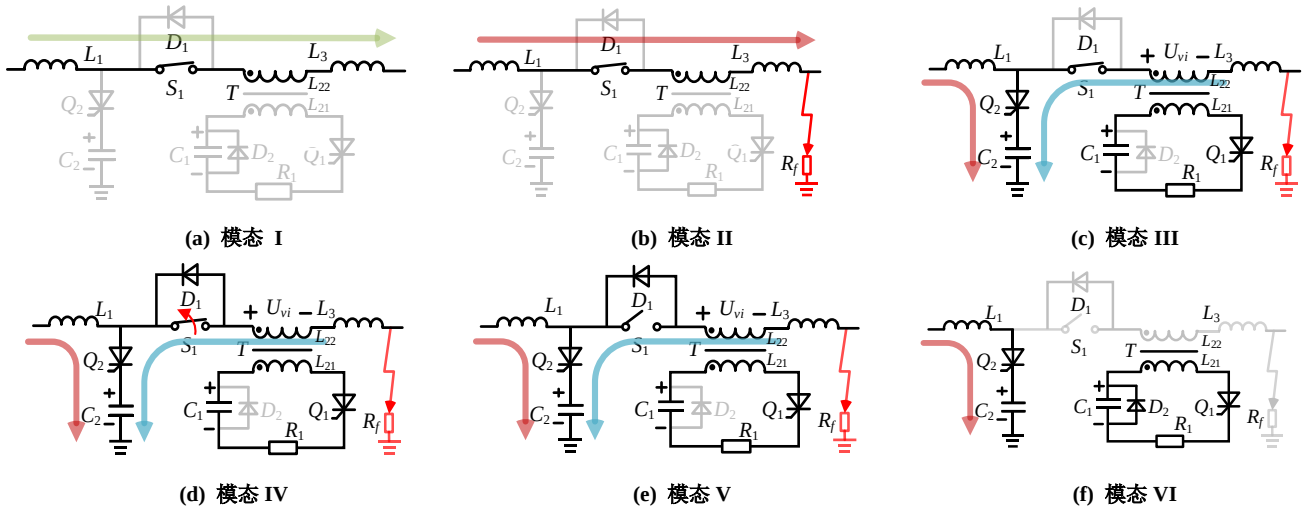


图 4 所提出的 B-HCB 开断故障电流的运行模式

Fig.4 Operating modes of the proposed B-HCB beaking fault current

#### 1) 正常通流阶段 ( $0 \leq t < t_1$ )

如图 4(a)所示, 所提出的 B-HCB 处于正常导通状态, 通流路径仅包括低阻抗机械开关和金属绕组线(耦合电感  $T$  的次级绕组), 因此所提 B-HCB 可以实现低导通损耗。

#### 2) 故障检测阶段 ( $t_1 \leq t < t_2$ )

在  $t=t_1$  时故障发生(见图 5), 故障电流在极短时间内迅速增大, 此时断路器未收到动作命令, 开关  $S_1$  闭合, 晶闸管  $Q_1$ 、 $Q_2$  未导通。

#### 3) 故障电流旁路阶段 ( $t_2 \leq t < t_3$ )

在  $t=t_2$  时刻, 故障电流达到保护阈值,  $Q_1$ 、 $Q_2$  同时导通(见图 4(c)), 电压注入回路的注入电压  $U_{vi}$  迫使故障电流快速降为零并反向流至旁路支路, 确保及时切断故障电流, 以此来实现故障区段的快速隔离。

#### 4) 二极管钳位阶段 ( $t_3 \leq t < t_4$ )

在  $t=t_3$  时刻, 故障电流  $I_m$  减小至零并产生反向电流, 二极管  $D_1$  导通, 为机械开关的无弧开断创造条件。同时电压注入回路中, 放电电阻  $R_1$  分压逐渐上升, 耦合电感产生的注入电压  $U_{vi}$  下降速率加快, 从而使  $I_m$  流经  $D_1$  的反向电流峰值不会超过反向最大允许电流。

#### 5) 无弧开断阶段 ( $t_4 \leq t < t_5$ )

在  $t=t_4$  时刻, 机械开关  $S_1$  打开, 反向电流自动从  $S_1$  全部转移到二极管  $D_1$ (见图 4(d))。由于二极管的钳位, 机械开关在分闸期间电压为零, 从而实现断路器无弧开断。另外, 二极管的钳位有助于机械开关的绝缘恢复。 $S_1$  打开后的工作模式如图 4(e) 所示。

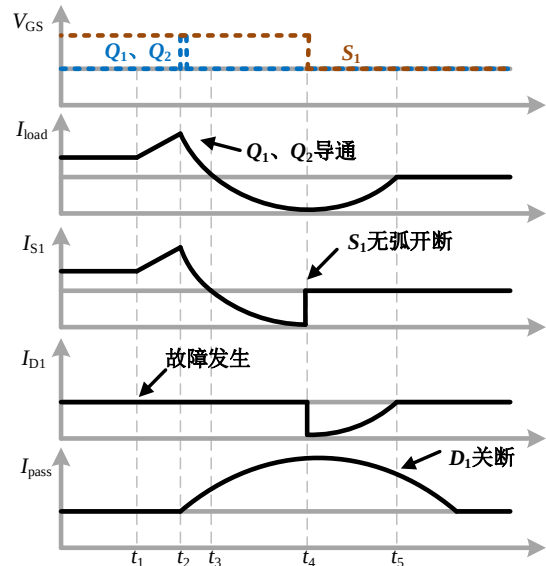


图 5 所提出的 B-HCB 开断故障电流的概念波形  
Fig.5 Conceptual waveforms of the proposed B-HCB beaking fault current

#### 6) 故障区段隔离阶段 ( $t_5 \leq t$ )

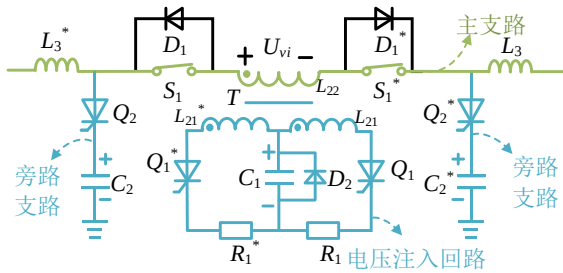


在  $t=t_5$  时刻, 流经二极管  $D_1$  的电流降至零, 故障部分电路自动切断(见图 4(f))。随后, 旁路支路  $I_{\text{pass}}$  的电流减小为零, 晶闸管  $Q_1$  正向阻断, 旁路支路也将自动截止。

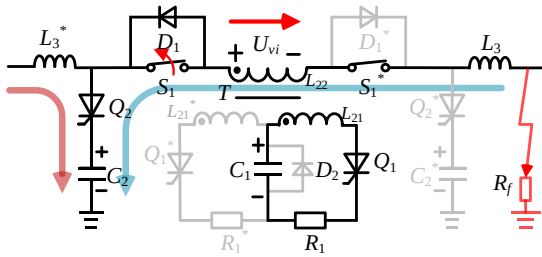
#### 1.4 双向 B-HCB

为了提高 B-HCB 的工程实用性, 所提出的 B-HCB 必须具备双向开断电流的能力, 即如图 6 所示, 包括正向和反向电流旁路回路。双向 B-HCB 充分利用了包含电容器  $C_1$ 、耦合电感  $T$  和电阻  $R_1$  的电压注入回路。

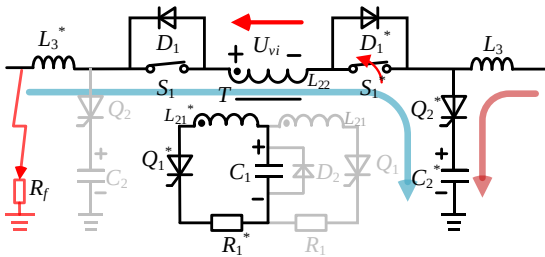
双向 B-HCB 的开断过程与单向相似, 正常工作时, 开关  $S_1$  和  $S_1^*$  处于通流状态。若如图 6(b)所示, 主支路故障电流方向与二极管  $D_1$  的导通方向相反时, 晶闸管  $Q_1$ 、 $Q_2$  将会在收到开断指令信号后导通, 关断开关  $S_1$ 。若如图 6(c)所示, 主支路故障电流方向与二极管  $D_1^*$  导通方向相反时, 则开关  $S_1^*$ 、晶闸管  $Q_1^*$ 、 $Q_2^*$  则会在收到开断信号后动作。



(a) 双向拓扑



(b) 正向电流开断模式 IV (电流从左到右)



(c) 反向电流开断模式 IV (电流从右向左)

图 6 双向拓扑结构和工作原理

Fig.6 Bi-directional topology and the operating principle

#### 2.1 关键问题

所提 B-HCB 的参数设计关键为: 隔离故障区段所需时间以及机械开关是否能无弧开断。

##### 1) 故障区段隔离时间

在故障电流旁路阶段, 形成了如图 4(c)所示的  $C_2$ - $Q_2$ - $S_1$ - $L_{22}$ - $L_3$  回路和  $C_1$ - $Q_1$ - $L_{21}$ - $R_1$  回路。根据 KVL 定律, 得到下列回路方程组

$$\begin{cases} U_2(t) = U_{vi}(t) + L_3 \frac{di_1(t)}{dt} \\ U_{vi}(t) = L_{22} \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_3(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $U_{vi}(t)$  为耦合电感  $T$  注入电压,  $M$  为耦合电感的互感系数。  $i_1(t)$  为主支路电流,  $i_3(t)$  为流经预充电容  $C_1$  的电流,  $U_2(t)$  为旁路电容  $C_2$  两端电压。

由于该阶段的持续时间短, 为简化参数设计, 可将  $U_{vi}(t)$  近似当作初始注入电压  $U_{vi}$ 。因此故障区段隔离时间  $T_{iso}$  (故障电流下降至零的所需时间) 可为

$$T_{iso} = \frac{I_{th} L_3}{U_{vi}} \quad (2)$$

根据式(2)可知, 故障区段隔离时间与初始注入电压  $U_{vi}$ 、限流电感  $L_3$  和故障电流保护阈值  $I_{th}$  相关。

##### 2) 机械开关动作窗口时间

所提 B-HCB 在开断故障期间,  $U_{vi}$  不断减小 ( $U_{C1}$  下降,  $U_{vi}$  与  $U_{C1}$  成正比), 而  $U_{C2}$  不断上升。其实现机械开关无弧开断的关键在于确保流过机械开关  $S_1$  的反向电流的持续时间大于  $S_1$  的开关响应时间  $t_q$ 。假设 B-HCB 动作时间点为零, 则只需要在  $t_q$  时刻满足  $i_1(t_q) < 0$  即可实现无弧开断。

#### 2.2 参数设计

通过前文对所提 B-HCB 的工作原理分析可知, 断路器拓扑结构中旁路电容  $C_2$  和电压注入回路的预充电容  $C_1$  以及放电电阻  $R_1$  是关键元器件, 其参数将决定故障区段隔离速度及晶闸管的过流大小。因此, 本节在系统电感  $L_1$  的左侧接入额定电压为  $U_{dc}$  的直流系统来进行电容  $C_1$ 、 $C_2$  与电阻  $R_1$  等器件的参数设计。

##### 1) 旁路电容 $C_2$

在故障电流旁路阶段, 所提 B-HCB 中存在如图 3(c)所示的  $C_2$ - $Q_2$ - $S_1$ - $L_{22}$ - $L_3$  回路和  $L_1$ - $Q_2$ - $C_2$ - $U_{dc}$  回路。根据 KVL 定律, 可得回路方程组如下

## 2 B-HCB 关键参数设计

$$\begin{cases} i_0(t) = i_1(t) + i_2(t) \\ U_2(t) = L_{22} \frac{di_1(t)}{dt} + L_3 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_3(t)}{dt} \\ L_1 \frac{di_0(t)}{dt} + U_2(t) = U_{dc} \end{cases} \quad (3)$$

其中, 耦合电感  $T$  采用全耦合系数, 可得式(3)中互感系数  $M = \sqrt{L_{21}L_{22}}$ 。  $i_2(t)$  为旁路支路电流, 满足电容伏安特性,  $i_0(t)$  为系统侧电流。

同样, 设定直流电压源  $U_{dc}$  远大于注入电压  $U_{vi}(t)$ , 因此在分析旁路支路电流时, 可忽略主支路  $U_{vi}(t)$  侧的影响 ( $i_1(t)=0$ ), 以简化分析。故式(3)可简化为

$$\begin{cases} i_2(t) = C_2 \frac{dU_2(t)}{dt} \\ L_1 \frac{di_2(t)}{dt} + U_2(t) = U_{dc} \end{cases} \quad (4)$$

将故障电流旁路阶段初始条件  $U_2(0)=0$ ,  $i_2(0)=I_{th}$  代入式(4), 可求得旁路电流  $i_2(t)$  表达式为

$$i_2(t) = I_{th} \cos\left(\frac{t}{\sqrt{C_2 L_1}}\right) + \frac{\sqrt{C_2} U_{dc} \sin\left(\frac{t}{\sqrt{C_2 L_1}}\right)}{\sqrt{L_1}} \quad (5)$$

为避免对电源侧造成电流冲击, 旁路支路的电流需小于直流系统允许的最大电流  $I_{ism}$ , 即  $i_{2max} \leq I_{ism}$ 。进而得出旁路电容  $C_2$  的约束条件为

$$C_2 \leq \frac{-I_{th}^2 L_1 + I_{ism}^2 L_1}{U_{dc}^2} \quad (6)$$

## 2) 放电电阻 $R_1$

主支路电流  $i_1(t)$  决定了故障开断窗口期和反向电流峰值, 其主要影响因素为放电电阻  $R_1$ 。在分析  $R_1$  时, 假设电容  $C_1$  足够大, 则  $U_{C1}$  近似不变为初始预充电电压  $U_{dc}$ 。同时, 将  $U_{C2}$  近似等效为故障开断期间所上升的电压平均值  $U_{avg}$ 。此时故障电流旁路阶段的  $C_2$ - $Q_2$ - $S_1$ - $L_{22}$ - $L_3$  和  $C_1$ - $Q_1$ - $L_{21}$ - $R_1$  回路表达式可简化为

$$\begin{cases} U_{avg} = L_{22} \frac{di_1(t)}{dt} + L_3 \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_3(t)}{dt} \\ U_{dc} = L_{21} \frac{di_3(t)}{dt} + M \frac{di_1(t)}{dt} + R_1 i_3(t) \end{cases} \quad (7)$$

将简化后的故障电流旁路阶段初始条件  $i_1(0)=I_{th}$ ,  $i_3(0)=0$  代入式(7), 得到主支路电流  $i_1(t)$ , 其实现机械开关的无弧开断的条件为  $i_1(t_q) < 0$ , 由此得到  $R_1$  的约束条件,

$$\frac{I_{th}}{U_{avg}} (L_{22} + L_3) + t_q < D_2 \frac{(-1 + e^{D_1 R_1})}{R_1} \quad (8)$$

$$\begin{cases} D_1 = \frac{(L_{22} + L_3)t_q}{L_{21}L_{22} - L_1(L_{22} + L_3)} \\ D_2 = \left[ \frac{L_{21}L_{22}}{L_{22} + L_3} - \sqrt{L_{21}L_{22}} \frac{U_{dc}}{U_{avg}} \right] \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中,  $D_1$ 、 $D_2$  均表示不包含  $R_1$  的电路参数复合表达式。

同时,  $i_1(t)$  的反向峰值电流需小于直流系统反向最大允许电流  $I_{re}$ , 即  $i_{1max} \leq I_{re}$ , 因此得到  $R_1$  的另一个约束条件为

$$\frac{L_1 U_{avg} - \sqrt{L_{21}L_{22}} U_{dc} + D_3}{(I_{re} - I_{th})(L_{22} + L_3)} \leq R_1 \quad (10)$$

$$D_3 = \left[ L_1 - \frac{L_{21}L_{22}}{L_{22} + L_3} \right] U_{avg} * \ln \left[ \frac{1 - \sqrt{1/L_{21}L_{22}} L_{22} + L_3 U_{dc}/U_{avg}}{1 - L_1 L_{22} + L_3 / L_{21}L_{22}} \right] \quad (11)$$

式(11)中,  $D_3$  为不包含  $R_1$  的电路参数复合表达式。

## 3) 预充电电容 $C_1$

由于式(3)难以直接求得  $i_3(t)$  的解析解, 本文为简化计算, 忽略了耦合电感对电压注入回路的影响, 并将其等效为一个 RLC 放电回路, 适当地扩大了电容  $C_1$  的取值范围。同时为了保证电容  $C_1$  在故障开断期间一直处于释放能量的阶段, RLC 放电回路电流中的  $i_3(t)$  需满足非振荡衰减的条件, 即  $C_1 > 4L_{22}/R_1^2$ 。

为了保证电感  $L_{21}$  在故障开断期间一直处于吸收能量的状态, 电流  $i_3(t)$  达到峰值的时间  $t_m$  需满足  $t_m > k \cdot t_q$ ,  $k$  为常系数, 通常取值为 5~10。峰值时间  $t_m$  表达式为

$$t_m = \frac{\ln(p_2/p_1)}{p_1 - p_2} \quad (12)$$

其中  $p_1$ 、 $p_2$  为电流  $i_3(t)$  达到峰值时解的特征根。

将式(12)代入  $t_m > k \cdot t_q$  可得  $C_1$  的另一约束条件,

$$R_1 C_1 (R_1 + \sqrt{-\frac{4L_{22}}{C_1} + R_1^2}) > 2L_{22} (e^{\frac{k t_q}{L_{22}} \sqrt{\frac{4L_{22}}{C_1} + R_1^2}} + 1) \quad (13)$$

## 4) 启动电阻 $R_2$ 、 $R_3$

将图 2 中电容  $C_2$  的能量耗散回路和电容  $C_1$  的预充电回路等效为一阶 RC 电路, 其通常在充放电过程结束后达到稳态。因启动运行阶段断路器需要满足快速重合闸的要求, 所以上述两个回路的时间常数应满足不等式(14)。最后将已获得的  $C_1$  和  $C_2$  代入式(14)中, 就可以得到  $R_2$  和  $R_3$ 。

$$\begin{cases} R_2 C_1 < T_{reclose} \\ R_3 C_2 < T_{reclose} \end{cases} \quad (14)$$

## 3 仿真实验

为了验证所提出的 B-HCB 的可行性, 在



PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 7 所示的四端口直流系统仿真模型。

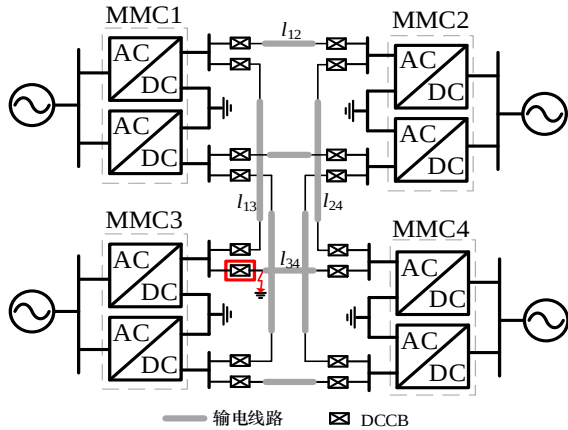


图 7 四端口直流输电系统模型

Fig.7 Four-port DC transmission system model

系统中的换流站采用半桥式子模块结构，具体参数见表 1，所提 B-HCB 的相关参数可见于表 2。以线路  $l_{34}$  靠近换流站 MMC3 的直流断路器作为观测点，设定在  $t=2.02s$  时线路  $l_{34}$  首端发生永久性金属性接地故障。

表 1 四端口直流系统仿真参数表  
Tab.1 Four-terminal DC system simulation parameters

| 参数              | MMC1 | MMC2 | MMC3 | MMC4 |
|-----------------|------|------|------|------|
| 额定容量/MVA        | 800  | 800  | 400  | 400  |
| 额定直流电压/kV       | 200  | 200  | 200  | 200  |
| 桥臂电感/mH         | 25   | 25   | 50   | 50   |
| 子模块电容值/ $\mu F$ | 1000 | 1000 | 500  | 500  |
| 子模块数            | 200  | 200  | 200  | 200  |

表 2 所提 B-HCB 参数  
Tab.2 Parameters of the proposed B-HCB

| 参数               | 数值  | 参数                | 数值   |
|------------------|-----|-------------------|------|
| 系统电压 $U_{dc}/kV$ | 200 | 预充电电容 $C_1/\mu F$ | 2000 |
| 系统电感 $L_1/mH$    | 10  | 旁路电容 $C_2/\mu F$  | 200  |
| 限流电感 $L_3/mH$    | 0.8 | 放电电阻 $R_1/\Omega$ | 15   |
| 耦合电感 $L_{21}/mH$ | 9   | 耦合电感 $L_{22}/mH$  | 1    |

图 7 表示发生故障期间断路器各支路电流波形情况，图中  $I_{line}$  为系统侧电流， $I_{load}$  为主支路电流， $I_{pass}$  表示流经旁路支路电流， $I_{S1}$ 、 $I_{D1}$  分别表示流过机械开关  $S_1$  和二极管  $D_1$  的电流。

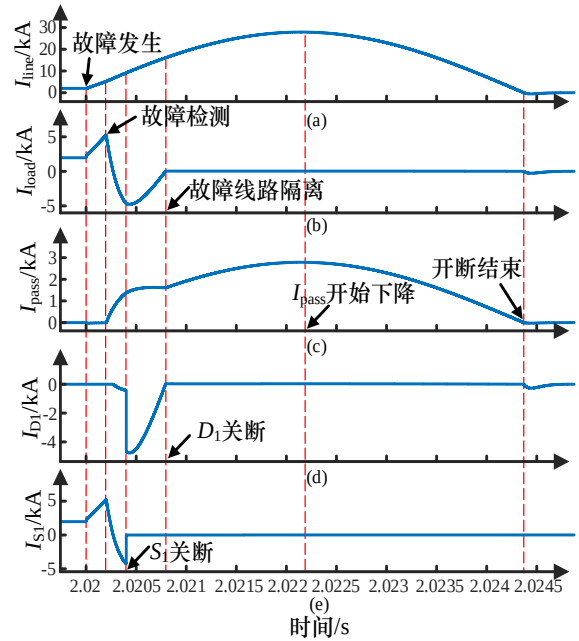


图 8 所提出的 B-HCB 开断过程电流波形

Fig.8 The proposed B-HCB interrupting process current waveform

由图 8(a)可知，系统在 2s 前稳定运行，所提出的 B-HCB 处于正常通流状态。通流路径仅包括低阻抗机械开关  $S_1$  和金属绕线  $L_{22}$ （耦合电感  $T$  的次级绕组），这样的拓扑结构使得 B-HCB 能够在此阶段实现低导通损耗。

在 2.02s 时刻故障发生，主支路故障电流迅速上升， $t=2.0202s$  时，从图 8(b)可知，故障电流达到保护阈值，B-HCB 收到保护动作信号，晶闸管  $Q_1$ 、 $Q_2$  同时导通。电压注入回路预充电电容  $C_1$  开始放电，产生的注入电压  $U_{vi}$  迫使主支路故障电流快速降为 0 并反向流至旁路支路，致使旁路电容电流  $I_{pass}$  快速上升（如图 8(c)）。同时，电压注入回路中放电电阻  $R_1$  的分压随着时间逐渐上升，加速注入电压  $U_{vi}$  的下降速率，以限制  $I_{load}$  流经二极管  $D_1$  的反向电流峰值（见图 8(b)）。

在  $t=2.0204s$  时， $S_1$  打开，使得反向电流自动从  $S_1$  全部转移到  $D_1$ （如图 8(d)）。由于二极管的钳位作用，机械开关在分闸期间两端电压保持为 0，成功实现了断路器的无弧开断，快速切断故障电流，并实现了故障区段的快速隔离。

最后，约 2.0205s 时刻开始，流经  $D_1$  的电流降至 0，二极管自然关断，故障部分电路自动切断。故障线路隔离之后，在 2.022s 左右，旁路电容  $C_2$  被充电至高于直流系统电压  $U_{dc}$ ，旁路支路  $I_{pass}$  的电流开始下降，在 2.0245s 左右减小至 0，旁路支路由于晶闸管  $Q_2$  正向阻断的特性也将自

动截止，开断过程全部结束。

#### 4 与几种已有 B-HCB 对比分析

为验证本文所提 B-HCB 的优越性，将其与目前已有的几种 HCB 进行对比分析。其中，ABB 公司所提传统 HCB 作为方案一、文献[14]所提基于 LCS 的 HCB 作为方案二、文献[22]所提基于瞬态换向电流注入（Transient Commutation Current Injector, TCCI）的 HCB 作为方案三、文献[27]所提 T 型 HCB 作为方案四、本文提出的 B-HCB 作为方案五进行性能比较，结果如下。

##### 4.1 性能比较

由于从各方案所提断路器拓扑中可以直观判断出其是否存在附加电源、基于旁路的隔离路径和 MOV 元件这三部分，因此本文主要侧重于故障区段隔离速度、导通损耗和控制难度三个方面的比较，详细的比较结果如表 3 所示。

表 3 DCCB 拓扑比较研究  
Tab.3 Comparison study between DCCB topologies

| 类别       | 方案一 | 方案二 | 方案三 | 方案四 | 方案五 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 故障区段隔离速度 | 慢   | 中   | 中   | 快   | 快   |
| 导通损耗     | 低   | 高   | 低   | 高   | 低   |
| 控制难度     | 低   | 低   | 高   | 高   | 低   |
| 附加电源     | ×   | ×   | ✓   | ×   | ×   |
| 旁路隔离路径   | ×   | ×   | ×   | ✓   | ✓   |
| MOV 元件   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ×   |

##### 1) 故障区段隔离速度

断路器的故障区段隔离速度与其故障开断时的故障电流换向过程密切相关。而在方案一的换向过程中，因其采用并联式的换向方式，故障电流会不断增大并持续流经故障区段，使得方案一的故障区段隔离速度慢。方案二在主支路中添加 LCS 来辅助故障电流换流、方案三通过增加辅助电路解决机械开关的机械延迟问题，两种方案均可缩短故障电流换流过程的持续时间，一定程度上缓解了方案一故障区段隔离速度慢的问题。而方案五通过提供旁路支路，避免了故障电流持续流经故障区段，显著提高了断路器的故障区段隔离速度。因此，就故障区段隔离速度而言，方案一最慢，方案二和方案三次之，方案五最快。

##### 2) 导通损耗

由于 LCS 的导通电阻要远远高于机械开关的导通电阻，因此，就导通损耗而言，主支路中仅包含机械开关的 HCB 较低，而主支路中引入 LCS 的 HCB 较高，即方案二和方案四的导通损耗远高于方案五的导通损耗。

##### 3) 控制难度

HCB 的控制越简单，越有利于其应用于实际工程中。一般来说，HCB 性能的提高伴随着控制难度的提高。例如，方案三可以实现低导通损耗，同时电流换向性能好，但为了无弧开断同时保持 MS 电流接近于零会导致控制难度提高。至于方案五，其 HCB 启动操作的控制较为简单，在实际工程中应用更方便，但其启动操作（电容器恢复到初始状态）需要电压平衡控制算法，这导致控制难度增加。与上述两种混合式直流断路器不同的是，本文所提出的 B-HCB（方案五）只需控制晶闸管导通（完成故障开断后自然关断），具有控制简单、易于使用的优势。

##### 4.2 成本比较

HCB 的成本主要取决于其中电力电子器件的数量，因此本文将电力电子器件数量作为衡量各方案成本的主要指标。为了在同一直流系统下计算各方案所使用的电力电子器件数量，本小节设置系统额定电压  $U_{dc}$  为 50kV，断路器动作电流  $I_{operation}$  为 10kA，断路器开断故障电流  $I_{break}$  为 20kA。为了安全起见，电力电子器件需考虑两倍的电压和电流裕度，故选择型号为 5SDD24F2800（2.8kV/30kA，160 美元）、5STF28H2060（2kV/36kA，200 美元）和 5SNA2000K452300（4.5kV/14kA，1600 美元）的二极管、晶闸管和 IGBT。各电力电子器件的额定电压值  $U_{rat}$  和浪涌电流  $I_{surge}$  附在其括号内。由于流经换向支路的故障电流仅持续几毫秒，因此采用电力电子器件的浪涌电流  $I_{surge}$  来计算其数量。此外，通流路径中的 LCS（由 IGBT 元件组成）使用 IGBT 5SNA2000K452300 的额定电流  $I_{rat}$  来计算其数量，其中  $I_{rat}=2kA$ 。各方案换流支路电力电子器件的数量  $N_1$  和通流支路电力电子器件的数量  $N_2$  可由式(15)计算得到，

$$\begin{cases} N_1 = M \cdot r(U_{dc} / U_{rat}) \cdot r(I_{break} / I_{surge}) \\ N_2 = M \cdot r(U_{dc} / U_{rat}) \cdot r(I_{operation} / I_{rat}) \end{cases} \quad (15)$$

其中  $M$  为电力电子器件组数， $r(x)$  为舍入函数。

各方案电力电子器件的数量及其成本（方案三中 TCCI 回路包括多个低压 MOSFET 和额

外的电源)如表4所示。

| 表4 DCCB 拓扑的成本比较                               |       |       |             |       |      |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------------|-------|------|
| Tab.4 Cost comparison between DCCB topologies |       |       |             |       |      |
| 类别                                            | 方案一   | 方案二   | 方案三         | 方案四   | 方案五  |
| IGBT                                          | 69    | 69    | 69          | 69    | 0    |
| LCS                                           | 0     | 40    | 0           | 40    | 0    |
| 晶闸管                                           | 0     | 0     | 0           | 0     | 400  |
| 二极管                                           | 0     | 0     | 0           | 288   | 90   |
| 其他<br>组件                                      | 0     | 0     | TCCI<br>回路  | 0     | 0    |
| 总成本/<br>万美元                                   | 11.04 | 17.44 | 超过<br>11.04 | 22.05 | 9.44 |

由表4可知,本文所提出的B-HCB的成本是最低的,即使其拓扑结构中使用的电力电子器件的数量远多于其他HCB,但因为晶闸管和二极管的价格都远低于IGBT,所以成本对比其他HCB更低。

## 5 结论

本文提出了一种基于故障电流旁路的混合式直流断路器,对其故障发生时的工作过程及原理进行了分析,并提供了参数设计方法。通过在四端口直流系统中进行验证,证明了所提B-HCB的可行性。与常用的混合式断路器进行对比,所提B-HCB有如下几个优势:

1) 通过构建旁路支路来转移故障电流,避免了故障开断期间故障电流持续流经故障部分,从而实现故障区段的快速隔离。

2) 采用有源耦合注入的方式来代替LCS(大量电力电子器件)进行故障电流换流,通流路径中仅包含低阻机械开关和金属线,使所提断路器具有超低导通损耗。

3) 在故障区段隔离过程中,通过二极管钳位的方式,成功实现了机械开关的无弧开断。

该断路器拓扑结构简单,具有故障区段隔离速度快,导通损耗小等优势,适应性较强,可对直流系统的稳定运行提供有利支持。

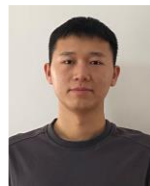
## 参考文献

- [1] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.  
Tang Guangfu, Pang Hui, He Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [2] 范兴明, 李涛, 张鑫. 中高压直流断路器的研究与应用[J/OL]. 高电压技术: 1-16[2023-11-20]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230696>.

- Fan Xingming, Li Tao, Zhang Xin. Research and application of medium and high voltage DC circuit breaker[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-16[2023-11-20]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230696>.
- [3] 郝瑞祥, 杨晓峰, 薛尧等. 一种具有直流故障限流能力的模块化多电平换流器[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 172-180.  
Hao Ruixiang, Yang Xiaofeng, Xue Yao, et al. A novel modular multilevel converter with DC fault current limiting capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 172-180.
- [4] 洪潮, 郭彦勋, 李海锋等. 适用于直流电网的新型机械式直流断路器[J]. 高电压技术, 2019, 45(08): 2403-2409.  
Hong Chao, Guo Yanxun, Li Haifeng, et al. Novel Mechanical DC Circuit Breaker Suitable for DC Grids[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(08): 2403-2409.
- [5] 丁璨, 蒲广, 袁召等. 一种自带充电支路的改进型混合直流断路器[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4331-4343.  
Ding Can, Pu Guang, Yuan Zhao, et al. Improved Hybrid DC Circuit Breaker With Self-charging Branch [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4331-4343.
- [6] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.  
Li Bin, He Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [7] 许烽, 陆翌, 裘鹏等. 基于二极管钳位的电流转移型高压直流断路器[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 139-145.  
Xu Feng, Liu Yi, Qiu Peng, et al. Diode clamping based current-transferring high voltage DC breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 139-145.
- [8] 余占清, 曾嵘, 屈鲁等. 混合式直流断路器的发展现状及展望[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2617-2626.  
Yu Zhanqing, Zeng Rong, Qu Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2617-2626.
- [9] 郭彦勋, 王要强, 李海锋等. 机械式直流断路器自适应重合闸策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(05): 1961-1969.  
Guo Yanxun, Wang Yaoqiang, Li Haifeng, et al. An Adaptive Reclosing Strategy for Mechanical DC Circuit Breaker [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(05): 1961-1969.
- [10] 黄亚峰, 周银, 严干贵等. 基于电容换流的限流型高压直流断路器[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3098-3108.  
Huang Yafeng, Zhou Yin, Yan Gangui, et al. Current-limiting high-voltage DC circuit breaker based on capacitor commutation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3098-3108.
- [11] 范兴明, 李涛, 张鑫. 基于电容自然充电换向的混合式直流断路器设计与仿真[J/OL]. 电工技术学报: 1-12 [2023-11-20]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230603>.  
Fan Xingming, Li Tao, Zhang Xin. Design and Simulation of Hybrid DC Circuit Breaker Based on Capacitor Natural Charging Commutation[J/OL]. Transactions of China Electro-technical Society: 1-12 [2023-11-20]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230603>.
- [12] Lumen SMS, Kannan R, Mahmud MdA, et al. An Improved DC Circuit Breaker Topology Capable of Efficient Current Breaking and Regeneration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6927-6938.
- [13] Shu J, Wang S, Ma J, et al. An Active Z-Source DC Circuit

- Breaker Combined With SCR and IGBT[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10003-10007.
- [14] Hassanpoor A, Häfner J, Jacobson B. Technical assessment of load commutation switch in hybrid HVDC breaker[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5393-5400.
- [15] 陶彩霞, 王文博, 李泰国等. 基于电容换流的限流型混合式直流断路器[J/OL]. 电网技术: 1-10[2023-11-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20230413.1910.002.html>. TAO Caixia, WANG Wenbo, LI Taiguo, et al. Current Limiting Hybrid DC Circuit Breaker Based on Capacitor Commutation [J/OL]. Power System Technology: 1-10[2023-11-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20230413.1910.002.html>.
- [16] Pei Xiaoze, Smith A C, Cwikowski O, et al. Hybrid DC circuit breaker with coupled inductor for automatic current commutation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120: 106004.
- [17] 程显, 闫冬冬, 葛国伟等. 基于耦合电抗器的阻容型混合直流断路器拓扑结构研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(03): 818-827.  
Cheng Xian, Yan Dongdong, Ge Guowei, et al. Research on the topology of the resistance-capacitance hybrid DC circuit breaker with coupling reactors[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2023, 38(3): 818-827.
- [18] 郭彦勋, 许壮, 王要强等. 适用于直流电网的晶闸管型直流断路器[J]. 高电压技术, 2023, 49(05): 2029-2037.  
Guo Yanxun, Xu Zhuang, Wang Yaoqiang, et al. A Thyristor-based DC Circuit Breaker Suitable for DC Grid[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(05): 2029-2037.
- [19] 薛士敏, 陈萧, 刘白冰等. 一种新型限流式混合直流断路器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2508-2520.  
Xue Shimin, Chen Xiao, Liu Baibing, et al. A novel current limiting Hybrid DC circuit breaker topology[J]. 2022, 42(7): 2508-2520.
- [20] Li B, He J, Li Y, et al. A Novel Current-Commutation-Based FCL for the Flexible DC Grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 591-606.
- [21] 周万迪, 贺之渊, 李弼智等. 模块级联多端口混合式直流断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4355-4367.  
Zhou Wandi, He Zhiyuan, Li Pengzhi, et al. Modular Cascaded Multi-port DC Circuit Breaker for DC Grid Application[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4355-4367.
- [22] Zhou Y, Feng Y, Shatalov N, et al. An Ultraefficient DC Hybrid Circuit Breaker Architecture Based on Transient Commutation Current Injection[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 2500-2509.
- [23] Shu J, Wang S, Ma J, et al. An Active Z-Source DC Circuit Breaker Combined With SCR and IGBT[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10003-10007.
- [24] Qin K, Wang S, Ma J, et al. A New Thyristor-Based DC Circuit Breaker Using Diode Clamping Switching[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, Published online 2022: 1-1.
- [25] Kheirollahi R, Zhao S, Lu F. Fault Current Bypass-Based LVDC Solid-State Circuit Breakers[J]. IEEE Trans Power Electron, 2022, 37(1): 7-13.
- [26] Kheirollahi R, Zhao S, Zhang H, et al. Fault Current Bypass-Based DC SSCB Using TIM-Pack Switch[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Published online 2022: 1-1.
- [27] Zhu J, Guo X, Yin J, et al. Basic Topology, Modeling and

Evaluation of a T-Type Hybrid DC Breaker for HVDC Grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2995-3004.



肖少典

收稿日期:。

作者简介:

肖少典(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制、直流断路器, E-mail: xiaoshao-dian@hnu.edu.cn;

刘增(1995), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为直流断路器、电力电子开关技术, E-mail: liuzheng@hnu.edu.cn.



文章编号:

中图分类号: TM 42

文献标志码: A

学科代码: 0800

# 一种非整数大变比、低损耗的平面型变压器开发

许蔺<sup>1</sup>, 王世山<sup>1</sup>, 沈湛<sup>2</sup>, 肖伟江<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106;

2. 东南大学电气学院, 江苏 南京 211189

3. 特变电工股份有限公司电气研究院 陕西 西安 710065)

## The Development of Planar Transformer with Non-integer large ratio and Low Losses

Wang Shishan<sup>1</sup>, Xu Lin<sup>1</sup>, Shen Zhan<sup>2</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106;

2. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189;

3. Electrical Research Institute, Tebian Electric Apparatus Stock Co. Ltd, Xi'an 710065)

**ABSTRACT:** Planar transformers has a good application in the resonant converter system due to their higher integration, good consistency, and ease of manufacture. Moreover, planar transformer with no-integer-turn has fewer turns, lower losses, and higher efficiency. Hence, it has better characteristics than integer-turn transformers. The working theory of FFT taking a VFTT and a PFTT for example is elaborated in this paper, whose important structure is the adopting of adjustable reluctance. Taking the 2:1/4 FTT for example, its finite element model is established and the electromagnetic characteristics are simulated. It was illustrated that the FTT properties can be controlled flexible with the adopting of adjustable reluctance. The research will lay a good theoretical foundation of outputting voltages for converter with a wide scope.

**KEY WORDS:** Fractional-turn transformer, adjustable reluctance, finite element method.

**摘要:** 平面型变压器以其集成度高、一致性好、易制造在谐振型变换器中有很好的应用,而具有非整数匝特性的该类变压器以更少匝数、更低损耗、更高效率较整数匝变压器有更好的性能,我们称该类变压器为“分数匝变压器”(FTT)。论文以“虚拟分数匝”(VFTT)和“物理分数匝”(PFTT)两种结构介绍该类平面变压器的工作原理,其中本文重要的结构为可调磁阻的采用。论文以 2: 1/4 变比的 FTT 为例,建立了其有限元仿真模型,并进行了电磁特性的初步研究。研究表明,采用可调磁阻的措施可以灵活调节 FTT 特性,为宽范围调节变换器的输出电压奠定一个良好的理论基础。

**关键词:** 分数匝变压器, 可调磁阻, 有限元法

## 0 引言

随着高性能运算芯片、快充电池等技术的不断

进步,变换器输出负载电流需要急剧提升,在变压器高变比系统中损耗尤为严重,限制了变换器功率等级的提升。进一步增加电路的电流输出能力要求拓扑使用多路并联输出,常用的方案有矩阵变压器的使用(图 1)<sup>[1]</sup>,它可实现原边串联、副边并联形式,实现减小磁元件数目、降低副边电阻的优点。然而,由于变压器原副边匝数均为整数,其最小值为 1,当变比一定时,限制了匝数的进一步降低,使得变压器布线面积和体积增加,对应绕组损耗增加且通常远大于磁芯损耗,设计不合理。

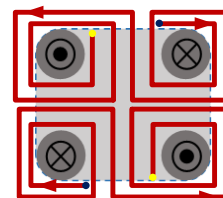


图 1 矩阵变压器

为进一步降低变压器匝数, G. Perica 等提出了“分数匝变压器”(Fractional-Turn Transformer, FTT)的概念,因为其体积小、损耗低、变比灵活等特性受到广泛关注<sup>[2]</sup>。FTT 不再限制变压器低压匝数为整数,其低压侧可以等效为诸如 1/2 匝、1/4 匝等分数匝,因此称为“分数匝变压器”。相比矩阵变压器,FTT 可以进一步降低变压器匝数,减小绕组损耗、平衡绕组磁芯损耗,减小布线面积及变压器整体体积。此外,FTT 可由开关器件控制实现可变变比的功能,可满足计算机、电子负载、高频功放等场合需求宽输入输出电压范围的需求<sup>[3-5]</sup>。

然而,由于采用了分数匝,变压器原副边之间的磁通无法实现完全耦合,会存在较大的线圈漏

感,负载性能的提升也需求变压器变比条件范围的进一步提升。因此,如何进一步提升 FTT 变比的可调范围、控制漏感等分布参数、降低变压器及变换器整体体积,对设计高性能磁性元件、提升高频功率变换能量密度、助力消费电子和电动汽车产业升级具有重要意义。

## 2. FTT 的工作原理

FTT 主要分为两种结构形式:一是采用磁通分裂原理依靠整数匝模拟等效磁路意义上的分数匝,即“虚拟分数匝”(Virtual FTT, VFTT);另一种是依靠物理结构上的“1/2 匝”、“1/4 匝”等形式实现,即“物理分数匝”(Physical FTT, PFTT),两种实现方法和优缺点各不相同。

### 2.1 VFTT 结构

以 1/4 匝为例的 VFTT 结构如图 2(a),它使用若干分磁柱将变压器主磁通均分为 4 部分,使得副边每匝在完整线匝条件下等效为 1/4 匝,实现了分数匝的功能以及电压的精确输出。由于磁芯结构包含了多根分磁柱,它天然具备多路大电流输出能力,降低了变换器设计难度<sup>[2]</sup>。使用整数匝来模拟分数匝可以根据设计的匝数需要灵活选用及设计分磁柱个数,有效控制绕组损耗。

假设输入端原边有  $N_1$  线匝,紧密绕制在磁中心柱上。副边有  $n$  个磁边柱,每个磁边柱均绕有 1 匝线圈,这  $n$  个线圈并联后构成副边供负载输出电压,则其感应电动势之间的关系为:

$$\mathcal{E}_1 = N_1 \omega \Phi_1, \quad \mathcal{E}_2 = 1 \times \omega \Phi_{2i} \quad (1)$$

式中,  $\Phi_1$  为穿过原边的磁通量;  $\Phi_{2i}$  为穿过每个副边的磁通,在忽略漏磁的情况下,

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^n \Phi_{2i} \quad (2)$$

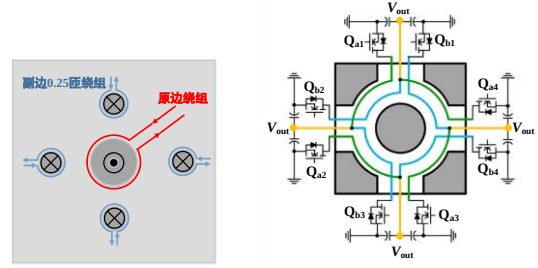
如果认为副边完全平衡,则

$$\Phi_{2i} = \Phi_1 / n \quad (3)$$

结合式(1)-(3),则变压器的变比为:

$$k = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{1/n} \quad (4)$$

由结构和式(4)可知,FTT 并不是结构上表现为分数匝,原、副边感应电动势改变不是按照简单匝数比  $N_1:1$ ,而是呈现分数形式,每个磁边柱的磁通都是主磁通的  $1/n$ ,这也使得磁通变化率变为为主磁通变化率的  $1/n$ ,从而使绕在每个磁边柱上的副边的感应电动势降低,从而增大了变压器的变比  $k$ 。



(a) VFTT

(b) PFTT

图 2 副边为 1/4 匝的 FTT 结构示意图

### 2.2 PFTT 结构

以副边 1/4 匝为例的 PFTT 结构如图 2(b)所示。该结构充分利用分柱磁芯的对称性实现  $n$  个  $1/n$  匝共同包围形成 1 匝的结构,由于结构的对称性,该变压器天然具有磁通平衡、漏感较小等优势,仅  $1/n$  匝的绕组物理长度还大大降低了副边绕组损耗<sup>[6-8]</sup>。

类似 VFTT, PFTT 原副边之间的感应电动势为:

$$\mathcal{E}_1 = N_1 \omega \Phi_1, \quad \mathcal{E}_2 = 1 \times \omega \Phi_2 \quad (5)$$

忽略漏磁情况下  $\Phi_1 = \Phi_2$ ,但是根据外电路控制,副边实际属于  $1/n$  匝的并联支路,但是电流仍然形成一个完整的圆环,即从磁场的激励角度来看,仍然为 1 匝。因此,分配至每个输出支路的感应电动势为:

$$\mathcal{E}_{2i} = \mathcal{E}_2 / n \quad (6)$$

变压器对应的变比为:

$$k = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_{2i}} = \frac{N_1}{1/n} \quad (7)$$

对比(7)和(4),变压器的变比均实现了“分数”(Fraction)的理念,即副边将 1 匝从输出感应电动势角度看分为  $1/n$  匝,因此称为“分数匝”。

### 2.3 可调磁阻

式(4)和(7)成立的条件是无漏磁场,即认为磁心磁导率为无穷大,而实际为有限值,其中的磁通  $\Phi$  与磁心的磁导率密切相关,即

$$\Phi_1 = \Phi_1(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m), \quad \Phi_2 = \Phi_2(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) \quad (8)$$

其中,  $\mu_i (i=1, 2, \dots, m)$  为原、副边磁路中磁性材料的磁导率。为了通过控制磁导率的变化,所以可以将磁路划分为若  $m$  段,根据指标要求分别调整每一段的磁导率,对应磁阻也发生变化,因此称为“可调磁阻”。

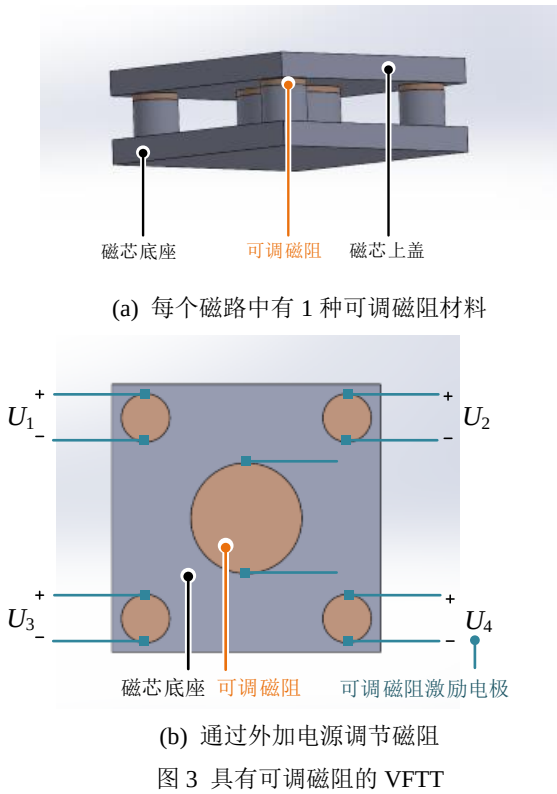
因此,FTT 的变比  $k$  与磁心磁导率有关,即:

$$k = k(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m) \quad (9)$$

如果能设法控制磁导率  $\mu$ ,则即可控制变压器的变比  $k$ ,本文将这类 FTT 变压器称作“可调磁阻”。



的 FTT，其典型结构如图 3 所示。



### 3. FTT 的有限元模型及其电磁特性

对于如图 3 所示的 1/4 匝 VFTT，如果认为分磁柱是安全对称的，则只需建立 1/8 模型(图 4)即可对其磁特性进行分析；除空气之外的剖分如图 5 所示。

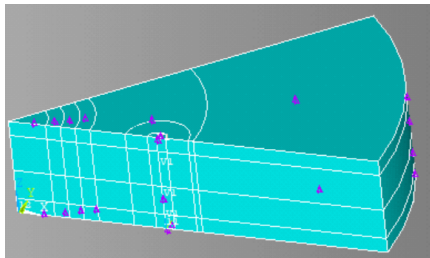


图 4 VFTT 磁场模型

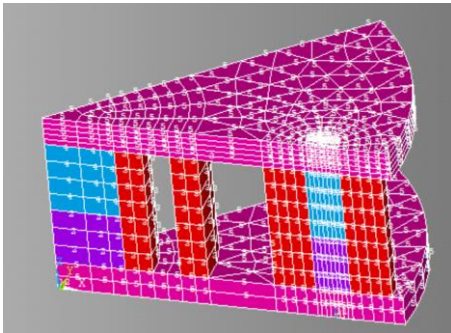


图 5 除空气之外的剖分单元

本文选择 ANSYS 软件中 Solid236 为 3D 仿真单元，仿真分为两步走：1) 绕组作为线圈看待，即

仅仅考虑其电感效应，主要考察其漏磁状况，考察变比  $k$  的特性；2) 如果需要考察损耗特性，则线圈中的导体计及其涡流损耗可以获得更高的精度。

对于 1) 的情况，原边选择  $Az+Volt$  为 DOF，即原边为场路耦合的载压线圈，而副边可以通过外接一个阻值无穷大的电阻模拟开路，此时副边可以选择  $Az+Volt+EMF$  为 DOF，其对应的边值问题为：

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{A}_l = 0, & \text{非线圈区域} \\ \nabla^2 \mathbf{A}_c = -\mu \mathbf{J}_c, & \text{线圈区域} \\ J_c = I_c / S, & \text{线圈电流密度} \\ \dot{U}_1 = \dot{I}_1 (R_1 + j\omega L_m), & \text{原边电压平衡} \\ W_m = \frac{1}{2} L_m I_1^2, & \text{磁场能量近似来自激磁电感} \end{cases} \quad (10)$$

对于情况 2)，由于需要考虑导线的涡流效应，所以需要将绕组中的导体看作“大块导体”(Massive conductor)，选择  $Az+Volt$  为 DOF，原、副边分别加载额定电流  $I_{T1}$ 、 $I_{T2}$ ，对应的边值问题为：

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{A}_l = 0, & \text{非线圈区域} \\ \nabla^2 \mathbf{A}_{ci} = -\mu \mathbf{J}_{Ti}, & \text{线圈}(i=1,2)\text{区域} \\ \int_{S_1} \mathbf{J}_{T1} \cdot d\mathbf{S} = I_{T1}, & \text{原边注入电流} \\ \int_{S_2} \mathbf{J}_{T2} \cdot d\mathbf{S} = I_{T2}, & \text{副边注入电流} \end{cases} \quad (12)$$

除过(11)、(12)的边值问题，在对称面上加载磁力线平行边界条件，即图 4、5 的  $\theta=0$  和  $\theta=\pi/4$  的边界面上；而上下底盖和最外空气面，可以认为磁位  $\mathbf{A}=0$ 。

在如上边界条件的基础上，则可以求解该边值问题，并且可以进行相应的后处理。

改变可调磁阻的磁导率，变比  $k$  的变化如图 6 所示。仿真显示，在磁导率较小时，磁导率对变化影响很大，这是因为磁导率较小时漏磁很大，所以副边感应电动势就很小，变比就很大；随着磁导率的增大，漏磁逐渐趋向稳定，输出感应电动势达到一个稳定值，变比也达到一个稳定值。因此，如何既能保证一个稳定的变比，又能够希望变比  $k$  随磁导率的变化而变化，也是后续继续需要研究的内容。

磁导率的变化也会影响磁心的损耗(图 7)，因为磁导率越大，磁心中的涡流损耗也越大，最后也基本趋向一个稳定的值。因此，在变比满足的需求下，可以选择磁导率小的磁心降低涡流损耗。

原副边中电流密度的分布分别如图 7、8。有限元仿真显示，原、副边导体中的电流密度内侧明显高于外部，体现了导体的集肤效应，为进一步研究

损耗特定奠定了一定的基础。

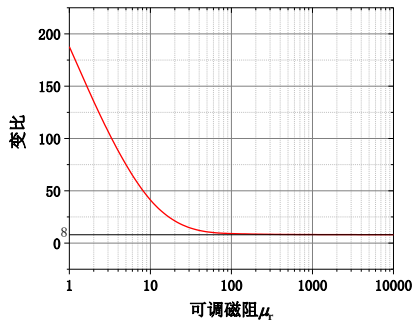


图6 磁导率对变比的影响

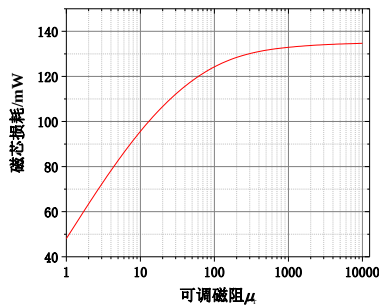
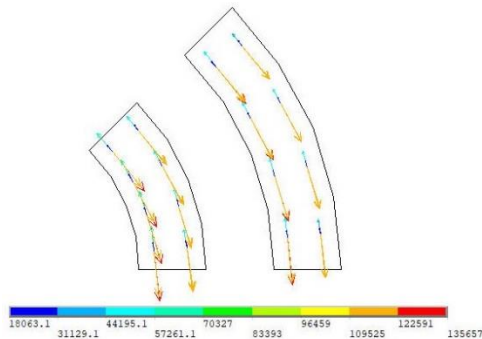
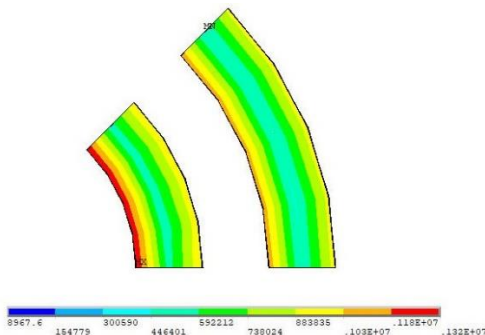


图7 磁导率对磁芯损耗的影响

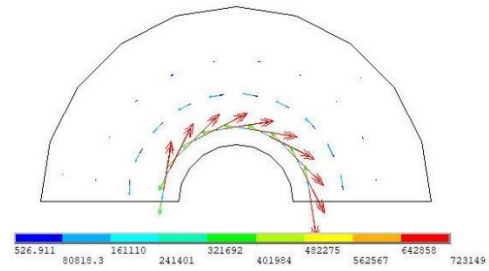


(a) 方向矢量

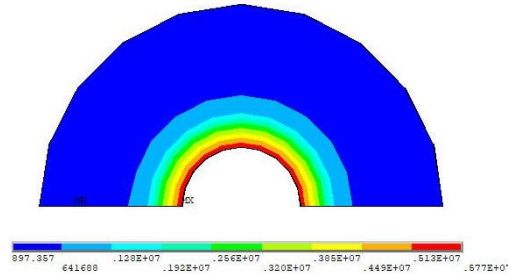


(b) 云图

图7 原边电流密度  $J_{T1}$  的分布



(a) 方向矢量



(b) 云图

图8 副边电流密度  $J_{T2}$  的分布

#### 4. 结论

本文以分数匝变压器(FTT)为研究对象,采用基于有限元的软件 ANSYS 对 FTT 展开研究,得到如下结论:

(1) 介绍了两种结构 FTT(VFTT 和 PFTT)的工作原理,推导出该类变压器的变比与磁路中磁导率有关,为基于可调磁阻的 FTT 变比奠定了一定的基础。

(2) 选择 ANSYS 中的 Solid236 单元建立了 FTT 的有限元模型,得到 FTT 的变比与磁心中磁导率的关系,同时也获得磁心磁导率对其损耗的影响。

(3) 因为 FTT 匝数教少,且其截面积为矩形,所以适合作为单块导体建模仿真,由此得到绕组导线计及集肤效应时的电流密度分布,为热损耗计算奠定基础。

#### 参考文献

- [1] C. Fei, Fred C. Lee, Q. Li. High-Efficiency High-Power-Density LLC Converter with an Integrated Planar Matrix Transformer for High-Output Current Applications[J]. IEEE Trans. on Industry Electronics, 2017, 64(11): 9072-9082.
- [2] G. Perica. Elimination of Leakage Effects Related to the Use of Windings with Fractional of Turns[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1986, 1(1): 39-47.
- [3] T. Sigle, B. Ruprecht, M. Sigle, A. Kloenne, User Configurable Efficient USB Power Supply with Smart Control Functions for Buck/Boost

- Operation Using ZETA-Topology[C], 2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe), Karlsruhe, Germany, 2016: 1-6.
- [4] 徐殿国, 管乐诗, 王懿杰, 张相军, 王卫. 超高功率率变换器研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 26-36.
- [5] K. D. Papastergiou, C. K. R. M. Loh, D. E. Macpherson *et al.* Emulation of Fractional Turns in Push-Pull Topologies[C]. Twentieth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC), Austin, USA, 2005.
- [6] Lloyd H. Dixon. Unitrode Magnetics Design Handbook[M]. Texas, USA: Texas Instruments: R6-1.
- [7] S. Q. Li, E. G. Rong, Q. Y. Min, *et al.* A Half-Turn Transformer with Symmetry Magnetic Flux for High-Frequency-Isolated DC/DC Converters [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2018, 33(8): 6467-6470.
- [8] Liu Y C , Chen K D , Chen C , *et al.* Quarter-Turn Transformer Design and Optimization for High Power Density 1-MHz LLC Resonant Converter[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2019, 67(2):1580-1591.

---

收稿日期: 2024-6。

作者简介:

许蔺(1984), 男, 硕士生, 研究方向为电力电子的磁集成, E-mail: linhsu@nuaa.edu.cn。

王世山(1967), 男, 副教授, 研究方向为电力电子的电磁兼容, E-mail: Wangshishan@nuaa.edu.cn.



许蔺

# 基于 Boost 变换器的光伏发电 MPPT 技术原理及性能研究

孙润琦<sup>1</sup>, 孙天贺<sup>1</sup>

(1. 辽宁省电网节能与控制重点实验室, 沈阳工程学院, 沈阳, 110136)

## Research on the Principle and Performance of MPPT Technology for Photovoltaic Power Generation Based on Boost Converter

SUN Runqi<sup>1</sup>, SUN Tianhe<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Energy Saving and Controlling in Power System of Liaoning Province, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, 110136)

**ABSTRACT:** With the gradual depletion of energy and the increasingly serious problem of environmental pollution, attention to solar power generation technology is also increasing. In this process, photovoltaic grid-connected inverter as a key equipment for power conversion and regulation, its performance has a crucial impact on the robustness and efficiency of the overall system, so the research and development of photovoltaic grid-connected inverter becomes particularly critical. In this paper, the mathematical model of photovoltaic cells is established, and the output characteristics of photovoltaic cells are obtained on this basis. Then, the photovoltaic power generation system model and MPPT model based on Boost converter are established, and the disturbance observation method is used to track the maximum power point of photovoltaic cells. Finally, the overall structure of photovoltaic access to the distribution network is analyzed and adjusted, and the output power of photovoltaic array is changed by adjusting the duty ratio in the Boost circuit. The maximum output power point is tracked accurately, the output control model of single-phase PV inverter is established, and the double closed-loop control mechanism is introduced. The simulation results show that the optimized control system has good dynamic response and steady-state characteristics.

**KEY WORDS:** boost converter; photovoltaic cell; maximum power point tracking technology; photovoltaic grid-connected

**摘要:** 随着能源的逐渐耗尽和环境污染问题愈发严重, 对太阳能发电技术的关注度也在不断提高。在这个过程中, 光伏并网逆变器作为电力转换与调控的关键设备, 它的性能对于整体系统的稳健性和效能有着至关重要的影响, 所以研究和

池的数学模型, 并在此基础上得到了光伏电池输出特性; 然后建立了基于 Boost 变换器的光伏发电系统模型以及 MPPT 模型, 采用了扰动观察法来实现光伏电池最大功率点的跟踪, 最后对光伏接入配电网的整体结构进行了分析与调节, 在 Boost 升压电路中通过调节占空比的方式改变光伏阵列输出功率, 从而完成对最大输出功率点的精确追踪, 并建立了单相光伏发电逆变器输出级控制模型, 并引入了双闭环控制机制。并利用仿真结果表明经过设计优化的光伏接入配电网的控制系统展现出良好的动态响应和稳态特性。

**关键词:** boost 变换器; 光伏电池; 最大功率点跟踪技术; 光伏并网

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号

## 0 引言

环境恶化与资源紧缺的问题制约着全球范围内的可持续发展, 故能源体系绿色低碳转型势在必行, 可再生能源的进一步开发以及现有能源利用的清洁低碳化将是能源发展的基本趋势。光伏发电作为一种清洁能源发电方式, 其接入对配电网的运行稳定性和能源调度具有重要影响, 并得到了广泛应用, 因此, 研究光伏电池的工作原理以及光伏并网的输出特性变得尤为重要。

本文从三个方面对光伏发电进行研究: 首先, 建立了光伏电池的数学模型并分析了光伏电池输出特性, 然后建立了基于 Boost 变换器的光伏发电系统模型以及 MPPT 模型, 最后对光伏接入配电网的整体结构进行了分析与调节。

本文针对光伏接入配电网的主电路性能进行研究, 有助于理解和解决光伏并网过程中可能出现的技术难题, 比如电压波动、功率质量、并网点的选择等, 从而提高配电网的能源效率和运行稳定性。通过促进光伏发电的有效接入和应用, 有助于减少化石燃料的依赖和消耗, 推动能源结构的优化

基金项目: 本研究由沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC220456)的资助。

Project Supported by the Shenyang Young and Middle-aged Science and Technology Innovation Talent Support Program (RC220456).

开发光伏并网逆变器变得尤为关键。本文首先建立了光伏电

和绿色低碳经济的发展。

## 1 光伏电池模型及输出特性

### 1.1 光伏电池数学模型

太阳能电池是一种类似于二极管的装置,当太阳光照射到 PN 结时,半导体内的原子会因吸收光能而释放出电子,并形成相应数量的电子-空穴对。这样,在 PN 结两侧就产生了一个电势差。当外部回路与太阳能电池连接时,可以将储存在其中的能量转化为实际可用的电力输出。

在  $R_{ref}=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_{ref}=25^\circ\text{C}$  标准测试条件下(通常取日照强度和电池温度作为参考),短路电流称为  $I_{sc}$ ,开路电压称为  $V_{oc}$ ,在最大功率点处对应的电池电压和电流分别为  $V_m$  和  $I_m$ ,当光伏电池电压为  $V$  时,其对应的电池输出电流为:

$$I = I_{sc}(1 - C_1(e^{\frac{V_R}{C_2 V_{oc}}} - 1)) + DI \quad (1)$$

其中

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) e^{\left(\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}\right)} \quad (2)$$

$$C_2 = \left(\frac{V_m}{V_{oc}} - 1\right) / \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right) \quad (3)$$

$$V_R = V + \beta(T - T_{ref}) + R_s DI \quad (4)$$

$$DI = \alpha R(T - T_{ref}) + I_{sc}(R - 1) \quad (5)$$

在此公式中,  $\alpha$  代表电流随温度变化的系数,其单位为  $\text{Amps}/^\circ\text{C}$ 。在参考温度下,  $\beta$  代表电压随温度变化的系数,其单位为  $\text{V}/^\circ\text{C}$ 。实际上,单晶硅和多晶硅太阳电池的测量值为:

$$\alpha = 0.0012 I_{sc} \quad (6)$$

$$\beta = 0.004 V_{oc} \quad (7)$$

$R_s$  为光伏模块的串联电阻,由以下公式所确定:

$$R_s = \frac{N}{N_p} \left( A_{s,ref} \ln\left(1 - \frac{I_{m,ref}}{I_{sc,ref}}\right) - V_{m,ref} + V_{oc,ref} \right) / I_{m,ref} \quad (8)$$

$$A_{ref} = \frac{T_{c,ref} \mu_{T_{oc}} - V_{oc,ref} + \varepsilon N}{\frac{\mu_{I_{sc}} T_{c,ref}}{I_{m,ref}} - 3} \quad (9)$$

其中,  $\varepsilon$ ——材料能带,为  $1.12\text{eV}$  (硅);

$I_{m,ref}$ ,  $V_{m,ref}$ ——在参考条件下,光伏阵列的最大功率点电压和电流;

$I_{sc,ref}$ ,  $V_{oc,ref}$ ——在参考条件下,光伏阵列的短路电流和开路电压;

$N$ ——光伏阵列单元串联数;

$N_s$ ——光伏阵列模块串联数;

$N_p$ ——光伏阵列模块并联数;

在  $T_{c,ref}$  参考条件下,通常将光伏电池的温度设定为  $24^\circ\text{C}$ 。

### 1.2 光伏电池输出特性

光伏发电系统中电压与电流的关系呈现出显著的不规则性和与太阳光强度的变化、周围气温的变化(包括高温或低温)、降雨量或者云层覆盖率等多种天气状况密切相关<sup>[1]</sup>。随着外部条件的变动比如亮度增加、降低或者是外界气候变冷、变热等等情况发生的时候,其产生的电力输送能力和最高运行状态也会有所调整,电源系统模型及其等效模型如图 1、图 2 所示:

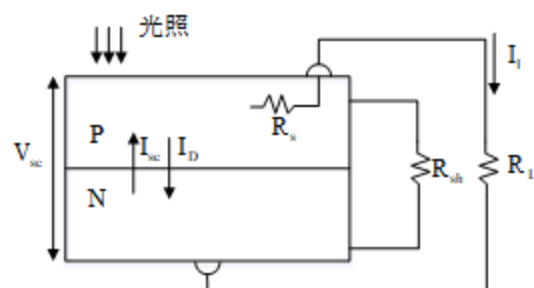


图 1 太阳能电池系统模型

Figure 1 Solar Cell System Model

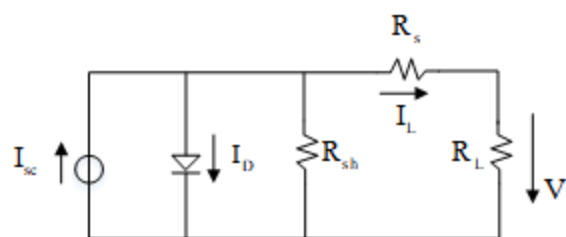


图 2 太阳能电池系统等效模型

Figure 2 Solar Cell System Equivalent Model

两图中  $R_L$  为电池的外接负载电阻。若  $R_L = 0$ , 测量出的电流量即表示蓄电池中的短接电路  $I_{sc}$ 。

根据光伏电池的等效电路,可以得到电池的输出特性方程:

$$\begin{aligned} I_L &= I_{sc} - I_D - I_{R_s} \\ &= I_{sc} - I_{rs} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V + I_L R_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I_L R_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (10)$$

式中:

$$I_{rs} = I_{or} \left[ \frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left\{ \frac{qE_G}{KA} \left[ \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right] \right\} \quad (11)$$

$$I_{sc} = \{ I_{sc} + k_i(T - T_r) \} \frac{\lambda}{100} \quad (12)$$

在进行理想电路计算时,可以忽略光伏电池内部的电阻  $R_s$  和  $R_{sh}$ 。这样,电池的等效电路可以简化为如图 3 所示的形式。



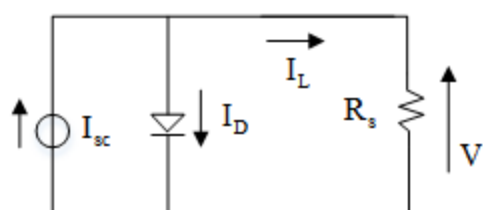


图3 光伏电池的简化等效模型

Figure 3 Solar Cell System Simplified Equivalent Model

根据图示模型可知,光伏电池中PN结的理想特性曲线方程是:

$$I_L = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{AKT}} - 1 \right) \quad (13)$$

式中,  $I_0$  代表电池在无光照条件下的饱和电流。当  $I_L$  等于 0 时, 电压  $V$  等于开路电压  $V_{oc}$  可用以下公式表示:

$$V_{oc} = \frac{AKT}{q} \ln \left( \frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (14)$$

依据方程(13)和(14)可绘制出光伏发电系统中的电源输出的电压和电流量的关系曲线图, 如图4所示。图4中的a线代表了无阳光条件下的单向晶闸管的工作特性和工作状态所产生的电力变化情况; b线则表示当有太阳光辐射到该设备上之后产生的影响及相应的功率变化趋势, 它是通过从原本的光源位置沿着纵坐标移动  $I_{sc}$  来实现其与原始值所比较后得到的<sup>[2]</sup>。

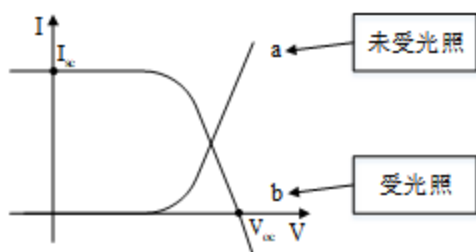


图4 太阳能电池的电流、电压关系曲线

Figure 4 The Current and Voltage Relationship Curve of Solar Cell

太阳电池在一定的光照和温度条件下, 太阳电池输出电流和输出电压之间的关系称为 I-V 特性; 太阳电池输出功率和输出电压之间的关系称为 P-V 特性, 如图5所示: 对于 I-V 的 P-V 特征来说, 不仅受到单个组装单元自身的复杂性和多项因素的影响, 同时也会被周围的环境条件如气温变化程度还有太阳光照射强度的变动所影响到: 在低压段, 太阳电池的输出特性可以近似看作是一个提供恒定电流的源, 而在接近开路电压时, 则可以近似看

作是一个提供恒定电压的源。随着温度升高, 太阳电池的开路电压呈现下降趋势; 同时, 当日照强度增大时, 短路电流也相应地增加。在最大功率点上, 太阳电池输出的电压约为其开路电压值的 80 % 左右。

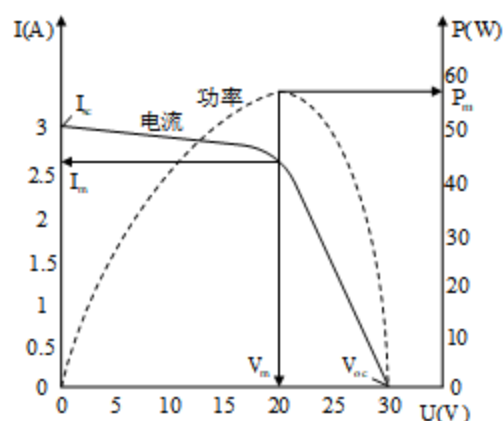


图5 光伏电池 I-V、P-V 输出特性曲线

Figure 5 Solar Cell I-V, P-V Output Characteristic Curve

## 2 基于 Boost 电路的光伏发电 MPPT 技术

### 2.1 Boost 电路

DC/DC 变换电路通常分为提升型(boost)、降低型(buck)及混合式上升下降波形模式等几种形式。本文是利用 Boost 升压电路对太阳能光伏发电系统进行最优性能追踪, 如图6所示。在该电路中  $U_g(t)$  表示光伏电池, 电路使用了一个绝缘栅全控型双极晶体管, 当可控开关  $V$  处于导通状态时,  $U_g(t)$  向电感  $L$  充电, 在此过程中充电电流基本恒定, 同时也将电容  $C$  上储存的能量传递给负载  $R$  以供应用<sup>[3]</sup>。而当开关  $V$  断开时, 则由  $U_g(t)$  和  $L$  共同向电容进行充放两个阶段操作, 从而向负载  $R$  提供能源。这种特殊设计使得输出电压高于输入电压, 其主要有两个因素: 第一点是由于  $L$  存储了部分能量, 从而使得其功率轨迹升高; 其次是因为电容能够稳定维持地输出信号至负载。

Boost 型变换器的输出电压  $U(t)$  和输入电压  $U_g(t)$  之间的大小关系为:

$$\frac{U(t)}{U_g(t)} = \frac{1}{1-D} \quad (15)$$

$$R_{in} = \frac{U_g(t)}{I} = R(1-D)^2 \quad (16)$$

式中  $D$  为 PWM 控制器的输出占空比。

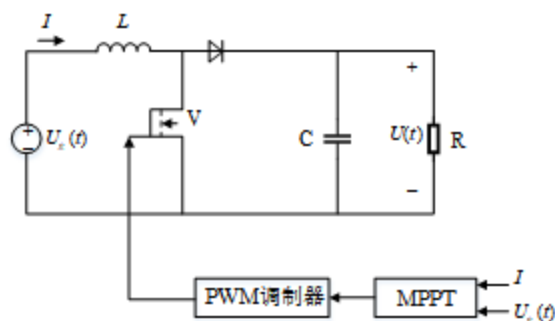


图 6 光伏发电 Boost 电路的拓扑结构图

Figure 6 Topology Diagram of Photovoltaic Boost Circuit

在负载  $R$  固定的情况下, 增加开关占空比  $D$  会减小 Boost 电路的输入阻抗; 相反地, 减小开关占空比  $D$  将增大 Boost 电路的输入阻抗。由此可见, 可以通过调整占空比  $D$  来调节等效输入阻抗  $R_{in}$ , 从而达到与输出阻抗进行匹配并优化系统性能的目的。

## 2.2 光伏阵列输出特性

本文在 Matlab 仿真软件中, 借助 Simulink 工具和相关参考文献的建模理念, 构建了一个光伏电池模块的通用仿真模型, 并通过该模型得到 6 个电池串联, 光照强度为  $S=1000\text{W/m}^2$  的条件下, 环境温度分别设定为  $0^\circ\text{C}$ 、 $25^\circ\text{C}$ 、 $45^\circ\text{C}$  和  $65^\circ\text{C}$  时, 对应于这些条件的光伏电池的 I-V 与 P-V 输出的特征曲线族, 如图 7 所示。

从图 7(a)可以看出, 随着温度上升, 短路电流有所增大, 但其提升程度相对较微弱, 大约仅有  $0.07\%/K$ 。然而, 对于光伏组件而言, 温度对其开路电压的影响非常显著, 即开路电压会因温度提高而下降, 此种下降速率约为  $0.4\%/K$ 。此外, 组件的输出功率也会受到温度升高的影响并随之减少, 估计下降率为  $0.4\sim 0.5\%/K$ 。

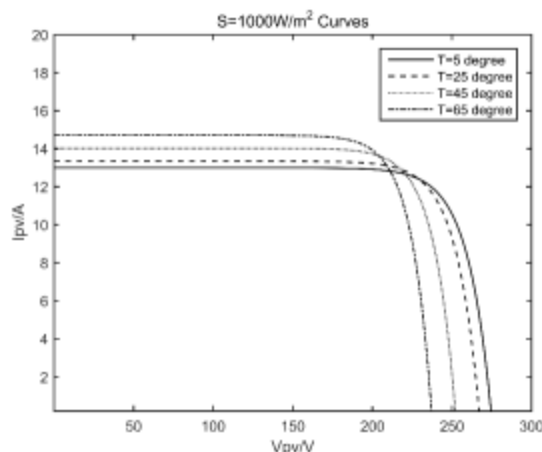


图 7(a) I-V 特性曲线

Figure 7(a) I-V Characteristic Curve

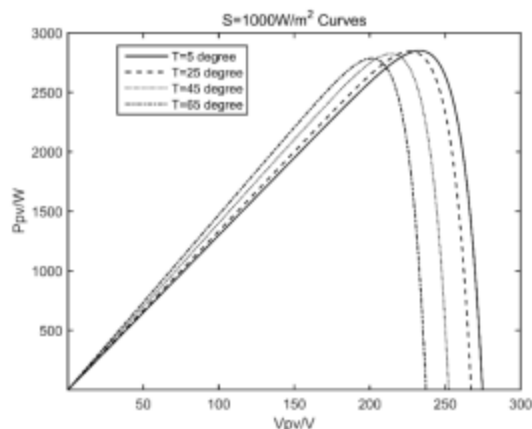


图 7(b) P-V 特性曲线

Figure 7(b) P-V Characteristic Curve

## 2.3 MPPT 模型

通过观察第 2.2 节中介绍的 P-V 输出特性曲线族, 在相同辐照度但不同温度及在相同温度但不同辐照度条件下可以得出如下结论: 光伏电池在某一工作点处会实现最大功率输出, 并且这个最大功率值随着辐照度增加而增大<sup>[4]</sup>。为了提高光伏电池系统整体效率, 必须追踪并定位其最佳工作点。外部条件发生变化 (例如气候和辐射水平等等), 太阳能发电系统的性能也会随之产生相应的变动; 然而, 唯有在这个特定状态下, 整个光伏组件才能达到其最大的能量输出——这就是所谓的“峰值工作效率 MPP (最大功率点)”。

在光伏发电系统中, 针对外界条件的变化情况, 可实时调整光伏阵列的运行方式以达到最佳效果。为了追踪并获取最大功率点, 可以采用一种被称为最大功率点跟踪技术 (MPPT) 的控制算法。该技术通过调整工作参数, 如输出电压和输入电流等来优化能量转换效率。由于环境因素、天气条件和负载需求等都可能引起不断变化的特征曲线, 并导致 MPP 位置难以确定, 所以需要使用动态跟踪方法来确保系统始终工作在这个关键节点上<sup>[5]</sup>。采用 PO 扰动观察法 MPPT 算法如下图 8 所示, 其中光伏电池 (Pv) 通过产生电流  $I$  将太阳能转换为电能, 其电压 ( $Pv\_u$ ) 与反向偏置二极管 ( $V_{ref}$ ) 上的电压  $U$  相互作用, 以实现系统优化。MPPT 算法的目标是实时监测和调整光伏电池的工作点, 使其接近最大功率点 ( $PO+mppt$ ), 从而最大化太阳能到电能的转换效率。通过精确控制正向偏置二极管的电流 ( $Pv\_i$ ), 系统能够在不同光照条件下维持最大功率输出, 确保能量的高效利用<sup>[6]</sup>。

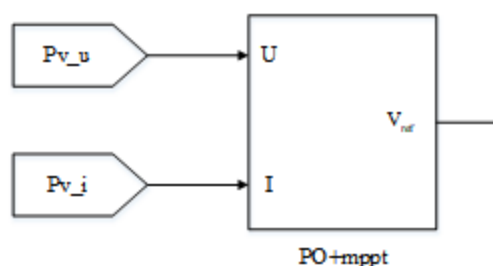


图 8 PO 扰动观察法 MPPT 模型

Figure 8 PO Perturbation Observation Method MPPT Model

### 3 光伏接入配电网的仿真结果分析

#### 3.1 光伏接入配电网的结构

光伏接入配电网的主电路采用二级式，前级为 DC/DC 整流器 Boost 升压电路，后级为 DC/AC 逆变器，并且在逆变后采用 LCL 滤波电路进行滤波。

DC/AC 逆变电路采用双闭环控制，双极性 SPWM 调制，在电压环中，直流母线提供给定电压，并将其与输出电压进行比较得到偏差。通过 PI 控制后，该偏差被作为电流环的目标值。此外，在电压环中还会生成一个乘积信号，该信号由 PLL 输出的正弦波和输出电流之间相乘得到，并用作参考值输入给电流环。此参考值和实际输出电流之间的误差也经过 PI 控制处理，并作为调制信号  $V_{ref1}$  的设定值。锁相环具备对并网电压进行锁位操作从而获得其相位信息的能力。当引入了针对并网电压的前馈控制时，它可以进一步作为另一个调制信号  $V_{ref2}$  的设定值使用。

#### 3.2 光伏接入配电网的输出特性

本文将光伏接入配电网电路在 Simulink 中搭建模型并进行仿真，得到相位角与配电网电压如图 9 所示：

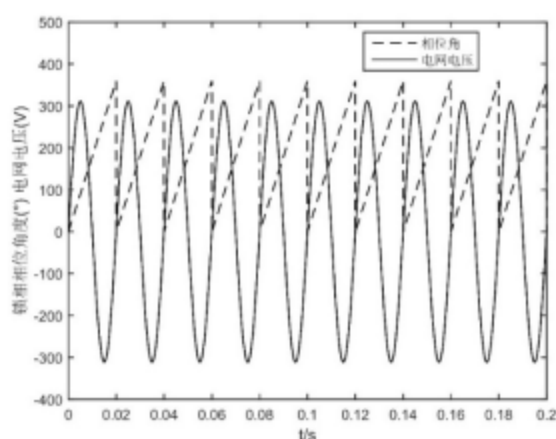


图 9 并网电压及锁相

Figure 9 Grid-connected Voltage and Phase Lock

根据输出波形可知，并网逆变器可以检查和锁定电网电压相位，才能保证并网电流和电网电压同相位输出，以及高功率因数运行。

图 10 为并网电压和电流比较图，由图可知发电时，电流保证了和电网电压的同相位，从而说明并网主要得到功率是有功功率，系统处于高功率因数运行。

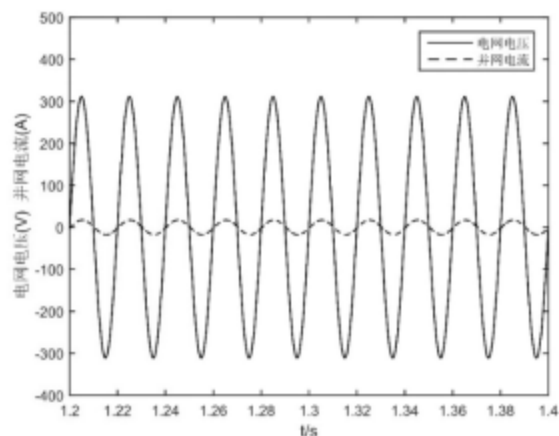


图 10 并网电压电流波形

Figure 10 Grid-connected Voltage and Current Waveform

如图 11 所示，从光伏并网发电的功率和实际真实逆变器发电到电网的功率可以看出，光伏发电的功率会略高于逆变器并网得功率，这是因为系统存在一定程度的损耗。而光照强度变化导致光伏发电功率变化后，并网得功率会迅速变化，并保证和光伏发电功率差异性不大，说明光伏发出的功率大部分都已并网发电给了电网。从发电的效率看，发电的转换率接近 96%，系统损耗约为 4%，可证明发电转换效率是较高的，损耗较小。

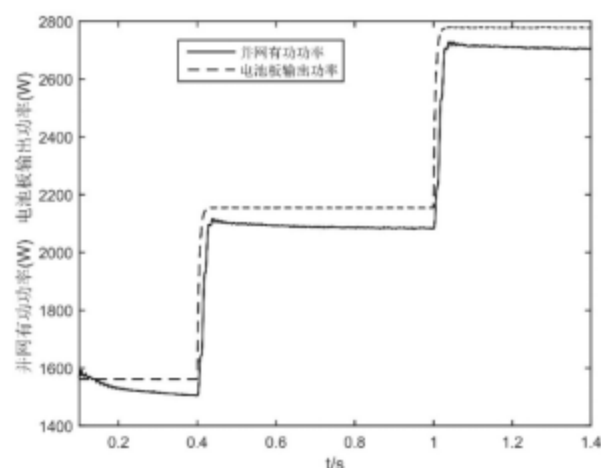


图 11 光伏并网有功功率与电池板输出功率

Figure 11 Photovoltaic Grid-connected Active Power and Panel Output Power

## 4 总结

本文以太阳能发电技术为背景,建立了光伏电池的数学模型,在此基础上,得到了光伏阵列的输出特性;在 Boost 升压电路中通过调节占空比的方式改变光伏阵列输出功率,从而实现了最大输出功率点的精确追踪;建立了单相光伏发电逆变器输出级控制模型,引入了双闭环控制机制,并通过 Simulink 建模仿真,对光伏接入配电网的输出特性进行了分析,验证了所建模型的正确性。

## 参考文献

- [1] 毕大强,郭瑞光.三相光伏并网发电技术实验平台设计[J].实验技术与管理,2018,34(02):67-72.
- [2] 桂红云,姚文熙,吕征宇.中点箝位型三电平变换器 SFOPWM 方法的研究[J].电源技术应用,2021,7(07):394-396.
- [3] BROEKH. W. V, SKUDELYH. C, STRANKE G. V. Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vector [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 24(1): 142-140.
- [4] L. Zhang, Y. Fan, R. Cui, et al. Fault-tolerant direct torque control of five-phase FTFSCW-IPM motor based on analogous three-phase SVPWM for electric vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 910-919.
- [5] G. Vivek, J. Biswas, M. D. Nair, et al. Simplified double switching SVPWM implementation for three-level VSI [J]. The Journal of Engineering, 2019(11): 8247-8269.
- [6] 张纯江,漆汉忠.空间矢量 PWM 与正弦 PWM 的比较研究[J].信息技术,2020(4):1-2.



孙润培

收稿日期:2024-06-15.

作者简介:

孙润培(2001),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行, E-mail: 15844577622@163.com;

孙天贺(1991),男,副教授,研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: sunth@sie.edu.cn

# 基于 BILSTM-Adaboost 的短期风电功率预测

魏航源, 韩雨, 吴子敬, 耿嘉豪, 苏勋文

黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 哈尔滨 150022

E-mail: 853279021@qq.com

## Short-term wind power prediction based on BILSTM-Adaboost

Wei Hangyuan, Han Yu, Wu Zijing, Geng Jiahao, Su Xunwen

School of Electrical & Control Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China

E-mail: 853279021@qq.com

**ABSTRACT:** In order to further improve the prediction accuracy of wind power, a short-term wind power prediction based on Bidirectional Long Short-Term Memory network (BILSTM) and adaptive boosting algorithm (Adaboost) was proposed. Firstly, the data preprocessing is carried out. Secondly, the bidirectional long short-term memory network is used to preliminarily predict the wind power. Finally, the adaptive boosting algorithm was used to reconstruct the predicted value so that the weak learners formed a strong learner to predict the final predicted value. Through the data analysis of a wind farm in Tianjin, the results show that the BILSTM-Adaboost prediction model has higher prediction accuracy than other single prediction models.

**KEY WORDS:** Wind power; Bidirectional long short-term memory network; Adaptive lifting algorithm

**摘要:** 为进一步提升风电功率的预测精度, 提出一种基于双向长短时记忆网络(BILSTM)和适应性提升算法(Adaboost)的短期风电功率预测。首先, 进行数据预处理。其次, 利用双向长短时记忆网络对风电功率进行初步预测。最后, 使用适应性提升算法将预测值重构使弱学习器组成一个强学习器, 从而预测最终的预测值。经天津某风电场的数据分析, 结果表明 BILSTM-Adaboost 预测模型比其他单一预测模型预测精度更高。

**关键词:** 风电功率; 双向长短时记忆网络; 适应性提升算法

## 0 引言

据国家能源局发布, 截至 2023 年 12 月底, 我国风电装机容量约 4.4 亿千瓦, 同比增长 20.7%<sup>[1]</sup>, 风能是当前最

具有应用前景的清洁无污染可再生能源之一<sup>[2]</sup>。受气候、地形、时间等因素影响, 风电出力具有间歇性、随机性、波动性, 这些特性会对电网的稳定和经济效益产生影响。风电功率的精准预测可优化电网调度、提升风电消纳能力、降低风电成本, 对电网和企业制定发电计划和市场竞价具有现实意义<sup>[3]</sup>。

目前, 大量国内外学者参与风电功率预测的研究, 采用的方法主要有: 统计预测方法、物理预测方法、组合预测方法。统计预测方法<sup>[4-6]</sup>通过建立历史数据中各种解释变量和被解释变量之间的映射, 以风速、温度、湿度等解释变量作为输入, 对未来风电功率进行预测。物理预测方法<sup>[7-8]</sup>是通过建立物理模型, 模拟风电场风能资源的分布来预测未来产生的风电功率。组合预测方法是按照特定的策略优化组合起来, 得到一个组合预测效果, 以达到提升预测效果的目的。文献[9]利用 Kendall 秩相系数选取相关序列, 然后采用 EEMD 和 ARCH 拟合得到预测功率。文献[10]提出了一种基于财务技术指标和参数优化的短期风电功率预测。文献[11]提出了一种将遗传算法和长短期记忆网络(Long Short-term Memory, LSTM)结合在一起的模型, 从而对风电功率进行预测。文献[12]利用遗传算法优化 BP 神经网络参数构建模型对风电功率进行预测。文献[13]使用 Adaboost 算法优化 BP 神经网络使其成为强学习算法, 然后对风电功率进行短期预测。

单一模型方法在短期预测中表现出不同的优势与缺陷, 但建立组合模型可在一定程度上提高预测效果<sup>[14]</sup>。本文建立 BILSTM-Adaboost 的短期风电功率预测组合模型。首先对数据进行预处理并划分训练集和测试集。然后搭建 BILSTM 模型, 使用适应性提升算法训练 BILSTM 模型中的弱学习器, 根据误差不断更新权重, 将若干个弱学习器组合成一个强学习器。最后, 使用强学习器对测试集预测得到预测值, 并与真实值进行比较。

**基金项目:** “2021 年度黑龙江省省属高校基本科研业务费项目”, 项目编号 2021-KYYWF-1467

**Fund Project:** Basic Scientific Research Fund Project of Heilongjiang Provincial Universities in 2021, Project No. 2021-KYYWF-1467



## 1 BILSTM 神经网络

由于 LSTM 无法同时联系前后数据对当前的数据进行学习, 因此 BILSTM 在单向 LSTM 的基础上, 增加一层后向传播 LSTM 层, 使其具有能够利用历史风电数据以及未来风电数据进行预测, 有效提高了模型预测的精度。BILSTM 结构如图 1 所示。

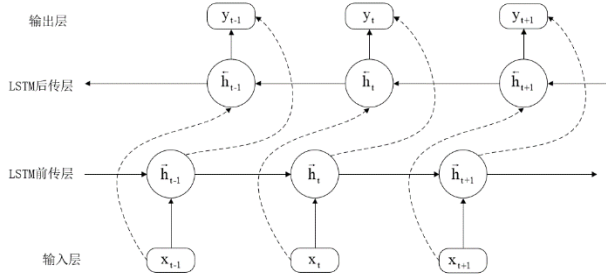


图 1 BILSTM 结构图

Figure 1 BILSTM structure diagram

BILSTM 的核心思想是将同一个输入序列分别接入 LSTM 前传层和 LSTM 后传层中, 将这两个网络的隐藏层链接在一起, 共同接入输出层。其公式为:

$$\vec{h}_t = \text{LSTM}(x_t, \vec{h}_{t-1}) \quad (1)$$

$$\overleftarrow{h}_t = \text{LSTM}(x_t, \overleftarrow{h}_{t+1}) \quad (2)$$

$$y_t = \vec{W}h_t + \overleftarrow{W}\overleftarrow{h}_t + b_y \quad (3)$$

式中, LSTM—传统 LSTM 网络运算过程;

$\vec{h}_t$ —前传层隐藏状态;

$\overleftarrow{h}_t$ —后传层隐藏状态;

$\vec{W}$ —前传层传播单元隐藏层输出权重;

$\overleftarrow{W}$ —后传层传播单元隐藏层输出权重;

$b_y$ —当前时刻隐藏层偏执优化参数。

## 2 Adaboost 算法

Adaboost 算法是优化后的一种 Boosting 算法<sup>[15]</sup>, 此算法是一种迭代算法, 针对同一个训练集训练不同的弱学习器, 提高前一轮弱学习器中误差大的样本权重, 降低训练效果好的样本权重, 最终把这些弱学习器组合起来, 构建一个泛化能力好的强学习器。

Adaboost 算法步骤具体如下:

- 1) 输入一个训练集  $T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2) \cdots (x_N, y_N)\}$ ,

其中  $x_i \in X$ ,  $y_i \in Y$ ,  $X$  和  $Y$  表示某个域或实例空间。

- 2) 初始化样本集的权重, 若样本数量为  $N$ , 且样本分布  $D_t(i)$  为均匀分布, 则:

$$D_t(i) = \frac{1}{N} \quad (4)$$

式中,  $D_t(i)$  表示第  $t$  次迭代中样本的权值。

- 3) 使用具有权值分布  $D_t$  的样本集进行对数据集的训练得到弱学习器  $G_t(x)$ 。

- 4) 计算弱学习器  $G_t(x)$  的误差  $E_t$ 、平均误差  $E_t$ 、弱学习器的系数  $\partial_t$ 、样本权重  $W_t$ 。

$$E_t = y_i - G_k(x_i) \quad (5)$$

$$E_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i \quad (6)$$

$$\partial_t = \frac{E_t}{1 - E_t} \quad (7)$$

$$W_t = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{\partial_t}\right) \quad (8)$$

- 5) 更新样本权重, 用来训练下一个预测器。

$$D_t(i) = \frac{D_{t-1}(i) \partial_t^{E_i}}{Z_t} \quad (9)$$

式中,  $Z_t$  是规范化因子。

- 6) 判断迭代次数是否到达事先设定的次数, 若没有满足此条件, 则返回到步骤 3 重新迭代直到满足该条件。

- 7) 将得到的弱学习器组合得到强学习器。

$$G(x) = \sum_{t=1}^T W_t G_t(x) \quad (10)$$

## 3 BILSTM-Adaboost 组合预测模型

基于 BILSTM-Adaboost 风电短期预测模型流程如图 2 所示。

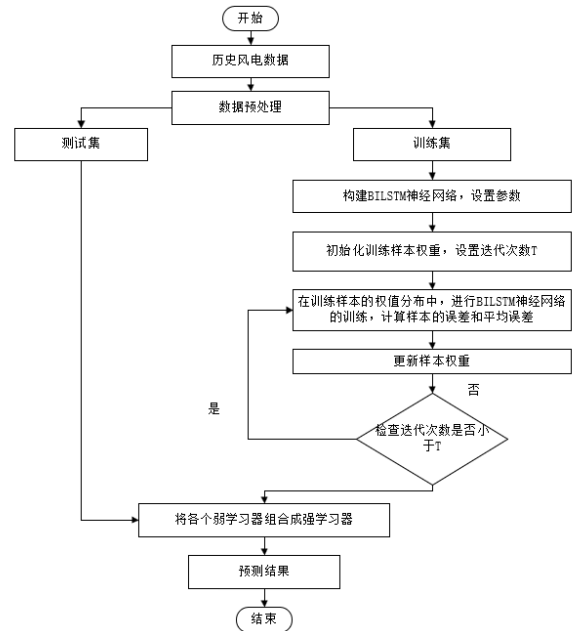


图 2 BILSTM-Adaboost 风电短期预测模型流程图

Figure 2 Flow diagram of BILSTM-Adaboost wind power short-term forecasting model

BILSTM-Adaboost 风电短期预测算法步骤:

- 1) 对数据进行预处理并划分训练集和测试集。
- 2) 构建 BILSTM 模型, 设置相关参数。
- 3) 初始训练数据的权值分布, 训练 BILSTM 网络的弱学习器, 根据样本的预测结果计算样本的误差和平均误差, 不断更新样本权重。
- 4) 检查迭代次数是否小于 T, 若小于 T 则返回步骤 3)重新训练; 若不小于 T 则停止迭代, 将这些弱学习器组成一个强学习器。
- 5) 使用强学习器对测试集进行预测, 得到预测结果。

## 4 算例分析

### 4.1 数据说明

为验证模型的 BILSTM-Adaboost 预测模型的精确性, 选取中国天津某风电场 2024 年 4 月 1 日至 2024 年 5 月 13 日的实际风电功率数据为数据集, 记录间隔为 15 分钟。按照 8:2 的比例划分训练集和测试集。选择前 5 个时刻的数据来预测未来 1 个时刻的风电功率。其中模型的输入为: 轮毂高度风速、测风塔 10m 风速、测风塔 30m 风速、测风塔 50m 风速、测风塔 70m 风速、湿度、温度、气压, 输出为风电功率。

### 4.2 模型预测结果及对比分析

为验证本文预测模型的有效性, 分别设置 BILSTM 模型、LSTM 模型、BILSTM-Adaboost 模型的参数如表 1 所示。

表 1 各神经网络参数

Table 1 Parameters of each neural network

| 预测模型            | 训练次数 | 初始学习率 | 窗口宽度 | 学习率调整因子 |
|-----------------|------|-------|------|---------|
| BILSTM-Adaboost | 100  | 0.01  | 1    | 0.1     |
| BILSTM          | 100  | 0.01  | 1    | 0.1     |
| LSTM            | 100  | 0.01  | 1    | 0.2     |

#### 4.2.1 各模型预测结果对比

将 BILSTM-Adaboost 模型、BILSTM 模型、LSTM 模型同时进行短期风电功率预测, 在 BILSTM-Adaboost 模型中设置迭代次数为 5 次, 选择其中 80 个样本进行数据可视化如图 3 所示。

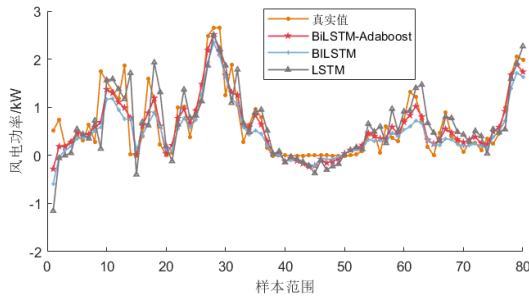


图 3 短期风电功率预测图

Figure 3 Short-term wind power prediction diagram

从图 3 中可以看出与其他 3 种模型相比

BILSTM-Adaboost 模型的整体预测效果更接近真实预测值, 有较好的预测效果。但是在一些极值点时预测结果相对正常点差别比较大, 可能是在数据预处理时没有有效的对异常数据进行预处理, 导致模型训练难度大, 拟合效果较差。

#### 4.2.2 各模型误差结果对比

选取平均绝对误差  $E_{MAE}$ 、均方根误差  $E_{RMSE}$  来对各模型的预测效果的评价。其公式如下:

$$E_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y_t - \hat{y}_t| \quad (11)$$

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (12)$$

式中,  $N$  为样本总数;  $y_t$  为真实值;  $\hat{y}_t$  为预测值

引入  $E_{MAE}$  和  $E_{RMSE}$  对各模型进行短期风电功率预测值和真实值之间的误差对比, 如表 2 所示。

表 2 各模型预测误差对比

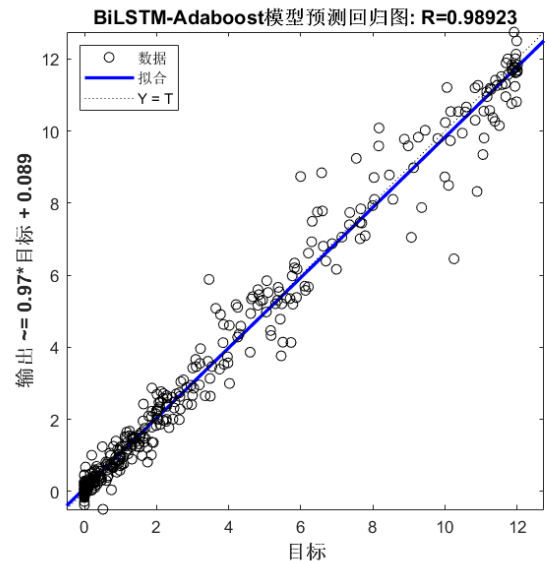
Table 2 Comparison of prediction errors of each model

| 预测模型            | $E_{MAE} / W$ | $E_{RMSE} / W$ |
|-----------------|---------------|----------------|
| BILSTM-Adaboost | 375.81        | 604.69         |
| BILSTM          | 399.49        | 632.05         |
| LSTM            | 670.25        | 1054.7         |

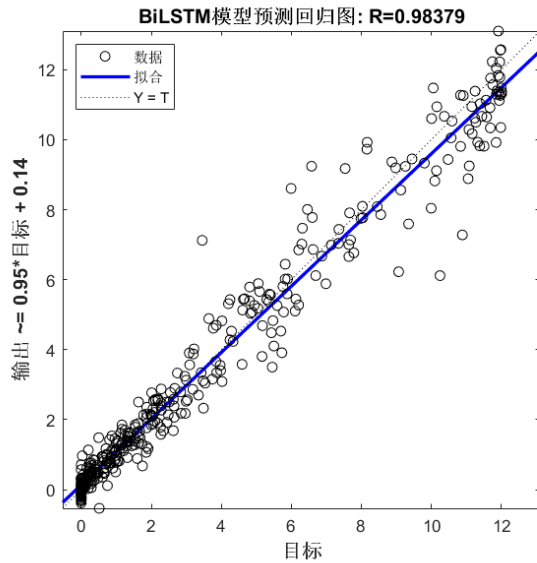
从表 2 中可以看出 BILSTM 模型与 LSTM 模型在评价指标  $E_{MAE}$  和  $E_{RMSE}$  分别降低了 40.4% 和 40.07%, 说明了 BILSTM 模型在预测效果上优于 LSTM 模型, 验证了模型的合理性。BILSTM-Adaboost 模型与 BILSTM 模型在评价指标  $E_{MAE}$  和  $E_{RMSE}$  分别降低了 5% 和 4.3%, Adaboost 模型对数据的噪声适应性更好, 进一步提升 BILSTM 模型的整体稳定性, 进一步验证了 BILSTM-Adaboost 模型的准确性和合理性。

#### 4.3.3 各模型回归效果对比

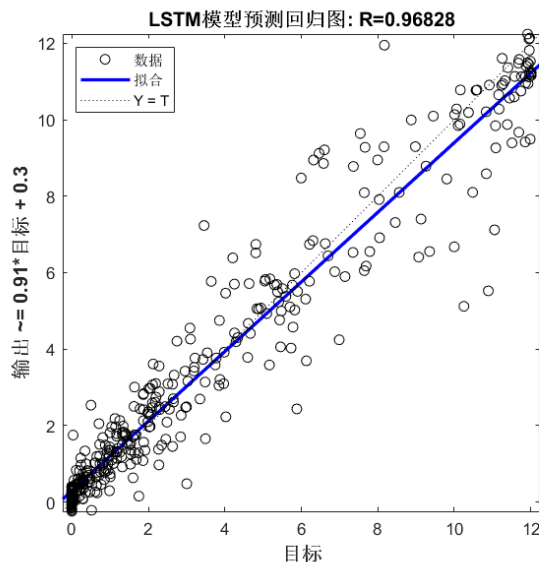
各模型回归效果如图 4 所示。



(a) BiLSTM-Adaboost 模型预测回归图



(b) BILSTM 模型预测回归图



(c) LSTM 模型预测回归图

图 4 各模型预测回归图

Figure 4 Predicted regression plots of each model

从图 4 中可以看出 BILSTM-Adaboost 模型的回归效果优于 BILSTM 模型和 LSTM 模型,说明了 BILSTM-Adaboost 模型具有较好的预测效果。

## 5 结论

为有效的提升短期风电功率预测精度,本文提出了一种基于 BILSTM-Adaboost 组合模型的短期风电功率预测。主要结论如下:

- 1) 经算例分析,运用 BILSTM-Adaboost 组合模型预测短期风电功率,效果较好。
- 2) BILSTM 模型包含两层 LSTM 模型,使其在信息利

用上更加全面,能够减少输入风电数据信息在网络传播中的丢失的可能性,提高了输出风电功率的精确度。

3) Adaboost 模型与 BILSTM 模型组合,提升了 BILSTM 模型在风电数据上的适应性和稳定性,使模型预测效果进一步提升。

## 参考文献

- [1] 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据[J].电力科技与环保,2024,40(01):95.
- [2] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J].中国电机工程学报,2023,43(05):1663-1672.
- [3] 钟吴君,李培强,涂春鸣,基于尾流关联的动态超图风电功率超短期预测方法[J/OL].中国电机工程学报,1-18[2024-06-13].
- [4] 刘增里,杨静,刘亚林,等.基于改进 BP 神经网络的风电功率超短期预测[J].船舶工程,2019,41(S1):282-287.
- [5] 周玮,钟佳成,孙辉,等.基于隐马尔可夫模型的日内风电功率预测误差区间滚动估计[J].电力系统自动化,2018,42(21):90-95+184.
- [6] Wang Z, Wang B, Liu C, et al. Improved BP neural network algorithm to wind power forecast[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 940-943.
- [7] 牛东晓,纪会争.风电功率物理预测模型引入误差量化分析方法[J].电力系统自动化,2020,44(08):57-65.
- [8] 冯双磊,王伟胜,刘纯,等.风电场功率预测物理方法研究[J].中国电机工程学报,2010,30(02):1-6.
- [9] 刘显苗,邓韦斯,谢恩彦.计及风速相关性的风电功率预测方法研究[J].微型电脑应用,2024,40(05):81-84.
- [10] Guan S, Wang Y, Liu L, et al. Ultra-short-term wind power prediction method based on FTI-VACA-XGB model[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 235: 121185.
- [11] Shahid F, Zameer A, Muneeb M. A novel genetic LSTM model for wind power forecast[J]. Energy, 2021, 223: 120069.
- [12] 逯登龙,高鹏,范丽锋,等.基于 GA-BP 神经网络的风电功率预测方法研究[J].自动化仪表,2024,45(03):97-102.
- [13] 吴俊利,张步涵,王魁.基于 Adaboost 的 BP 神经网络改进算法在短期风速预测中的应用[J].电网技术,2012,36(09):221-225.
- [14] 史彭珍,魏霞,张春梅,等.基于 VMD-BOA-LSSVM-AdaBoost 的短期风电功率预测[J].太阳能学报,2024,45(01):226-233.
- [15] 牛会宾.基于改进 Elman-Adaboost 算法在风电功率预测中的研究与应用[D].华北水利水电大学,2021.



魏航源

收稿日期: 2024-7-24

作者简介:

魏航源(2001), 男, 硕士, 主要从事风电场功率预测等电力系统及其自动化方向研究, Email: [853279021@qq.com](mailto:853279021@qq.com);

韩雨(2001), 女, 硕士, 主要从事直流输电等电力系统及其自动化方向研究, Email: [2080327910@qq.com](mailto:2080327910@qq.com);

吴子敬(1999), 男, 硕士, 主要从事风电场频率控制等电力系统及其自动化方向研究, Email: [547148654@qq.com](mailto:547148654@qq.com);

耿嘉豪(2000), 男, 硕士, 主要从事漏电保护等电力系统及其自动化方向研究, Email: [1013485324@qq.com](mailto:1013485324@qq.com);

苏勋文(1976), 男, 教授, 主要从事新能源、多端直流输电等电力系统及其自动化方向研究, Email: [suxunwen@163.com](mailto:suxunwen@163.com)。

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 基于模糊 PI 控制的三电平双向 DC/DC 变换器

任 泉, 韩 杨, 陈佳豪

(电子科技大学)

## Three-Level Bidirectional DC/DC Converter Based on Fuzzy PI Control

REN Quan, HAN Yang, CHEN Jiahao

(University of Electronic Science and Technology of China)

**ABSTRACT:** To address the issue of poor dynamic performance of traditional PI control in three-level bidirectional DC/DC converters, a fuzzy PI control method is proposed. Firstly, the modulation strategy of the three-level bidirectional DC/DC converter is analyzed, and small-signal mathematical models are established for the converter in both Buck and Boost states. Based on these mathematical models, transfer functions from output voltage to inductor current and from inductor current to duty cycle are derived. Using these transfer functions, a dual closed-loop controller for the converter is designed. Fuzzy control is introduced in the outer voltage loop to allow the system to adjust PI parameters in real-time. Simulations were conducted using the MATLAB/Simulink platform and compared with traditional PI control. The research results indicate that, compared to traditional PI control, the proposed method significantly improves the dynamic performance of the converter in both Buck and Boost modes.

**KEY WORDS:** Three-Level Bidirectional DC/DC Converter; PWM Modulation; Switched Network Averaging; Dual Closed-Loop Control; Fuzzy PI Control

**摘要:** 针对三电平双向 DC/DC 变换器传统 PI 控制动态性能差的问题, 提出了一种基于模糊 PI 控制方法。首先, 分析了三电平双向 DC/DC 变换器的调制策略, 分别建立了变换器在 Buck、Boost 状态下的小信号数学模型。基于数学模型得到输出电压到电感电流和电感电流到占空比的传递函数, 据此设计变换器的双闭环控制器。其中, 在电压外环引入模糊控制, 使系统实时调整 PI 参数。通过 MATLAB/Simulink 平台仿真, 并与传统 PI 控制进行比较。研究结果表明: 相比与传统 PI 控制, 该控制方法下有效的提升了变换器在 Buck、Boost 模式下的动态性能。

**关键词:** 三电平双向 DC/DC 变换器; PWM 调制; 开关网络平均; 双闭环控制; 模糊 PI 控制

## 0 引言

三电平直流变换器的研究早已更加深入, 并在广泛的领域得到应用<sup>[1,2]</sup>。在不同工况下, 三电平双

向变换器会选择不同的控制器。通常, 控制器分为电压型和电流型两种<sup>[3-7]</sup>。电压型控制又称电压单闭环控制, 结构简单、响应快且成本低, 缺点是对负载特性依赖较强、无法直接控制电流、抗干扰能力较弱, 功能也相对有限<sup>[8]</sup>。电压电流型控制弥补了电压单闭环控制的不足, 且该控制模式下由于电流控制环能够快速限制电流, 避免大电流对元器件的冲击, 系统的可靠性更高且动态性能。

三电平双向 DC/DC 变换器工作时, 高压侧的两个支撑电容容易出现电压分压不均的问题, 可能导致开关管承受的电压应力超过其耐压值, 因此需要采取均压控制策略。阮新波教授提出了基于 PI 控制器的均压控制方法, 通过跟踪电容电压或其和的一半来解决电容偏压问题, 但未给出 PI 参数的推导依据<sup>[9]</sup>。吴健教授提出了基于电容电荷守恒和伏秒平衡的均压控制策略, 通过采样电容电压和电感电流来调整上下桥臂的占空比<sup>[10]</sup>, 而梅杨教授提出了基于模型预测的均压控制, 通过使两电容工作频率一致来解决偏压问题, 但实现较为复杂<sup>[11]</sup>。

文献[12]利用模糊 PID 控制车载交错并联双向 DC/DC 变换器, 有效抑制了控制器内参数变化和外部干扰的影响, 提高了控制器的稳定性。文献[13]则运用电压电流双闭环控制交错并联双向 DC/DC 变换器, 以增强变换器的动态和稳态特性。另外, 文献[14]将模糊控制引入车载双向 DC/DC 变换器中, 使其具有快速响应特性。

本文在这些研究的基础上, 将电压电流双闭环控制和模糊 PI 控制结合应用于三电平双向 DC/DC 变换器, 旨在通过模糊 PI 控制提升变换器动态性能, 同时兼顾了高压侧母线分压电容的均衡控制。

## 1 双向三电平 DC/DC 变换器调制策略及建模分析

双向三电平 DC/DC 变换器电路结构如图 1 所

示,  $C_1$ 、 $C_2$  是均分母线电压  $U_H$  的分压电容,  $L$  和  $C_L$  构成低压侧滤波电路,  $VT_1 \sim VT_4$  为功率开关管。能量流动从  $U_L$  到  $U_H$  侧为 Boost 模式, 通常为放电模式, 相反则为充电状态的 Buck 模式。在放电模式下,  $VT_2$  和  $VT_3$  作为主控开关管, 充电模式下,  $VT_1$  和  $VT_4$  作为主控管。 $VT_1$  与  $VT_2$  互补导通、 $VT_3$  与  $VT_4$  互补导通。

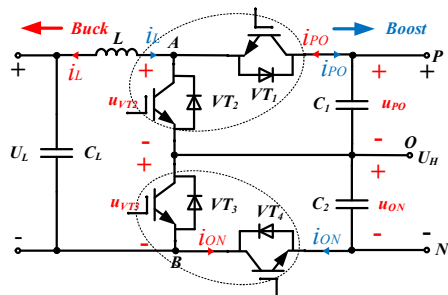


图 1 三电平双向 DC/DC 变换器

Fig. 1 Topology of the Three-Level Bidirectional DC/DC Converter

### 1.1 调制策略分析

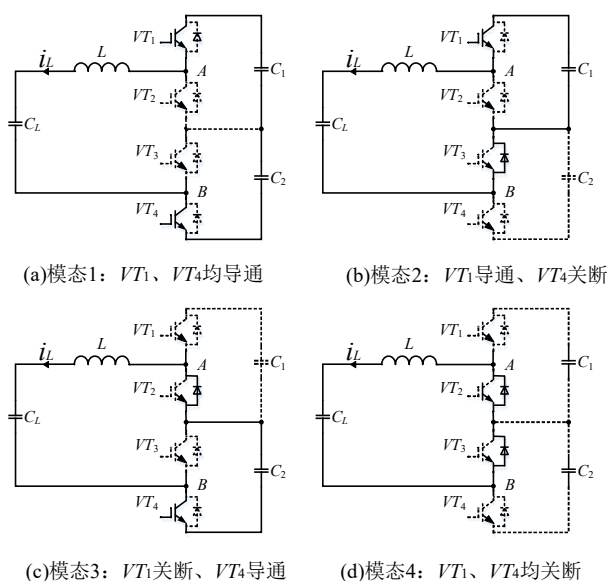


图 2 变换器开关切换模式

Fig. 2 Switching Modes of the Converter

根据  $VT_1 \sim VT_4$  的工作状态, 变换器在 Buck 和 Boost 模式下, 有且仅有以上四种工作模式。为了保证换流时开关损耗尽可能小, 每一次换流只改变一个开关管的状态, 避免(a)(d)模式直接切换、(b)(c)模式直接切换。因此, 最简的切换组合有且仅有如表 1 所示 6 种。

同时要考虑中点电位平衡问题, 一个开关周期内不能只存在(b)状态或者只存在(c)状态, 否则在一个周期内只对  $C_1$  或只对  $C_2$  放电, 造成  $C_1$  和  $C_2$  电压不平衡, 排除组合(5)、(6)仅有(b)(c)模式的切换

组合。

表 1 变换器开关模式组合

Table 1 Combinations of Converter Switching Modes

|     |                 |     |                 |
|-----|-----------------|-----|-----------------|
| (1) | (a)→(b)→(a)→(c) | (2) | (d)→(b)→(d)→(c) |
| (3) | (a)→(b)→(d)→(c) | (4) | (d)→(b)→(a)→(c) |
| (5) | (a)→(b)→(d)→(b) | (6) | (a)→(c)→(d)→(c) |

将组合 1、2 中的(c)模式持续时间均分两份, 分别放在一个开关周期的开始和结束, 全周期构成中心对称。为平衡  $C_1$  和  $C_2$  的电压, (b)(c)模式的持续时间要相等。两种组合切换过程和开关状态如表 1、2 所示。

表 2 组合 (1) 开关状态

Table 2 State of Switches in Combination (1)

| 图                                                                     | (c)     | (a)           | (b)     | (a)           | (c)     |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| $S_1$                                                                 | 0       | 1             | 1       | 1             | 0       |
| $S_2$                                                                 | 1       | 0             | 0       | 0             | 1       |
| $t_{s12}$                                                             | $t_1/2$ |               | $t_2$   |               | $t_1/2$ |
| $S_3$                                                                 | 0       | 0             | 1       | 0             | 0       |
| $S_4$                                                                 | 1       | 1             | 0       | 1             | 1       |
| $t_{s34}$                                                             | $t_1/2$ | $(t_2-t_1)/2$ | $t_1$   | $(t_2-t_1)/2$ | $t_1/2$ |
| $U_{ab}$                                                              | $U_H/2$ | $U_H$         | $U_H/2$ | $U_H$         | $U_H/2$ |
| Buck 状态: 主开关 ( $VT_1$ 、 $VT_4$ )    Boost 状态: 主开关 ( $VT_2$ 、 $VT_3$ ) |         |               |         |               |         |
| 占空比: $d=(1-t_2)/T$ $0.5 < d < 1$ 占空比: $d=t_1/T$ $0 < d < 0.5$         |         |               |         |               |         |

表 3 组合 (2) 开关状态

Table 3 State of Switches in Combination (2)

| 图                                                                     | (c)     | (d)           | (b)     | (d)           | (c)     |
|-----------------------------------------------------------------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| $S_1$                                                                 | 0       | 0             | 1       | 0             | 0       |
| $S_2$                                                                 | 1       | 1             | 0       | 1             | 1       |
| $t_{s12}$                                                             | $t_2/2$ |               | $t_1$   |               | $t_2/2$ |
| $S_3$                                                                 | 0       | 1             | 1       | 1             | 0       |
| $S_4$                                                                 | 1       | 0             | 0       | 0             | 1       |
| $t_{s34}$                                                             | $t_1/2$ | $(t_2-t_1)/2$ | $t_1$   | $(t_2-t_1)/2$ | $t_1/2$ |
| $U_{ab}$                                                              | $U_H/2$ | 0             | $U_H/2$ | 0             | $U_H/2$ |
| Buck 状态: 主开关 ( $VT_1$ 、 $VT_4$ )    Boost 状态: 主开关 ( $VT_2$ 、 $VT_3$ ) |         |               |         |               |         |
| 占空比: $d=t_1/T$ $0 < d < 0.5$ 占空比: $d=(1-t_1)/T$ $0.5 < d < 1$         |         |               |         |               |         |

通过上表分析, 可以清晰的看到调制载波呈等腰三角形, 其中  $t_1+t_2=T$ , 即说明每种状态下主开关导通时间互补, 若调制信号相同, 则载波相差  $180^\circ$ , 若载波相同, 调制信号的和为 1。

Buck、Boost 状态下 PWM 调制波形如图 3 所示, PWM 在调制信号小于载波时为高电平。

### 1.2 三电平 DC/DC 变换器数学模型

本文基于开关网络平均法, 分别建立 Buck 状态和 Boost 状态下的小信号模型。

#### 1.2.1 Buck 状态建模

如图 1 所示, Buck 状态下能量从  $U_H$  流向  $U_L$  侧,  $VT_1$  和  $VT_4$  为主控开关。在  $VT_1$ 、 $VT_2$  构成的开关网络中, 输出端变量为  $i_L$  和  $u_{VT2}$ , 输入变量为  $i_{PO}$  和  $u_{PO}$ , 状态变量为  $C_1$  电压  $u_{PO}$  和电感电流  $i_L$ , 当



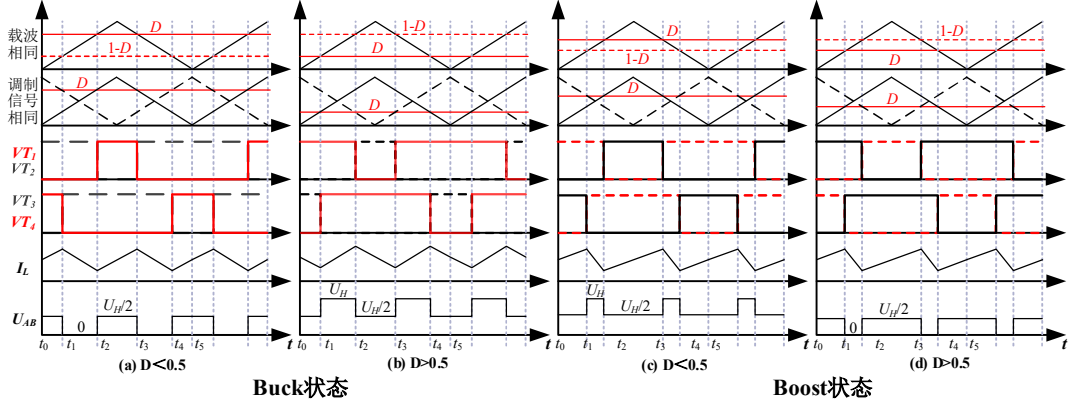


图 3 Buck、Boost 状态下 PWM 调制波形

Fig. 3 PWM Modulation Waveforms in Buck and Boost States

开关管  $VT_1$  导通时,  $u_{VT2}=u_{PO}$ ,  $i_{PO}=i_L$ ; 当开关管  $VT_1$  关断时,  $u_{VT2}=0$ ,  $i_{PO}=0$ 。同理可得由  $VT_3$ 、 $VT_4$  构成开关网络的关系式, 使用开关周期内平均值进行计算, 可以得到 Buck 状态下的小信号模型:

$$\begin{cases} \hat{u}_{VT_2}(t) = D_1 \hat{u}_{PO}(t) + U_{PO} \hat{d}_1 \\ \hat{u}_{VT_3}(t) = D_2 \hat{u}_{ON}(t) + U_{ON} \hat{d}_2 \\ \hat{i}_{PO}(t) = D_1 \hat{i}_L(t) + I_L \hat{d}_1 \\ \hat{i}_{ON}(t) = D_2 \hat{i}_L(t) + I_L \hat{d}_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $d_1$ ,  $d_2$  分别为  $VT_1$ 、 $VT_4$  的占空比。

变换器在 Buck 状态下的交流小信号模型等效电路如图 4 所示。

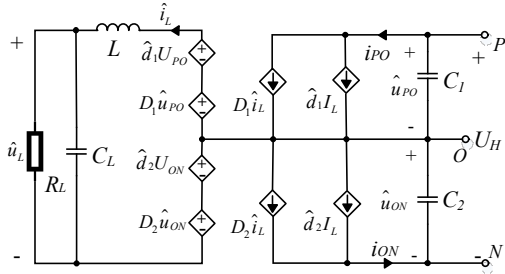


图 4 Buck 状态下交流小信号模型

Fig. 4 Small-Signal AC Model in Buck State

由上述小信号模型, 可得到 Buck 状态下低压侧电压到电感电流和电感电流到主开关占空比之和的传递函数分别为:

$$G_{u_L i_L}(s) = \frac{\hat{u}_L(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{R_L}{R_L C_L s + 1} \quad (2)$$

$$G_{i_L d_{um}}(s) = \frac{U_H (R_L C_L s + 1)}{2(R_L L C_L s^2 + L s + R_L)} \quad (3)$$

### 1.2.2 Boost 状态建模

如图 1 所示, Boost 模式下能量从  $U_L$  流向  $U_H$  侧,  $VT_2$  和  $VT_3$  为主控开关。在  $VT_1$ 、 $VT_2$  构成的开关网络中, 输出端变量为  $i_{PO}$  和  $u_{PO}$ , 输入变量为  $i_L$  和  $u_{VT2}$ , 状态变量为  $C_1$  电压  $u_{PO}$  和电感电流  $i_L$ , 当

开关管  $VT_2$  导通时,  $u_{VT2}=0$ ,  $i_{PO}=0$ ; 当开关管  $VT_2$  关断时,  $u_{VT2}=u_{PO}$ ,  $i_{PO}=i_L$ 。使用开关周期内平均值进行计算, 可以得到 Boost 模式下的小信号模型:

$$\begin{cases} \hat{u}_{VT_2}(t) = D_1' \hat{u}_{PO} - \hat{d}_1 U_{PO} \\ \hat{u}_{VT_3}(t) = D_2' \hat{u}_{ON} - \hat{d}_2 U_{ON} \\ \hat{i}_{PO}(t) = D_1' \hat{i}_L - \hat{d}_1 I_L \\ \hat{i}_{ON}(t) = D_2' \hat{i}_L - \hat{d}_2 I_L \end{cases} \quad (4)$$

变换器在 Buck 状态下的交流小信号模型等效电路如图 5 所示。

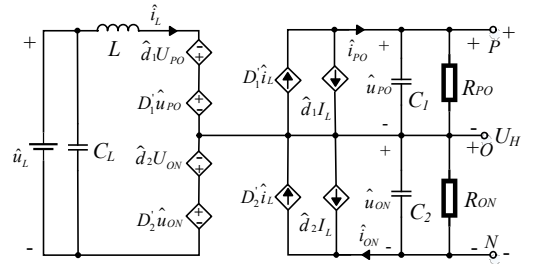


图 5 Boost 状态下交流小信号模型

Fig. 5 Small-Signal AC Model in Boost State

由上述小信号模型, 可得到 Boost 状态下高压侧电容电压之和到电感电流和电感电流到占空比之和的传递函数分别为:

$$G_{u_H i_L}(s) = \frac{4U_H (D_1' Z_{PO} + D_2' Z_{ON}) - 2I_L L s (Z_{PO} + Z_{ON})}{4U_H + I_L (Z_{PO} + Z_{ON}) (D_1' + D_2')} \quad (5)$$

$$G_{i_L d_{um}}(s) = \frac{2I_L (D_1' Z_{PO} + D_2' Z_{ON}) + U_{dc}}{2(Ls + D_1'^2 Z_{PO} + D_2'^2 Z_{ON})} \quad (6)$$

## 2 双闭环控制和模糊 PI 控制器设计

针对三电平双向 DC/DC 变换器的特点, 不仅要确保输出电压的稳定, 还需维持高压侧母线分压电容的电压均衡, 特别是在高压侧双极母线挂载的负载不平衡时。本文提出一种双环控制策略, 包括母线电压控制环路和均压控制环路, 控制环路框图如图所示。

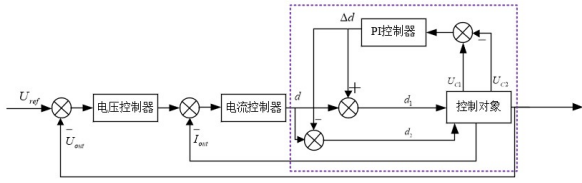


图 6 双闭环控制框图

Fig. 6 Dual Closed-Loop Control Block Diagram

## 2.1 双闭环控制器设计

如图 6 所示，母线电压控制环路采用经典的电压电流双闭环控制策略。电压外环负责维持输出电压稳定；电流内环则负责快速跟踪电流指令，同时限制电流在安全范围内。在电流环输出之后，还需叠加均压控制指令，均压环节通过实时跟踪两个分压电容电压差。

## 2.2 模糊 PI 控制器设计

将模糊控制施加于双闭环控制的电压外环，通过模糊控制实时调整电压外环 PI 控制器中的 PI 参数。

### 2.2.1 论域及隶属函数

选定输入输出量的论域范围为 $[-3,3]$ 。模糊语言选用已被广泛使用的词汇：负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。

本文聚焦于 DC/DC 变换器，输出电压值对系统的正常运行有着重要的影响，所以期望有较敏感的感知对外界的变化进行及时响应。故本文选择隶属函数为三角形，其表达式为：

$$f(x,a,b,c)=\begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & c < x \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2.2 模糊规则库设计

模糊规则库的设计是模糊控制系统中至关重要的一部分，它决定了模糊控制器如何根据输入变量的模糊化值来生成适当的输出。设计模糊规则库时，需要综合考虑控制对象的动态特性，以确保控制系统的性能满足要求。本文针对 DC/DC 变换器展开研究，欠阻尼振荡是其输出电压的常见波形<sup>错误！未找到引用源。</sup>。其几乎包含了所有动态特性，可基于此波形进行分析并设计。根据以上分析结合 PI 参数特性可以得到模糊 PI 控制的模糊规则库如表 4 和 5 所示。

表 4 比例系数增量模糊规则库

Table 4 Incremental Fuzzy Rule Base for Proportional Coefficients

| $e$ | $ec$ |    |    |    |    |    |    |
|-----|------|----|----|----|----|----|----|
|     | NB   | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB  | PB   | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| NM  | PB   | PB | PM | PS | PS | ZO | NS |
| NS  | PM   | PM | PM | PS | ZO | NS | NM |
| ZO  | PM   | PM | PS | ZO | NS | NM | NM |
| PS  | PS   | PS | ZO | NS | NS | NM | NM |
| PM  | PS   | ZO | NS | NM | NM | NM | NB |
| PB  | ZO   | ZO | NS | NM | NM | NB | NB |

表 5 积分系数增量模糊控制库

Table 5 Incremental Fuzzy Control Library for Integral Coefficients

| $e$ | $ec$ |    |    |    |    |    |    |
|-----|------|----|----|----|----|----|----|
|     | NB   | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB  | NB   | NB | NM | NM | NS | ZO | ZO |
| NM  | NB   | NB | NM | NS | NS | ZO | ZO |
| NS  | NB   | NM | NS | NS | ZO | PS | PS |
| ZO  | NM   | NM | NS | ZO | PS | PM | PM |
| PS  | NM   | NS | ZO | PS | PS | PM | PB |
| PM  | ZO   | ZO | PS | PS | PM | PB | PB |
| PB  | ZO   | ZO | PS | NM | PM | PB | PB |

## 3 仿真分析

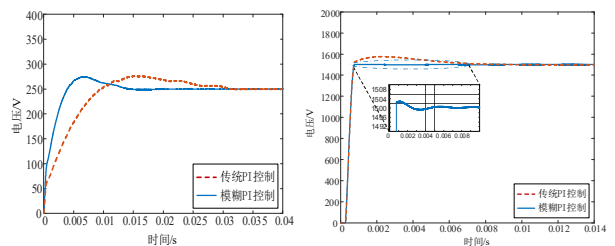
为验证上述方法的有效性，采用本文提出的控制方法控制三电平双向 DC/DC 变换器。分别在 Buck、Boost 模式下进行仿真分析，变换器及仿真参数如表 6 所示。

表 6 仿真参数

Table 6 Simulation Parameter

| 参数名称 | 输入电压 /V | 输出电压 /V   | 开关频率 /kHz | 电感 /mH | 电容 /uF |
|------|---------|-----------|-----------|--------|--------|
| 参数值  | 250     | $\pm 750$ | 20        | 1.5    | 22     |

图 7(a)为变换器在 Buck 模式下输出电压对比图，由图可知：相比于传统 PI 控制，模糊 PI 控制下的变换器输出电压上升时间快了 4ms。峰值时间快了约 9ms，超调量维持平衡，稳态时间快了约 15ms。表明其上升更快且达到稳态时间更短。



(a) Buck 模式

(b) Boost 模式

图 7 输出电压对比

Fig. 7 Boost mode output voltage comparison

图 7(b)为变换器在 Boost 模式下输出电压对比

图, 由图可知: 模糊 PI 控制与传统 PI 控制有着相同上升时间, 但模糊控制几乎没有超调量且达到稳态的时间更短。

## 4 总结

本文针对三电平双向 DC/DC 变换器传统 PI 控制动态性能差的问题, 提出了基于模糊 PI 控制方法。首先, 分析了变换器的调制策略, 并建立了在 Buck 和 Boost 状态下的小信号数学模型。然后, 根据数学模型设计了双闭环控制器, 其中电压外环采用模糊控制实时调整 PI 参数。最后, 通过 MATLAB/Simulink 平台仿真验证, 结果表明, 该控制方法相比传统 PI 控制, 在上升时间、峰值时间、调节时间、超调量等方面具有明显改善。

## 参考文献

- [1] 和金朋, "三电平超级电容储能变换器非线性复合控制策略研究," 硕士, 2019. [Online]. Available: He, P., "Research on Nonlinear Composite Control Strategy of Three-Level Supercapacitor Energy Storage Converter," Master's thesis, 2019. [Online]. Available:
- [2] 赵晨栋, "复合能量源电动汽车用双向三电平 DC-DC 变换器研究," 硕士, 2018. [Online]. Available: Zhao, C., "Research on Composite Energy Source Electric Vehicle Bidirectional Three-Level DC-DC Converter," Master's thesis, 2018. [Online]. Available:
- [3] 刘遥, "低地板车中双向 DC-DC 变换器的研究," 硕士, 2016. [Online]. Available: Liu, Y., "Research on Bidirectional DC-DC Converter in Low-Floor Vehicles," Master's thesis, 2016. [Online]. Available:
- [4] 罗咏, "双向 DC/DC 变换器及电池能量管理系统研究," 硕士, 2013. [Online]. Available: Luo, Y., "Research on Bidirectional DC/DC Converter and Battery Energy Management System," Master's thesis, 2013. [Online]. Available:
- [5] 马运东, "直流变换器的三电平拓扑及其控制," 博士, 2003. [Online]. Available: Ma, Y., "Three-Level Topology and Its Control of DC Converters," Ph.D. dissertation, 2003. [Online]. Available:
- [6] 汪铭, "用于储能系统的多重化双向 DC/DC 变换器的研究," 硕士, 2014. [Online]. Available: Wang, M., "Research on Multiphase Bidirectional DC/DC Converter for Energy Storage System," Master's thesis, 2014. [Online]. Available:
- [7] 张伟伟, "交直流混合微网三电平变换器控制研究," 硕士, 2015. [Online]. Available: Zhang, W., "Research on Control of Three-Level Converter in AC/DC Hybrid Microgrid," Master's thesis, 2015. [Online]. Available:
- [8] 周国华, 冷敏瑞, 李媛, 田庆新, and 邓伦博, "开关变换器及其控制环路的建模综述," *中国电机工程学报*, vol. 40, no. 01, pp. 183-199+386, 2020, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.182603. Zhou, G., Leng, M., Li, Y., Tian, Q., and Deng, L., "A Review on Modeling of Switching Converters and Their Control Loops," *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, vol. 40, no. 01, pp. 183-199+386, 2020, doi: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.182603.
- [9] 危健, 阮新波, 薛雅丽, "非隔离三电平变换器中分压电容均压的一种方法," *中国电机工程学报*, no. 10, pp. 27-31, 2003. [Online]. Available: Wei, J., Ruan, X., and Xue, Y., "A Method for Voltage Balancing of Capacitors in Uninsulated Three-Level Converters," *Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering*, no. 10, pp. 27-31, 2003. [Online]. Available:
- [10] 徐国金, "中压电池充放电设备的控制系统研究," 硕士, 2014. [Online]. Available: Xu, G., "Research on Control System of Medium Voltage Battery Charging and Discharging Equipment," Master's thesis, 2014. [Online]. Available:
- [11] Y. Mei, X. Li, and Y. Qi, "A model predictive control method for three-level bi-directional DC-DC converter in renewable generation system," in *2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 25-28 Oct. 2015 2015, pp. 417-421, doi: 10.1109/ICEMS.2015.7385070.
- [12] 石俊 and 吴华杰, "用于混合动力汽车的双向 DC/DC 变换器控制设计," *火力与指挥控制*, vol. 43, no. 04, pp. 117-121, 2018. [Online]. Available: Shi, J. and Wu, H., "Control Design of Bidirectional DC/DC Converter for Hybrid Electric Vehicles," *Fire Control & Command Control*, vol. 43, no. 04, pp. 117-121, 2018. [Online]. Available:
- [13] 周美兰, 刘洋, 黄锋涛, and 吴晓刚, "电动汽车辅助动力系统双向 DC/DC 变换器," *电机与控制学报*, vol. 24, no. 11, pp. 73-81, 2020, doi: 10.15938/j.emc.2020.11.009. Zhou, M., Liu, Y., Huang, F., and Wu, X., "Bidirectional DC/DC Converter for Electric Vehicle Auxiliary Power System," *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. 24, no. 11, pp. 73-81, 2020, doi: 10.15938/j.emc.2020.11.009.
- [14] 崔雪, 郑翔, 穆佩红, and 高雅洁, "基于模糊控制的电动车双向 DC-DC 变换器研究," *电测与仪表*, vol. 51, no. 14, pp. 79-82, 2014. [Online]. Available: Cui, X., Zheng, X., Mu, P., and Gao, Y., "Research on Bidirectional DC-DC Converter of Electric Vehicles Based on Fuzzy Control," *Electric Measurement & Instrumentation*, vol. 51, no. 14, pp. 79-82, 2014. [Online]. Available:

收稿日期: 2024-06-15。

作者简介:

任泉(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动, renquan8362@163.com;

韩杨(1982), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为交直流微电网、有源配电网、电能质量、可再生能源系统并网变流器等, hanyang@uestc.edu.cn;

陈佳豪(2001), 男, 本科生, 研究方向为电力电子与电力传动, chjiahao2001@163.com



任泉

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制

任 泉, 韩 杨, 曾 浩

电子科技大学

## An Adaptive Droop Control of DC Microgrid Based on Current Consensus Algorithm

REN Quan, HAN Yang, ZENG Hao

(University of Electronic Science and Technology of China)

**ABSTRACT:** In the DC microgrid, the traditional droop control will have the contradiction that when the power is divided evenly and the bus voltage control cannot be considered at the same time. At present, the strategies used to improve this contradiction mostly adopt centralized control, which is highly dependent on communication and the system stability is low. To address these problems, a DC microgrid adaptive droop control based on current consensus algorithm is proposed. This strategy includes primary, secondary and current consistency control. The introduction of capacitor voltage and inductor current feedback constitutes primary control, and reference voltage compensation and droop coefficient correction constitute secondary control. Moreover, each distributed power source only exchanges current information between adjacent converters. Through the iterative control of current consistency and the combination of primary and secondary control, the DC bus voltage deviation is eliminated while ensuring the output power is equally divided. In order to verify the control effect of the strategy, a DC microgrid model is established in PLECS for multi-scenario simulation verification. The results show that the strategy can effectively complete the DC microgrid power sharing and bus voltage control goals.

**KEY WORDS:** DC microgrid; current consistency; adaptive droop control; bus voltage control; power sharing

**摘要:** 在直流微网中, 传统下垂控制会出现功率均分、母线电压控制不能同时兼顾的矛盾。目前用来改善这对矛盾的策略多采用集中式控制, 对通讯依赖度高, 系统稳定性不高。针对这两个问题, 提出基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制, 该策略包括一次、二次和电流一致性控制。引入电容电压、电感电流反馈构成一次控制, 参考电压补偿和下垂系数修正构成二次控制。各分布式电源仅相邻变换器交换电流信息, 通过电流一致性迭代控制和一次、二次控制结合, 在同时保障输出功率均分的同时, 消除了直流母线电压偏差。为验证该策略的控制效果, 在 PLECS 中建立了直流微网模型进行多场景仿真验证。结果表明所述策略可以有效地完成直流微网功率均分和母线电压控制目标。

**关键词:** 直流微网; 电流一致性; 自适应下垂控制; 母线电压控制; 功率均分

## 0 引言

直流微电网比交流微电网的优势更突出, 其更加容易整合光伏、风电等清洁能源, 其效率更高、损耗更小, 不需要考虑相位、频率和无功问题, 控制相对简单, 目前得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

在直流微电网的控制中, 传统的下垂因其固定下垂系数导致其有明显的局限性, 在保证功率分配精度时并不能维持直流母线电压, 需要用补偿的方法进行改进<sup>[5]</sup>。文献[6]在传统下垂控制的基础上, 设计了具有下垂系数自适应调节补偿的下垂控制器, 在一定程度上改善了下垂控制的固有矛盾。文献[7]提出一种带母线电压多级前馈补偿的直流微网分段线性下垂控制策略, 通过设置下垂系数和进行母线电压多级前馈补偿, 解决了均流与母线电压跌落问题。文献[8]提出基于自适应下垂特性的功率精确分配策略和直流母线电压无偏差控制策略, 且在功率分配策略中考虑了本地负荷的影响。

除了下垂控制, 一致性控制具有高效率, 高容错性和内在的并行性等优点, 目前已经应用于许多研究中<sup>[9-11]</sup>。一致性控制在通信结构变化的情况下仍能完成相应控制任务<sup>[12]</sup>。文献[13]提出基于有限时间一致性的分布式控制策略, 基于多代理系统、分布式交互协议实现电流信息交换, 完成电流比例分配和电压协同调节。文献[14]提出一种基于多代理一致性的能量动态协调与功率精确控制的策略, 可以有效地协调功率的精确控制与底层的自治运行。

目前已有这些控制器以集中式控制器为主, 对通信依赖度高, 系统的稳定性不高。本文在现有下垂控制和一致性控制研究基础上, 提出了基于电流一致性的直流微网自适应下垂控制。所提出策略在



保障功率均分的前提下，消除了直流母线电压偏差，同时电流一致性算法采用分布式控制思想，克服了集中式控制的缺点。最后通过 PLECS 仿真平台验证了所提控制策略的有效性，证明所提方法适用于多变流器拓扑结构直流微网。

## 1 传统下垂控制

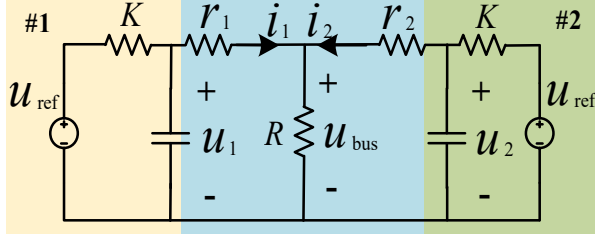


图 1 双 BOOST 变换器并联等效电路  
Fig. 1 Parallel equivalent circuit of double BOOST converter

图 1 所示为在传统下垂控制下两个变换器并联组成的直流微电网等效电路。其中  $K$ 、 $r_1$  和  $r_2$  分别表示下垂系数、#1 变换器和 #2 变换器线路阻抗； $i_1$  和  $i_2$  表示 #1 变换器和 #2 变换器的输出电流； $u_1$  和  $u_2$  表示 #1 变换器和 #2 变换器的输出电容电压； $u_{ref}$  表示参考电压； $u_{bus}$  和  $R$  表示母线电压和负载。

由图 1 的等效电路可得到直流微电网等效电路的电压电流下垂特性表达式 (1)：

$$\begin{cases} u_{ref} = u_{bus} + (K + r_1)i_1 \\ u_{ref} = u_{bus} + (K + r_2)i_2 \end{cases} \quad (1)$$

根据式 (1)，在保障母线电压控制精度的同时，想要达到功率均分（满足  $i_1 = i_2$ ），必须保证公式 (2) 的条件成立。

$$(K + r_1) = (K + r_2) \quad (2)$$

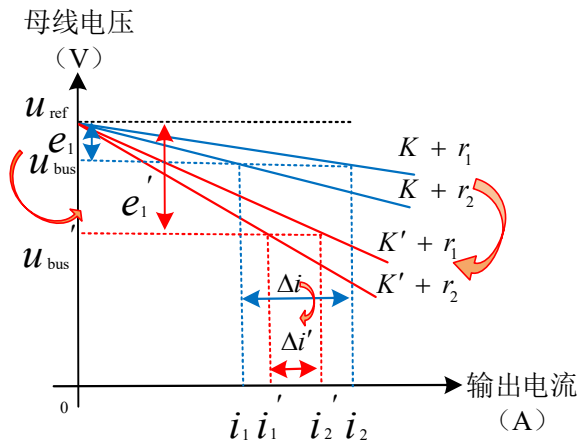


图 2 电压-电流下垂特性曲线  
Fig. 2 Voltage-current droop characteristic curve

但是由于线路阻抗  $r_1$  和  $r_2$  必然会存在一定的差

异，所以传统下垂控制并不能同时兼顾母线电压控制和功率均分控制。

图 2 的电压-电流下垂特性曲线进一步说明了传统下垂控制的局限性。如图 2， $e_1$ 、 $u_{bus}$ 、 $i_1$ 、 $i_2$  表示在下垂系数为  $K$  时的直流母线电压偏差、母线电压、#1 变换器输出电流、#2 变换器输出电流。 $r_1$  和  $r_2$  表示 #1 变换器和 #2 变换器输出线路阻抗。

由此说明，传统下垂控制可以在一定程度上提高功率均分效果，但是也会降低母线电压控制精度，这种控制并不能同时兼顾母线电压控制和功率均分控制。

## 2 基于电流一致性直流微网自适应下垂控制

### 2.1 自适应下垂控制

针对传统下垂控制所表现出的功率均分和母线电压控制固有矛盾，在传统下垂控制的基础上进行改进，并且把双变换器控制推广到多变换器控制结构。在式 (2) 中，由于线路阻抗  $r_1$  和  $r_2$  的差异性，等式 (2) 无法成立，如果在等式两边各添加一个合适的下垂系数修正量  $\Delta K_1$  和  $\Delta K_2$ ，等式 (2) 可以成立，从而达到功率均分的效果。

推广到多变换器组成的微电网，需要分别增加下垂系数修正量  $\Delta K_1$ 、 $\Delta K_2 \dots \Delta K_i$ 。在公式 (1) 基础上，推广到多变换器，分别添加下垂系数修正量得到公式 (3)，下标  $i$  表示第  $i$  个直流变换器的参数。

$$\begin{aligned} u_{ref} &= u_{bus} + (K + \Delta K_1 + r_1)i_1 \\ u_{ref} &= u_{bus} + (K + \Delta K_2 + r_2)i_2 \\ &\dots \end{aligned} \quad (3)$$

$$u_{ref} = u_{bus} + (K + \Delta K_i + r_i)i_i$$

调节各变换器下垂系数修正量  $\Delta K_i$  的大小，能够达到电流均分效果。据公式 (4)，由于下垂系数和线路阻抗的存在，必然会导致  $u_{ref} > u_{bus}$ ，即会存在母线电压稳态误差。

如果适当提高参考电压  $u_{ref}$ ，用提高部分的电压去补偿虚拟阻抗和线路阻抗的损耗，这样便可以在保障功率均分的同时保障母线电压控制精度。参考电压补偿量的大小满足式 (4)，其中下标  $i$  表示第  $i$  个变换器的电路控制参数。

$$\begin{cases} \Delta u_1 = (K + \Delta K_1 + r_1)i_1 \\ \Delta u_2 = (K + \Delta K_2 + r_2)i_2 \\ \dots \\ \Delta u_i = (K + \Delta K_i + r_i)i_i \end{cases} \quad (4)$$

自适应下垂控制是经过 PI 控制器自适应寻找

参考电压补偿量和下垂系数修正量。经过自适应下垂控制对传统下垂控制进行适当补偿后,能在保障

功率均分的前提下,消除了直流母线电压偏差。

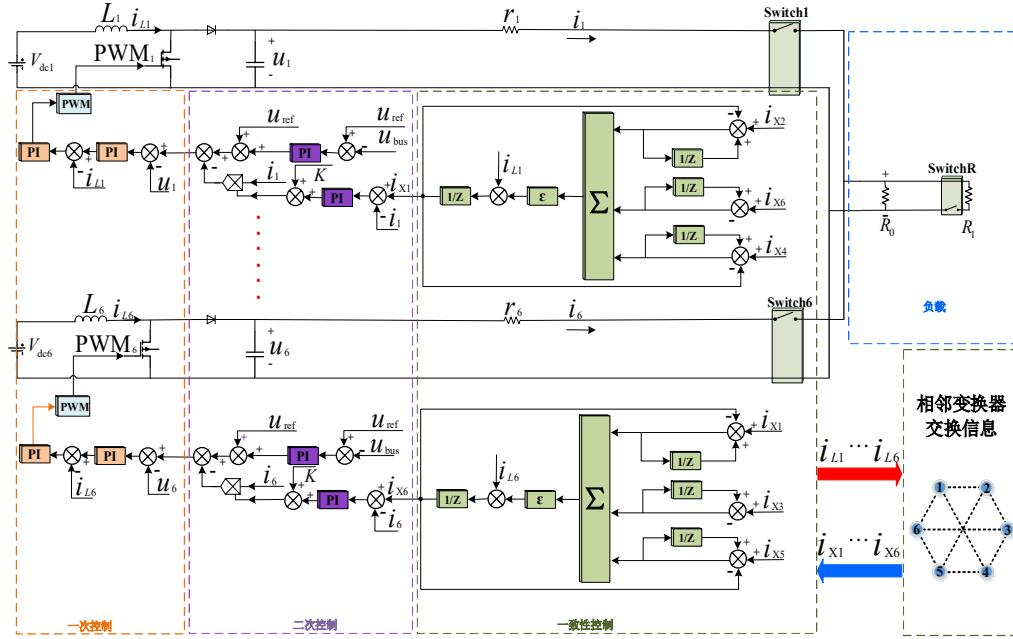


图3 直流微网电流一致性自适应控制结构

Fig. 3 Current consistency adaptive control structure of DC microgrid

## 2.2 一致性下的自适应下垂控制

直流微网电流一致性自适应控制结构如图3所示。在图3中,  $V_{dc}$  表示各变换器输入直流电压,  $L$  表示电感,  $i_L$  表示电感电流,  $u$  表示电容电压,  $r$  表示变换器输出线路阻抗,  $i$  表示输出电流,  $u_{ref}$  表示参考电压,  $u_{bus}$  表示母线电压,  $K$  表示下垂系数,  $i_x$  表示电流一致性迭代结果, 开关 Switch 可以控制各分布式电源的投切, 阻性负载  $R_0$  和  $R_1$  由开关 SwitchR 进行切换, 不同的开关组合构成了不同微网工况。变量数字下标表示第几个变换器的参数。

$$x_i(k+1) = x_i(0) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} \delta_{ij}(k+1) \quad (5)$$

$$\delta_{ij}(k+1) = \delta_{ij}(k) + a_{ij} \cdot (x_j(k) - x_i(k)) \quad (6)$$

如公式(5)、(6), 表示了如何迭代产生一个一致性目标。其中  $\delta_{ij}(k)$  表示累计误差,  $x_i(k)$  表示第  $i$  个变换器的状态变量, 作为一致性控制目标输出,  $x_i(0)$  表示第  $i$  个变换器的初始状态变量,  $\varepsilon$  表示一个与通讯拓扑有关的常数权重。其迭代过程描述为矩阵形式如下:

$$x(k+1) = W \cdot x(k) \quad (7)$$

其中状态变量  $x$  表示各变换器输出电流,  $W$  表示一个与通讯拓扑有关的权重矩阵。在考虑边缘权重  $\varepsilon$  的时候,  $W$  表达如下。

$$W = I - \varepsilon \cdot L \quad (8)$$

$L$  表示一个与通讯网络相关的拉普拉斯矩阵。 $N$  表示全部通讯网络个数。

最终, 一致性可控制迭代表达式如下所示:

$$x_{eq} = \lim_{k \rightarrow \infty} x_k = \lim_{k \rightarrow \infty} W^k x(0) = \left( \frac{1}{N} \mathbf{1} \cdot \mathbf{1}^T \right) x(0) \quad (9)$$

根据图4的一致性控制结构, 能够在交换较小的信息的前提下达到较好的收敛效果。各相邻变换器交换电流信息  $x_1 \dots x_6$ , 在每下一个采样周期进行一致性迭代, 迭代结果输出满足式(10):

$$i_{x1} = i_{x2} = \dots = i_{x6} \quad (10)$$

参考电流  $i_{x1} \dots i_{x6}$  与电流反馈量比较得到下垂系数修正控制误差, 下垂系数修正控制误差经过 PI 控制器得到下垂系数修正量  $\Delta K_1 \dots \Delta K_6$ 。参考电压补偿量通过原参考电压与母线电压反馈的误差经过 PI 控制器得到, 参考电压补偿量的大小满足式(4)。引入电流一致性控制后的下垂系数修正量克服了不同线路阻抗带来的功率不均分, 参考电压补偿量消除了母线电压稳态误差。

## 3. 仿真分析

为了验证本文控制策略对于功率均分效果和母线电压控制效果, 在 PLECS 软件仿真平台搭建了六个 BOOST 直流变换器的直流微网结构。

在 PLECS 中, 6 个 BOOST 直流变换器的线路阻抗分别选取  $1\Omega$ ,  $1.2\Omega$ ,  $1.4\Omega$ ,  $1.6\Omega$ ,  $1.8\Omega$ ,  $2\Omega$ , 六个变换器的电路参数一致。在 PLECS 中设置电流一致性控制内延迟环节来模拟电路的通讯延迟, 实验仿真取  $1\text{ms}$ 。



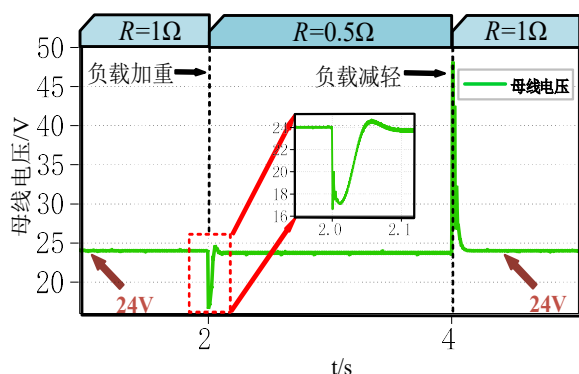


图4 负载跳变工况母线电压波形

Fig. 4 Bus voltage waveform under load jump condition

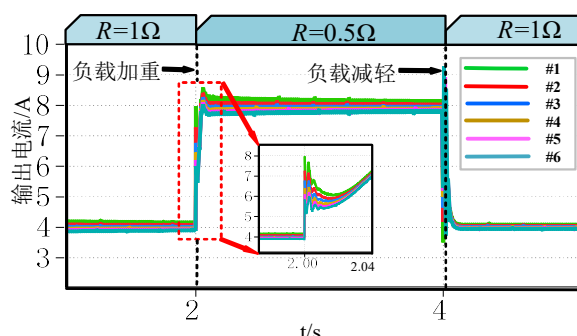


图5 负载跳变工况输出电流波形

Fig. 5 Output current waveform under load jump condition

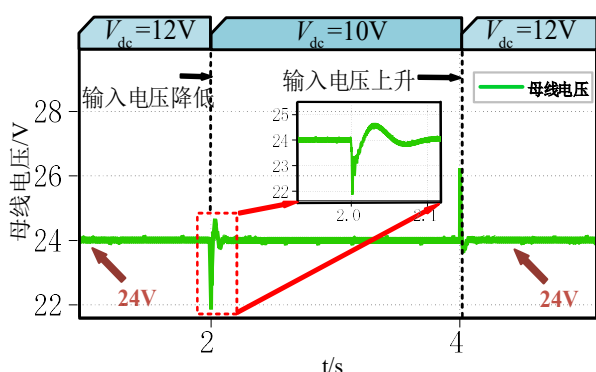


图6 输入电压跳变时母线电压波形

Fig. 6 Bus voltage waveform when input voltage jumps

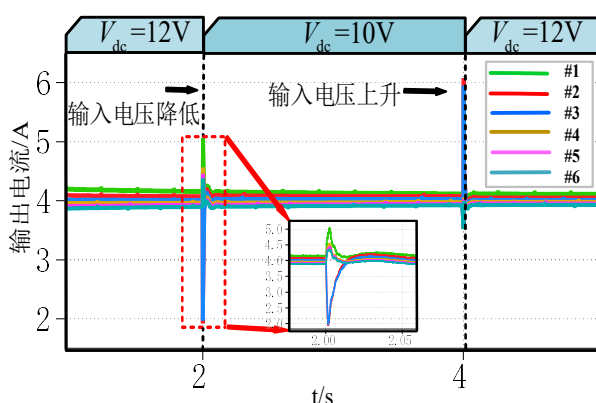


图7 输入电压跳变时输出电流波形

Fig. 7 Output current waveform when input voltage jumps

考虑负载跳变情况,如图4,直流母线上阻性

负载先由  $1\Omega$  变为  $0.5\Omega$ ,再由  $0.5\Omega$  变为  $1\Omega$ 。图3中开关 SwitchR 闭合负载加重时,母线电压电压降约 30%,经过约 0.1 秒很快调整回参考电压值,稳态误差为 0。负载减轻时,母线电压电压上升约 95%,经过约 0.1 秒调节时间,稳态误差为 0。如图5,负载跳变经过 0.1 秒后,各变换器输出电流收敛。

如图6,在部分变换器输入电压降低到 10V 以后,母线电压降低 8%左右,经过 0.1 秒的调节时间后重新达到参考电压,调节超调量 2.9%,稳态误差为零。在部分变换器输入电压重新升高到 12V 后,母线电压提升 9.4%左右,然后经过 0.1 秒的调节时间达到零稳态误差,调节超调量 1.4%。如图7,负载跳变经过 0.08 秒后,各变换器输出电流收敛。由此验证所提出的电流一致性自适应下垂控制策略能够很好地适应负载突变、输入电压变化复杂工况。母线电压经过一定的调节时间能很快达到零稳态误差。各变换器输出电流也能很快重新达到一致,实现功率均分。

## 4. 结语

本文针对传统下垂控制局限性和集中式控制对通信依赖度高、系统稳定性不高的问题,提出了基于电流一致性直流微电网自适应下垂控制策略。

1) 分析了传统下垂控制的局限性,传统下垂控制能在一定程度上提高功率均分效果,但同时存在母线电压偏差,这种控制并不能同时兼顾母线电压控制和功率均分控制。

2) 通过母线电压反馈,经过自适应控制器进行参考电压补偿,达到准确母线电压控制;各变换器输出电流一致性迭代结果通过自适应下垂控制器得到下垂系数修正量,达到准确的功率均分;

3) 仿真结果证明,所提控制策略具有良好控制效果,能适应包括负载突变、输入电压跳变复杂工况,经过一定的调节时间,母线电压能达到稳态误差为零且功率很快重新平均分配。

## 参考文献

- [1] 温家良,吴锐,彭畅,等.直流电网在中国的应用前景分析[J].中国电机工程学报,2012,32(13):7-12+185.  
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC Grid Prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(13):7-12+185.
- [2] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(01):2-17.  
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key Technologies of DC Microgrids: An Overview[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(01):2-17.

- [3] 施婕,郑漳华,艾芊.直流微电网建模与稳定性分析[J].电力自动化设备,2010,30(02):86-90.  
SHI Jie, ZHENG Zhonghua, AI Qian. Modeling of DC micro-grid and stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(02): 86-90.
- [4] 刘家赢,韩肖清,王磊,等.直流微电网运行控制策略[J].电网技术,2014,38(09):2356-2362.  
LIU Jiaying, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Operation and Control Strategy of DC Microgrid [J]. Power System Technology, 2014, 38(09): 2356-2362.
- [5] 朱珊珊,汪飞,郭慧,等.直流微电网下垂控制技术综述[J].中国电机工程学报,2018,38(01):72-84+344.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of Droop Control in DC Microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(01): 72-84+344.
- [6] 郑永伟,陈民铀,李闯,等.自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(07):6-11.  
ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. A Microgrid Control Strategy Based on Adaptive Drooping Coefficient Adjustment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(07): 6-11.
- [7] 刘宿城,吴亚伟,李中鹏,等.带母线电压多级补偿的直流微网下垂控制策略[J].电子科技大学学报,2020,49(2):248-254.  
LIU Su-cheng, WU Ya-wei, LI Zhong-peng, et al. Droop Control Strategy with Bus Multi-Level Compensation for DC Microgrid[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2020, 49(2): 248-254.
- [8] 闵海波,刘源,王仕成,等.多个体协调控制问题综述[J].自动化学报,2012,38(10):1557-1570.  
MIN Hai-Bo, LIU Yuan, WANG Shi-Cheng, et al. An Overview on Coordination Control Problem of Multi-agent System[J]. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2012, 38(10): 1557-1570.
- [9] 周烨,汪可友,李国杰,等.基于多智能体一致性算法的微电网分布式分层控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(11):142-149.  
ZHOU Ye, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Distributed Hierarchical Control for Microgrid Based on Multi-agent Consensus Algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 142-149.
- [10] 刘子文,苗世洪,范志华,等.基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J].电工技术学报,2019,34(04):795-806.  
Liu Ziwen, Miao Shihong, Fan Zhihua, et al. Accurate Power Allocation and Zero Steady-State Error Voltage Control of the Islanding DC Microgrid Based on Adaptive Droop Characteristics[J]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2019, 34(04): 795-806.
- [11] 梁海峰,丁锦睿,边吉.考虑通信延时的直流微网分组一致性控制策略研究[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版):1-9[2020-11-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20200924.1452.002.html>.  
LIANG Haifeng, DING Jinrui, BIAN Ji. Research on Control Strategy of DC Microgrids Based on Group Consensus Algorithm Considering Communication Delay[J/OL]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition): 1-9[2020-11-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20200924.1452.002.html>.
- [12] 李一琳,董萍,刘明波,等.基于有限时间一致性的直流微电网分布式协调控制[J].电力系统自动化,2018,42(16):96-103+228-230.

LI Yilin, DONG Ping, LIUMingbo, et al. Distributed Coordinated Control of DC Microgrid Based on Finite-time Consensus Algorithm. [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 96-103+228-230.

- [13] 顾伟,薛帅,王勇,等.基于有限时间一致性的直流微电网分布式协同控制[J].电力系统自动化,2016,40(24):49-55+84.  
GU Wei, XUE Shuai, WANG Yong, et al. Finite-time Consensus Based Distributed Cooperative Control for DC Microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 49-55+84.
- [14] 郝然,艾芊,朱宇超.基于多智能体一致性的能源互联网协同优化控制[J].电力系统自动化,2017,41(15):10-17+57.  
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao. Cooperation Optimal Control of Energy Internet Based on Multi-agent Consistency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 10-17+57.



任泉

收稿日期: 2024-06-15。

作者简介:

任泉(1996),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动, renquan8362@163.com;

韩杨(1982),男,教授,博士生导师,研究领域为交直流微电网、有源配电网、电能质量、可再生能源系统并网变流器等, hanyang@uestc.edu.cn;

曾浩(1998),男,硕士研究生,主要研究方向:直流微电网控制稳定性、电能质量。 HaoZeng2020@163.com

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 基于等效惯性常数的 VSG 惯量支撑能力定量分析

陈鹏飞<sup>1</sup>

(1. 安徽省新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽省 合肥市 230041)

## Quantitative analysis of VSG inertia support capacity based on equivalent inertia constant

CHEN Pengfei<sup>1</sup>

(1. Anhui Provincial Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving(Hefei University of Technology)

**ABSTRACT:** With the continuous increase in penetration rate of new energy generation, frequency stability issues are becoming increasingly prominent, and virtual synchronous generator (VSG) control that can provide inertia support has become a focus of attention. The article provides a comprehensive quantitative analysis of the inertia support capability of the inverter under VSG control. Firstly, the active power frequency response characteristics of VSG are derived, and the principle of inertia support is explained; Secondly, based on the definition of equivalent inertia constant, analyze the inertia support ability under two types of VSG control; Finally, the correctness of the theoretical analysis was verified through simulation experiments.

**KEY WORDS:** VSG control; inertia support capacity; equivalent inertia constant

**摘要:** 随着新能源发电渗透率的不断提高, 频率稳定性问题日益突出, 可提供惯量支撑的虚拟同步机(virtual synchronous generators, VSG)控制成为了关注的焦点。文中对 VSG 控制下变流器惯量支撑能力做出较为完整的定量分析, 首先推导 VSG 有功-频率响应特性, 说明其惯量支撑的原理; 其次基于等效惯性常数定义, 对两种 VSG 控制下的惯量支撑能力做出分析; 最后以仿真实验验证了理论分析的正确性。

**关键词:** VSG 控制; 惯量支撑能力; 等效惯性常数

**DOI:**

## 0 引言

近年来, 我国新能源发电占比不断增加, 电网频率稳定性问题日益突出, 虚拟同步机(virtual synchronous generators, VSG)控制由于可模拟同步发电机外特性以支撑电网频率, 得到了广泛的关注<sup>[1,2]</sup>。变流器采取 VSG 控制后, 可实现输出功率和电网频率之间的耦合, 发挥惯量支撑能力。

现有文献对于 VSG 的惯量支撑能力已做出一定研究, 揭示了其在延缓频率变化速度、减少频率

变化极值等方面的作用效果<sup>[3]-[4]</sup>, 开展了与之相关的参数整定、储能配置等各项工作<sup>[5]-[6]</sup>。但当前文献中对 VSG 惯量支撑能力的定量分析尚缺乏充分研究。对 VSG 惯量支撑能力进行定量分析, 一方面有利于优化 VSG 控制系统设计, 另一方面也有利于为电网运行调度提供参考。

定量分析 VSG 惯量支撑能力的关键是形成合适的量化指标。同步机的惯量可通过机组固有惯性常数反映, 若能定义等效惯性常数实现类似的评价效果, 则可直观表示 VSG 控制下变流器的惯量支撑能力, 易于融入现有的同步机惯量评估体系<sup>[7]</sup>。

另外, 现有各种 VSG 控制, 其原理不完全相同, 惯量支撑特性可能存在区别<sup>[8]</sup>。根据阻尼效应模拟方式的不同, 可将 VSG 控制分为动态阻尼系数和稳态阻尼系数两类<sup>[9]</sup>。稳态阻尼系数 VSG 控制下, 直驱风机将天然地体现下垂特性, 且在作用效果上与惯量支撑特性存在一定耦合, 定量分析时需要做出额外考虑。

本文基于等效惯性常数的概念, 围绕 VSG 控制下变流器惯量支撑能力的定量分析展开研究。首先推导两种 VSG 控制的有功-频率响应特性, 解释 VSG 惯量支撑原理; 接下来, 对两种 VSG 控制下变流器等效惯性常数进行计算, 分析其惯量支撑能力; 最后, 通过仿真实验验证本文分析的正确性。

## 1 VSG 有功-频率响应特性

VSG 有功控制环的核心思路是, 仿效如式(1)所示的同步机转子运动方程, 建立网侧变流器输出电压相位与并网有功功率之间的关系, 实现对同步机有功响应特性的模拟。

$$D_{SG}(\Omega_r - \Omega_s) + J_{SG} \frac{d\Omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (1)$$

式中:  $D_{SG}$  和  $J_{SG}$  分别为同步机阻尼系数和转

动惯量, 这里仅考虑电气阻尼效应。 $\Omega_r$  和  $\Omega_s$  分别为转子转速和定子磁场转速,  $T_m$  和  $T_e$  分别为机械转矩和电磁转矩。

各种类型的 VSG 控制, 在对转动惯量及其所对应惯量效应的模拟上基本相似, 区别主要体现在阻尼系数及阻尼效应的不同模拟方式。两种典型的 VSG 控制原理如图 1 所示。

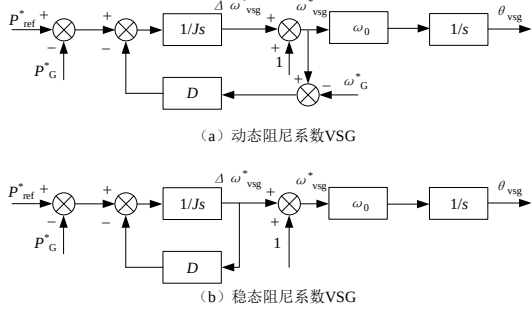


图 1 VSG 有功控制原理

Fig.1 VSG active power control principle

图中  $\omega_{vsg}$ ,  $\omega_G$ ,  $\omega_0$  分别为 VSG 输出角频率, 电网角频率, 额定角频率。二者的阻尼效应分别由  $D(\omega_{vsg}^* - \omega_G^*)$  和  $D(\omega_{vsg}^* - \omega_0^*)$  实现(\*表示标么值, 下同), 若电网频率出现扰动, 前者模拟的阻尼效应仅体现在扰动发生后 VSG 输出频率不等于电网频率的动态过程中, 而只要电网频率未恢复至额定值, 后者模拟的阻尼效应在电网频率稳定后仍然存在, 故二者的阻尼系数分别可称为动态阻尼系数和稳态阻尼系数。

直驱风机并网有功功率如式(2)所示(忽略并网输出端电阻):

$$P_G^* = (U_{vsg}^* U_G^* / X_G^*) \sin(\theta_{vsg} - \theta_G) \quad (2)$$

式中:  $U_{vsg}^*$ 、 $\theta_{vsg}$  分别为网侧变流器输出电压幅值及相角,  $U_G^*$ 、 $\theta_G$  分别为电网电压幅值及相角,  $X_G^*$  为网侧变流器输出端和并网点之间电抗。

线性化后可得到:

$$\Delta P_G^* = (U_{vsg0}^* U_{G0}^* / X_G^*) (\Delta \theta_{vsg} - \Delta \theta_G) = K_p \delta_p \quad (3)$$

$$\text{式中: } K_p = \frac{U_{vsg0}^* U_{G0}^*}{X_G^*}, \quad \delta_p = \Delta \theta_{vsg} - \Delta \theta_G.$$

进而可推导得出两种阻尼系数下 VSG 控制的有功闭环模型:

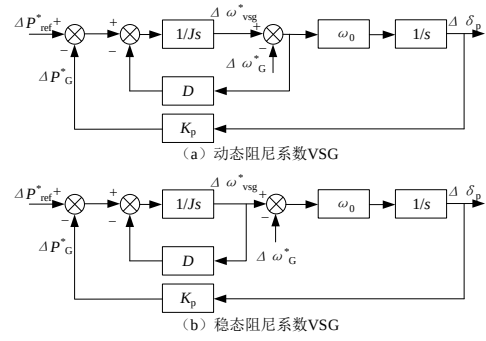


图 2 两种阻尼系数下 VSG 控制有功闭环模型

Fig.2 VSG control active power closed-loop model under two damping coefficients

计算有功功率传递函数, 对于动态阻尼系数 VSG 控制, 有:

$$\Delta P_G^*(s) = G(s)(\Delta P_{ref}^*(s) - Js\Delta\omega_G^*(s)) \quad (4)$$

式中:

$$\begin{cases} G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \\ \xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{1}{J\omega_0 K_p}} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{\omega_0 K_p}{J}} \end{cases}$$

对于稳态阻尼系数 VSG 控制, 有:

$$\Delta P_G^*(s) = G(s)(\Delta P_{ref}^*(s) - (Js + D)\Delta\omega_G^*(s)) \quad (5)$$

仅考虑电网频率变化下二者的有功输出特性, 则式(4)、(5)可分别写做:

$$\Delta P_G^*(s) = -G(s)Js\Delta\omega_G^*(s) \quad (6)$$

$$\Delta P_G^*(s) = -G(s)(Js\Delta\omega_G^*(s) + D\Delta\omega_G^*(s)) \quad (7)$$

式(6)、(7)表明: 动态阻尼系数下的功率增量由频率变化率引起, 在频率出现扰动后产生, 随频率的稳定而恢复为零; 稳态阻尼系数下的功率增量由频率变化率和频率变化量同时引起, 频率变化的过程中会产生功率增量, 且频率稳定后若与额定值存在偏差, 则功率增量最终将根据偏差大小达到相应的值。

可以理解为, 动态阻尼系数 VSG 控制, 仅具有同步机的惯量支撑作用; 稳态阻尼系数 VSG 控制, 除惯量支撑特性外还天然地具备有功-频率下垂特性, 阻尼系数与下垂系数等效。然而, 这种下垂特性与同步机通过调速器获得的下垂特性存在区别。同步机下垂特性的实现依赖于机械过程, 具有明显的延时性质。稳态阻尼系数 VSG 的下垂特性依托变流器控制实现, 在电网频率变化的过程中, 因其具有较快的响应速度, 在一定程度上还将起到类似同步机惯量支撑的效果, 于频率变化的初

始阶段产生明显的抑制作用。从作用效果来看, 稳态阻尼系数 VSG 惯量支撑和下垂特性存在耦合, 定量分析时不能忽略。

## 2 VSG 等效惯性常数计算

### 2.1 等效惯性常数的定义

同步机下垂特性的延时性质可以通过一惯性环节近似表示, 引入一惯性环节, 可构造下垂特性分量  $\Delta P_k^*$  如式(8)所示:

$$\Delta P_k^*(s) = -K_{\text{equ}} \frac{1}{Ts + 1} \Delta \omega_G^*(s) \quad (8)$$

式中:  $T$  为同步机典型下垂特性延时时间常数, 通常可取为 0.2-0.4 之间;  $K_{\text{equ}}$  为等效下垂系数, 由式(9)计算。

$$K_{\text{equ}} = -\frac{\Delta P_{\text{Gst}}^*}{\Delta \omega_{\text{Gst}}^*} \quad (9)$$

式中:  $\Delta P_{\text{Gst}}^*$ 、 $\Delta \omega_{\text{Gst}}^*$  分别为扰动发生后, 频率达到稳定偏差时的并网有功增量和频率偏差值。

以  $\Delta P_G^* - \Delta P_k^*$  得到惯量支撑分量  $\Delta P_H^*$ , 进而可得到等效惯性常数  $H_{\text{equ}\infty}$  的定义:

$$\begin{aligned} H_{\text{equ}\infty} &= \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (\Delta P_G^* - \Delta P_k^*) dt}{\omega_{G0}^{*2} - \omega_G^{*2}} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Delta P_H^* dt}{\omega_{G0}^{*2} - \omega_G^{*2}} \end{aligned} \quad (10)$$

$\Delta P_G^*$  中的  $\Delta P_H^*$ 、 $\Delta P_k^*$  两部分, 仅有  $\Delta P_H^*$  在扰动后具有较快的响应速度, 于扰动初期即产生明显作用, 起到惯量支撑的效果。以  $\Delta P_H^*$  单独计算得到的等效惯性常数  $H_{\text{equ}\infty}$ , 能够较为准确地刻画直驱风机惯量支撑能力。

$H_{\text{equ}\infty}$  对直驱风机惯量支撑能力的评价效果, 可理解为: 反映了系统频率扰动开始直至频率再次稳定的整个过程中直驱风机惯量支撑的平均效果。 $H_{\text{equ}\infty}$  在具有常数形式的同时, 也具有反映惯量支撑能力的物理意义, 可在一定程度上等效于同步机的惯性常数。

### 2.2 动态阻尼系数 VSG 等效惯性常数分析

假设扰动结束后系统频率最终稳定, 并与额定频率之间存在一个偏差值  $\delta$ , 则无论频率的实际变化过程如何, 由终值定理可知, 总有:

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \Delta \omega_G^*(s) = \delta \quad (11)$$

由上文分析可知, 动态阻尼系数 VSG 控制下的直驱风机不体现下垂特性, 在频率达到稳定偏差后无有功增量, 即  $K_{\text{equ}} = 0$ ,  $\Delta P_H^* = \Delta P_G^*$ 。由式(6)可知:

$$\Delta P_H^*(s) = -J \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} s \Delta \omega_G^*(s) \quad (12)$$

以扰动发生时刻为 0 时刻并假设扰动前频率为额定值。联立式(10)、(11)、(12), 得到动态阻尼系数 VSG 控制下直驱风机的  $H_{\text{equ}\infty}$ :

$$\begin{aligned} H_{\text{equ}\infty} &= \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} \Delta P_H^* dt}{1 - \omega_G^{*2}} \\ &= \frac{\lim_{s \rightarrow 0} \Delta P_H^*(s)}{1 - (1 + \delta)^2} = \frac{J}{\delta + 2} \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)表明, 动态阻尼系数 VSG 控制下,  $H_{\text{equ}\infty}$  受惯量系数  $J$  影响, 而与阻尼系数  $D$  无关。因电网频率波动范围一般不会过大 ( $\delta < 1$ ), 可近似认为  $H_{\text{equ}\infty}$  随  $J$  线性变化。以  $H_{\text{equ}\infty}$  表征惯量支撑能力, 可得到分析结论: 动态阻尼系数 VSG 控制下直驱风机所提供的惯量支撑能力受  $J$  决定, 增大  $J$  可令惯量支撑能力增强, 而  $D$  的改变几乎不对惯量支撑能力产生影响。

### 2.3 稳态阻尼系数 VSG 等效惯性常数分析

对于稳态阻尼系数 VSG 控制下的直驱风机, 分析中的假设条件同 2.2 节, 由式(7)、(9)、(11)可对  $K_{\text{equ}}$  进行计算:

$$K_{\text{equ}} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Delta P_G^*(t)}{\Delta \omega_G^*(t)} = \frac{\lim_{s \rightarrow 0} s \Delta P_G^*(s)}{\delta} = D \quad (14)$$

联立式(7)、(8)、(14), 可计算得到  $\Delta P_H^*$  的表达式:

$$\begin{aligned} \Delta P_H^*(s) &= \Delta P_G^*(s) - \Delta P_k^*(s) \\ &= -\frac{(JT\omega_n^2 - D)s - 2D\xi\omega_n + J\omega_n^2 + DT\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)(Ts + 1)} s \Delta \omega_G^*(s) \end{aligned} \quad (15)$$

进而联立式(10)、(11)、(15), 计算得到稳态阻尼系数 VSG 控制下直驱风机的  $H_{\text{equ}\infty}$ :

$$H_{\text{equ}\infty} = \frac{\lim_{s \rightarrow 0} \Delta P_H^*(s)}{1 - (1 + \delta)^2} = \frac{J + DT}{2 + \delta} - \frac{D^2}{\omega_0 K_p (2 + \delta)} \quad (16)$$

式(16)表明, 稳态阻尼系数 VSG 控制下,  $H_{\text{equ}\infty}$  的计算结果与惯量系数  $J$  和阻尼系数  $D$  均有关, 忽略  $\delta$  时,  $H_{\text{equ}\infty}$  随  $J$  线性变化, 随  $D$  非线性变化。以此为依据, 可认为稳态阻尼系数 VSG 控制下直驱风机所提供的惯量支撑能力同时受  $J$  和  $D$  的影响。在一般的取值范围内, 增大  $J$  或  $D$  都会使惯量支撑能力得到增强。但当  $D$  已经较大时, 继续增大  $D$  则无法有效增强惯量支撑能力, 甚至会产生弱化作用。

## 3 仿真实验



### 3.1 动态阻尼系数 VSG 等效惯性常数计算与分析

基于 PSCAD/EMTDC 程序, 搭建三机九节点系统模型, 为简化分析起见, 系统未配备二次调频功能。将其中一台同步机替换为动态阻尼系数 VSG 控制下的直驱风电场。设置仿真工况为: 系统以额定频率稳定运行时, 投入一个 50MW 扰动负荷, 使频率出现跌落, 并最终在一次调频作用下再次稳定。保持  $D$  不变, 改变  $J$  的取值, 得到响应特性曲线如图 3 所示。

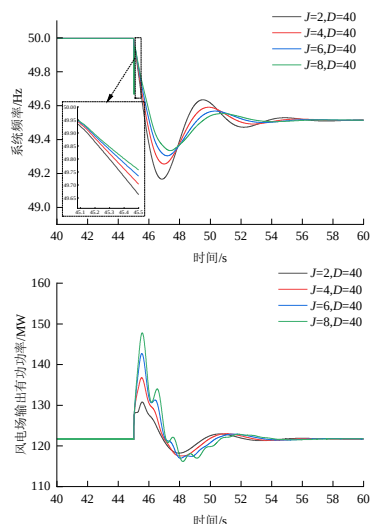


图 3  $J$  改变时的响应特性(动态阻尼系数 VSG)

Fig.3 Response characteristics when  $J$  changes (dynamic damping coefficient VSG)

根据图 3 数据, 由式(9)可计算得到等效下垂系数  $K_{\text{equ}}=0$ , 取  $\Delta t$  为 15s, 代入式(10)计算等效惯性常数  $H_{\text{equ}\infty}$ , 并计算扰动初期频率变化速度(以扰动开始 0.5s 内的频率平均变化速度近似表示), 对  $H_{\text{equ}\infty}$  的评价效果做出证明, 同时以式(13)计算  $H_{\text{equ}\infty}$  理论值与实际值进行比较, 结果如表 1 所示。

表 1  $J$  改变时的指标计算结果(动态阻尼系数 VSG)

Table.1 Index calculation results when  $J$  changes (dynamic damping coefficient VSG)

| 参数配置        | 等效惯性常数<br>(实际值)/s | 等效惯性常数<br>(理论值)/s | 扰动初期频率变<br>化速度/Hz · s <sup>-1</sup> |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------------------------|
| $J=2, D=40$ | 1.206             | 1.005             | -0.6678                             |
| $J=4, D=40$ | 2.211             | 2.010             | -0.5878                             |
| $J=6, D=40$ | 3.215             | 3.015             | -0.5256                             |
| $J=8, D=40$ | 4.220             | 4.019             | -0.4788                             |

表 1 的计算结果表明:  $J$  增加后, 扰动初期频率变化速度减慢, 定量地反映了惯量支撑能力的增强。  $H_{\text{equ}\infty}$  随之增大, 验证了其评价惯量支撑能力的有效性。理论计算所揭示的  $H_{\text{equ}\infty}$  近似随  $J$  线性变化的规律在实际计算中得到了验证, 证明了通过理论分析估计等效惯性常数的可行性。

保持  $J$  不变, 改变  $D$  的取值, 得到响应特性

及  $H_{\text{equ}\infty}$  的实际值计算结果如图 4 所示, 反映出:  $D$  的改变对频率响应特性无明显影响, 可近似认为惯量支撑能力与  $D$  无关,  $H_{\text{equ}\infty}$  随  $D$  的变化也较小, 符合理论分析的结果。

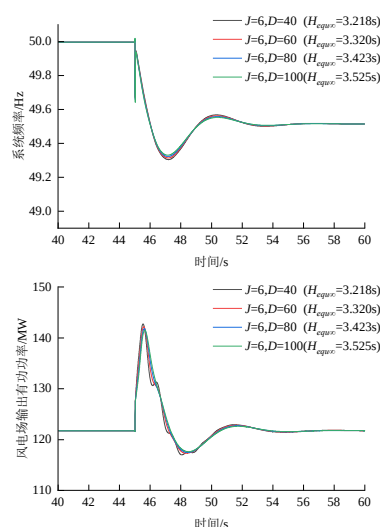


图 4  $D$  改变时的响应特性(动态阻尼系数 VSG)

Fig.4 Response characteristics when  $D$  changes (dynamic damping coefficient VSG)

### 3.2 稳态阻尼系数 VSG 等效惯性常数计算与分析

保持其他仿真设置与 3.1 节相同, 将风电场控制策略替换为稳态阻尼系数 VSG 控制。保持  $J$  不变, 改变  $D$  的取值, 得到响应特性曲线如图 5 所示。

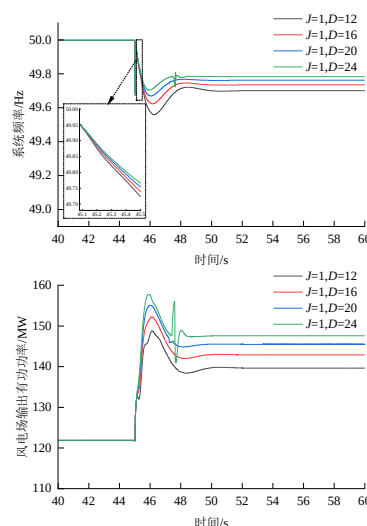


图 5  $D$  改变时的响应特性(稳态阻尼系数 VSG)

Fig.5 Response characteristics when  $D$  changes (stable damping coefficient VSG)

综合考虑典型同步机延时特性及等效惯性常数评价效果的合理性, 这里取  $T=0.3$ , 其它条件同 3.1 节。根据图 5 数据, 代入式(9)计算等效下垂系数  $K_{\text{equ}}$ 、代入式(10)计算等效惯性常数  $H_{\text{equ}\infty}$ , 结

果如表 2 所示。

表 2  $D$  改变时的指标计算结果(稳态阻尼系数 VSG)

Table.2 Index calculation results when  $D$  changes (stable damping coefficient VSG)

| 参数配置        | 等效下垂系数 | 等效惯性常数(实际值)/s | 等效惯性常数(理论值)/s | 扰动初期频率变化速度/ $\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1}$ |
|-------------|--------|---------------|---------------|---------------------------------------------|
| $J=1, D=12$ | 12.00  | 2.210         | 2.097         | -0.5500                                     |
| $J=1, D=16$ | 16.00  | 2.657         | 2.535         | -0.5176                                     |
| $J=1, D=20$ | 20.00  | 3.045         | 2.926         | -0.4892                                     |
| $J=1, D=24$ | 24.00  | 3.366         | 3.270         | -0.4652                                     |

表 2 计算结果表明:  $D$  增加后, 在改变下垂特性的同时, 也使扰动初期频率变化速度减慢, 起到了增强惯量支撑能力的效果。计算得到的  $H_{\text{equ}\infty}$  随之相应增大, 可以有效描述实际惯量支撑能力增强的现象。且计算结果显示  $H_{\text{equ}\infty}$  随  $D$  非线性变化, 验证了 2.3 节的理论分析。

保持  $D$  不变, 改变  $J$  的取值, 得到响应特性及  $H_{\text{equ}\infty}$  的实际值计算结果如图 6 所示。比较图 3 和图 6 可知, 两种 VSG 控制下,  $J$  对惯量支撑能力的影响类似, 且均有  $H_{\text{equ}\infty}$  近似随  $J$  线性变化的结论, 不再赘述。

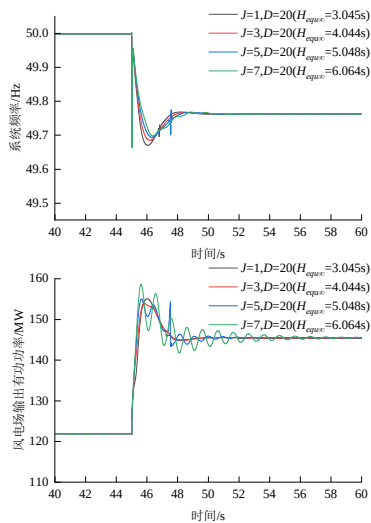


图 6  $J$  改变时的响应特性(稳态阻尼系数 VSG)

Fig.6 Response characteristics when  $J$  changes (stable damping coefficient VSG)

## 4 结论

本文基于等效惯性常数的定义, 对 VSG 控制下直驱风机的惯量支撑能力做出了定量分析, 得到以下结论:

1) 从风机并网功率与系统频率关系出发, 并针对下垂特性的影响做出处理, 定义得到的等效惯性常数可对 VSG 控制下直驱风机惯量支撑能力做出有效分析。

2) 动态阻尼系数 VSG 控制下, 直驱风机等效

惯性常数随  $J$  线性变化, 与  $D$  近似无关; 稳态阻尼系数 VSG 控制下, 直驱风机等效惯性常数随  $J$  线性变化, 随  $D$  非线性变化。可据此对 VSG 控制下的直驱风机等效惯性常数做出初步估计。

## 参考文献

- [1] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 杨超, 魏巍, 赵兵. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [2] Zhong Q C. Virtual synchronous machines - a unified interface for smart grid integration[J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2016, 3(4): 18-27.
- [3] 邵昊舒, 蔡旭, 周党生, 等. 风电机组虚拟同步及惯量控制方法分析与测试评估[J]. 高电压技术, 2020, 46(05): 1528-1537.
- [4] 闵勇, 陈磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 855-868.
- [5] 王振浩, 张越, 成龙, 等. 多参数协同自适应的改进虚拟同步控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(6): 2403-2413.
- [6] 邢东峰, 田铭兴. 虚拟同步发电机频率特性与储能设备容量及充放电特性的关系[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3582-3590. XING
- [7] 韩平平, 陈鹏飞, 丁明, 等. VSG 控制下直驱风机惯量支撑能力定量分析[J/OL]. 电网技术, 1-11[2024-06-19]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1908>.
- [8] Rosso R, Wang X, Liserre M, et al. Grid-Forming Converters: Control Approaches, Grid-Synchronization, and Future Trends - A Review[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.
- [9] 于鸿儒, 苏建徽, 徐华电, 等. 并网逆变器虚拟惯性与阻尼的等效及辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 6034-6043+6184.

收稿日期: 2013-07-04。

作者简介:

陈鹏飞(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为新型电力系统惯量分析。E-mail : [2022110317@mail.hfut.edu.cn](mailto:2022110317@mail.hfut.edu.cn);



陈鹏飞

(编辑 五号楷体, 居右, 段前空 6pt)

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 考虑光伏出力与负荷波动匹配性的配电网集群划分方法研究

彭琦, 欧阳森, 彭志豪, 张晋铭, 康澜

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

## Study on the method of distribution network cluster division considering the matching of photovoltaic output and load fluctuation

PENG Qi, OUYANG Sen, PENG Zhihao, ZHANG Jinming, KANG Lan

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**ABSTRACT:** With the access of large-scale distributed PV and the fluctuation of different load consumption law, it is difficult to regulate the operation of distribution network. Therefore, a method of distribution network cluster division considering the matching of PV output and load fluctuation is proposed. Firstly, considering the photovoltaic output curve and load fluctuation curve of each region of the distribution network, the source-charge matching index is designed. Secondly, a comprehensive index system of distribution network cluster division including source-load matching degree, module degree index, active power compensation degree index and reactive power compensation degree index is constructed. Then, a cluster partitioning optimization method based on improved discrete particle swarm optimization algorithm is designed. Finally, the IEEE33-node system is used as an example to verify the theory and algorithm. The results show that the proposed cluster partition has better source-charge matching, stronger electrical coupling, better active power matching and reactive power matching.

**KEY WORDS:** cluster partitioning; source load matching degree; modularity; active power compensation; reactive power compensation degree

**摘要:** 随着大规模分布式光伏的接入和不同负荷用电规律的波动, 配电网的运行调控存在较大困难, 为此提出一种考虑光伏出力与负荷波动匹配性的配电网集群划分方法研究。首先, 考虑配电网各区域所接光伏出力曲线及负荷波动曲线, 设计源荷匹配度指标; 其次, 构建含源荷匹配度、模块度指标、有功补偿度指标及无功补偿度指标的配电网集群划分综

合指标体系; 然后, 设计基于改进离散粒子群算法的集群划分优化方法; 最后, 采用 IEEE33 节点系统为例进行理论与算法验证, 结果表明所提集群划分具有较好的源荷匹配性、较强的电气耦合性、较好的有功匹配性和无功匹配性。

**关键词:** 集群划分; 源荷匹配度; 模块度; 有功补偿度; 无功补偿度

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号(小五号 Times New Roman 字体加黑)

## 0 引言

随着能源短缺和环境问题的日益严峻, 配电网中分布式光伏的渗透率日益提高<sup>[1]</sup>。对于一些低压配电网, 分布式光伏装机规模小、接入位置多、接入点分散、渗透率高<sup>[2]</sup>, 对各节点单独运行操作工作量较大, 采用传统集中式控制方式操作又较为困难。此外, 当代负荷的用电规律也发生较大的波动变化, 源荷不匹配的情况也比较普遍, 进一步加大了含高比例光伏配电网的运行调控难度<sup>[3]</sup>。

采用基于集群划分的群调控模式根据不同需求对各节点进行特征分类, 可充分利用集群内部各节点的相似性对配电网系统进行集群化管理, 为含高比例分布式光伏配电网的运行调控提供较大便利。近年来, 为解决国内大规模分布式光伏并网增加导致的分布式光伏调控困难的问题, 相关学者就集群划分方面进行了较多研究。文献[4]采用灵敏度分析首先定量判别出中枢节点, 并以云聚类算法实现无功电压分区; 文献[5]采用基于复杂网络理论的谱聚类算法对无功电压分区模型进行低维度聚类分析, 再用 K-means 聚类算法获取分区方案, 并以模块度、无功平衡与无功储备三个指标对方案进行验证; 文献[6]以模块度为无功分区划分标准, 采

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52177085)。

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (52177085).

用改进粒子群算法对电网进行无功分区；文献[7]以包括模块度、有功平衡度与无功平衡度的综合指标体系为划分依据，采用改进遗传算法对 10kV 馈线系统进行集群划分；文献[8]以基于电气距离的模块度和有功平衡度为综合划分指标，采用遗传算法进行集群划分，并提出考虑储能调节作用的分布式光伏集群出力评估方法。

然而现有集群划分多以电气距离为主，或结合考虑有功匹配度与无功匹配度，较少综合考虑分布式电源出力曲线与负荷曲线的匹配度。

因此，本文拟考虑按集群内的分布式电源与负荷的匹配程度设计集群划分指标，提出一种考虑光伏出力与负荷波动匹配性的配电网集群划分方法；首先，设计源荷匹配度指标减少光伏资源跨集群输送；其次，建立基于电气距离的模块度指标，引入有功补偿度指标和无功补偿指标，构建考虑源荷匹配度、模块度、有功补偿度及无功补偿度的配电网集群划分的综合指标体系；最后，采用改进离散粒子群算法对 IEEE33 节点算例进行求解验证。

## 1 集群划分指标

### 1.1 源荷匹配度指标

源荷匹配度指标为  $\delta$ ，表达式为

$$\delta = \sum_{h=1}^n \frac{\sum_{i=1}^{24} x_{i,h} y_{i,h}}{\left( \sum_{i=1}^{24} x_{i,h}^2 \sum_{i=1}^{24} y_{i,h}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式(1)中， $n$ 为集群个数， $x_{i,h}$ 和 $y_{i,h}$ 分别为第 $i$ 时刻的 $h$ 集群内光伏出力值之和与负荷用电量之和。

其中， $|\delta| \leq 1$ ， $|\delta|$ 越接近 1，则曲线 $x$ 与曲线 $y$ 越相似， $|\delta|$ 越接近 0，则曲线 $x$ 与曲线 $y$ 相似性越弱。

### 1.2 模块度指标

模块度指标<sup>[9]</sup>为  $\rho$ ，表达式为

$$\rho = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left( B_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(i, j) \quad (2)$$

$$m = \frac{\sum_i \sum_j B_{ij}}{2} \quad (3)$$

$$k_i = \sum_j B_{ij}, k_j = \sum_i B_{ij} \quad (4)$$

$$\delta(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 在同一集群内} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

式中， $B_{ij}$ 为电力网络中节点 $i$ 、 $j$ 之间的连边权重

(简称边权)； $m$ 为电力网络中所有边的权重之和；

$k_i$ 、 $k_j$ 分别为连接节点 $i$ 、 $j$ 的所有边权重之和；

$\delta(i, j)$ 表示节点 $i$ 、 $j$ 是否属于同一集群。

定义网络边权由各节点的电气距离决定。采用灵敏度法计算电气距离，以电压灵敏度矩阵定义电气距离矩阵，用于表征节点之间的耦合程度。

节点间的电气距离可衡量网络中两节点间的电气耦合紧密程度，公式为

$$\Delta V = S_{VP} \Delta P \quad (6)$$

式中： $S_{VP}$ 为有功电压灵敏度矩阵； $\Delta V$ 为节点电

压幅值变化量， $\Delta P$ 为节点有功变化量。矩阵 $S_{VP}$ 中

第 $i$ 行第 $j$ 列元素 $S_{ij}$ 表示节点 $j$ 有功功率变化单位值对应节点 $i$ 电压的变化值。

电压灵敏度为 $\alpha_{ij}$ ，表达式为

$$\alpha_{ij} = \lg \frac{S_{VP,j}}{S_{VP,i}} \quad (7)$$

式(7)表示节点 $j$ 有功功率变化单位值时其自身电压幅值变化量与节点 $i$ 电压幅值变化量之比， $\alpha_{ij}$ 越大表明节点 $j$ 电压变化对节点 $i$ 电压变化的影响越小，即两节点间电气距离越远，耦合程度越低。由于区域内的节点式相互影响的，其余节点的有功功率变化也会影响节点 $i$ 和节点 $j$ 的电压幅值大小。

定义节点 $i$ 与节点 $j$ 之间的电气距离为 $d_{ij}$ ，表达式为

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (|\alpha_{ik} - \alpha_{jk}|) \quad (8)$$

定义节点间边权重为 $B_{ij}$ ，表达式为

$$B_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{\max(d)} \quad (9)$$

### 1.3 有功补偿度指标

有功补偿度指标为  $\varphi_p$ ，表达式为

$$\varphi_p = \frac{\sum P_{PV\max,h}}{\sum P_{L\max,h}}, h=1, \dots, n \quad (10)$$

式(10)中,  $n$ 为集群个数,  $P_{PV\max,h}$ 为第  $h$ 个集

群内所有光伏电源有功出力最大值之和,  $P_{L\max,h}$ 为第  $h$ 个集群内各节点负荷有功功率最大值之和。

### 1.4 无功补偿度指标

无功补偿度指标为  $\varphi_Q$ ，表达式为

$$Q_i = \begin{cases} \frac{Q_{sup}}{Q_{need}}, & Q_{sup} < Q_{need} \\ 1, & Q_{sup} \geq Q_{need} \end{cases} \quad (11)$$

$$\varphi_Q = \sum_{i=1}^m Q_i \quad (12)$$

式中:  $Q_i$ 为集群  $i$  的群内无功补偿量;  $Q_{sup}$ 为

集群内光伏的无功供应值;  $Q_{need}$ 为集群内节点的无功功率需求值;  $m$ 为集群个数; 定义划分的  $m$ 个集群的无功补偿量之和  $\varphi_Q$ 为无功补偿指标。

综上, 将电气距离指标、容量匹配指标、源荷特征曲线匹配度指标和无功补偿指标加权组合提出评价集群划分优劣区域配电网的综合性能指标  $F$ :

$$F = \alpha\delta + \beta\rho + \gamma\varphi_p + \eta\varphi_Q \quad (13)$$

## 2 基于动态调整的粒子群算法

### 2.1 基本粒子群算法

粒子群智能优化算法(PSO)<sup>[10]</sup>的基本粒子群的数学模型为:

$$v_g^{m+1} = wv_g^m + c_1r_1(p_g^m - x_g^m) + c_2r_2(p_{g'}^m - x_g^m) \quad (14)$$

$$x_g^{m+1} = x_g^m + v_g^{m+1} \quad (15)$$

式中,  $v_g$ 和  $x_g$ 分别为粒子的速度和位置;  $m$ 为当前迭代次数;  $w$ 为惯性权重, 一般取1;  $c_1$ 、 $c_2$ 为学习因子, 一般取  $c_1=c_2=2$ ;  $r_1$ 、 $r_2$ 为均匀分布于  $[0,1]$ 区间内的随机数;  $p_g$ 为第  $i$ 个个体在第  $j$ 维的个体最优位置;  $p_{g'}$ 为种群在第  $j$ 维的群体最优位置。

将粒子群优化算法应用至分布式电源集群划分, 粒子的位置即为划分结果。设待划分的复杂电网节点数为  $D$ , 则粒子的位置与速度均为  $D$ 维粒子。第  $i$ 个粒子在经过  $n$ 次迭代后的位置可记为

$$X_i^n = [x_{i1}^n, x_{i2}^n, \dots, x_{id}^n, \dots, x_{iD}^n] \quad (16)$$

式中:  $x_{id}^n$ 是第  $n$ 次迭代时  $d$ 节点的集群编号。若

$x_{id} = x_{ie}$ ,  $e$ 为复杂电网  $D$ 个节点中的任一节点,

则节点  $d$ 与节点  $e$ 被划分在同一集群内。

第  $i$ 个粒子在经过  $n$ 次迭代后的速度可记为

$$V_i^n = [v_{i1}^n, v_{i2}^n, \dots, v_{id}^n, \dots, v_{iD}^n] \quad (17)$$

式中:  $v_{id}^n$ 为节点  $d$ 在第  $n$ 次迭代时的集群编号变化量。

### 2.2 基于动态调整的离散化粒子群优化算法

传统 PSO 算法中的  $c$ 、 $r$  因子将导致集群编号出现非整数情况, 而 BPSO 算法仅适用于集群划分数目为 2 时的优化。对于所有分布式电源节点进行集群划分, 需赋予节点不同的集群编号, 更多需考虑集群数目在 2 个以上的情况, 因此 BPSO 算法不适用。

集群划分问题的解在整数域内, 为使粒子群算法与集群进行划分相结合, 需保证变量的搜索范围在整数空间内, 因此速度更新时对其速度向量进行向上取整, 模型为

$$v_g^{m+1} = \text{ceil}(v_g^{m+1}) \quad (18)$$

同时, 粒子群算法的优化结果受其参数的影响, 为提高结果的全局最优性, 本文对离散粒子群算法的参数进行动态调整, 使惯性权重与学习因子的值前期较大, 可更快地进行全局寻优, 后期适当减小惯性权重与学习因子的值, 使粒子速度变化减



小,有利于局部寻优。公式如下

$$w = w_{\max} + (1 - \arccos(1 - g / g_{\max}) / \pi) \cdot (w_{\max} - w_{\min}) \quad (19)$$

$$c_1 = c_{1\max} + (1 - \arccos(1 - g / g_{\max}) / \pi) \cdot (c_{1\max} - c_{1\min}) \quad (20)$$

$$c_2 = c_{2\max} + (1 - \arccos(1 - g / g_{\max}) / \pi) \cdot (c_{2\max} - c_{2\min}) \quad (21)$$

式中:  $g$  为当前迭代次数,  $g_{\max}$  为最大迭代次数,

$w_{\max}$ 、 $c_{\max}$  为惯性权重与学习因子最大值,  $w_{\min}$ 、

$c_{\min}$  为惯性权重与学习因子最小值。

离散化粒子群算法求解步骤如下:

(1) 设置种群规模、惯性权重、学习因子等参数,初始化粒子群的速度和位置;

(2) 将每个粒子代入适应度函数,求解各粒子的适应度值,并比较得到个体最优值与群体最优值;

(3) 根据公式,更新粒子速度和位置,并将更新后的粒子重新代入计算,检验其是否满足约束条件,若满足,直接进入下一步,否则,在目标函数中增加惩罚项后进入下一步;

(4) 检查是否达到迭代次数,若未满足结束条件,则返回步骤2,若满足,则结束,并输出全局最佳位置即为全局最优解。

### 3 算例分析

IEEE33 节点配电系统结构如图 1 所示,该系统划分十个负荷区域,共 33 个节点,其中,母线 0 作为参考节点,负荷节点共 32 个,光伏电源 13 个。光伏总安装容量为 3MW,系统总负荷为 3715+j2300kVA。

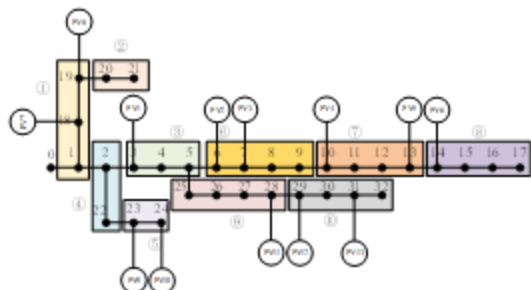


图 1 IEEE33 节点拓扑图

Fig.1 Topology of IEEE33 nodes

该网络中 6 个光伏电源安装容量如表 1 所示,对应的光伏出力曲线及每个区域对应的负荷曲线如图 2 所示。

表 1 光伏安装容量

| Table 1 Photovoltaic installed capacity |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 节点位置                                    | 3   | 6   | 7   | 10  | 13  |
| 安装容量/kW                                 | 100 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 节点位置                                    | 14  | 18  | 19  | 23  | 24  |
| 安装容量/kW                                 | 300 | 200 | 300 | 200 | 200 |
| 节点位置                                    | 28  | 29  | 31  |     |     |
| 安装容量/kW                                 | 400 | 200 | 300 |     |     |

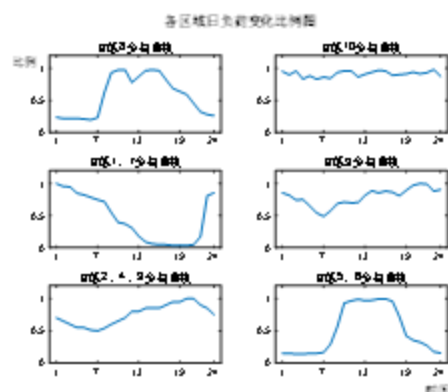


图 2 日负荷变化比例图

Fig.2 Daily load change ratio

#### 3.1 指标权重组合不同对应的集群划分结果

对于综合性能指标中,各指标权重不同会使集群划分结果不同。上述提出的综合性能指标中给包含的多断面源荷特征匹配度、模块度、容量匹配度和无功补偿度 4 个指标各赋予一定的权重,计算者偏好或计算场景不同时,给定的权重大小也不同,则集群划分结果也不同。为比较不同指标权重所得结果的不同,给出四种方案对应四种指标权重组合及相应的集群划分后各指标数据如表 2 所示。

由表 2 可知,1 号赋权方式中,当源荷特征匹配度指标权重较大时,划分后集群内源荷匹配度相对较好,此时仅集群内模块度指标效果相对没那么好,容量匹配度与无功补偿度分别与 3 号赋权方式容量匹配度指标权重较大与 4 号赋权方式无功补偿度指标权重较大时相比所得结果相差不大,综合效果较好;2 号赋权方式中,当模块度指标权重较大时,所得集群划分结果中,仅模块度指标值相对于其它划分方式效果较好,而源荷特征匹配指标、容

量匹配指标与无功补偿指标效果均较差。综合考虑这4种赋权方式,当计算者更倾向于提升集群内分布式光伏消纳能力时,认为1号赋权方式的集群划分效果综合性能较好,因此选取1号赋权方式,

$\alpha=0.4$ ,  $\beta=0.2$ ,  $\gamma=0.2$ ,  $\eta=0.2$ 的权重组合进行集群划分,所得集群划分结果如图5所示。

表2 不同权重组合对应的集群划分结果

Table 2 Cluster division results corresponding to different weight combinations

| 方案 | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | $\eta$ | $\delta$ | $\rho$ | $\varphi_P$ | $\varphi_Q$ | $F$    |
|----|----------|---------|----------|--------|----------|--------|-------------|-------------|--------|
| 1  | 0.4      | 0.2     | 0.2      | 0.2    | 0.8485   | 0.4565 | 0.8531      | 0.7714      | 0.7556 |
| 2  | 0.2      | 0.4     | 0.2      | 0.2    | 0.7892   | 0.5256 | 0.8395      | 0.7001      | 0.6760 |
| 3  | 0.2      | 0.2     | 0.4      | 0.2    | 0.7238   | 0.5108 | 0.8549      | 0.7340      | 0.7183 |
| 4  | 0.2      | 0.2     | 0.2      | 0.4    | 0.7888   | 0.4750 | 0.8516      | 0.7945      | 0.7337 |

### 3.2 不同指标对应的集群划分结果

传统集群划分多以模块度为指标进行划分,为验证本文所提包含源荷匹配度、模块度、有功补偿度及无功补偿度的综合性能指标的有效性,分别采用模块度指标与综合性能指标进行划分,所得结果数据如表3所示。由表3数据可知,综合性能指标划分所得模块度 $\rho$ 相对于单一指标下降16.7%,但综合指标 $F$ 、源荷匹配度指标 $\delta$ 、有功补偿度指标 $\varphi_P$ 及无功补偿指标 $\varphi_Q$ 有大幅度提升,其中, $F$

上升37.78%, $\delta$ 上升6.43%, $\varphi_P$ 上升4.57%, $\varphi_Q$ 上

升17.4%。采用综合考虑多断面源荷特征匹配度、模块度、有功补偿度和无功补偿度的综合性能指标划分所得的集群虽模块度值下降,但集群内源荷匹配及有功和无功匹配均有提升。因此综合性能指标划分所得结果可同时考虑到集群内部的结构性能与功能特性,表3中的综合性能指标结果仅为多断面源荷特征匹配度指标权重为0.4,其它指标权重均为0.2的特定情况下的划分结果,在应用时可根据实际需求对指标赋予不同权重,以满足集群间的结构特性与功能特性。

表3 不同划分指标对应的集群划分结果

Table 3 Cluster partition results corresponding to different partition indicators

| 指标类型 | $\delta$ | $\rho$ | $\varphi_P$ | $\varphi_Q$ | $F$    |
|------|----------|--------|-------------|-------------|--------|
| 模块度  | 0.7973   | 0.5484 | 0.8158      | 0.6571      | 0.5412 |

|        |        |        |        |        |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 综合性能指标 | 0.8485 | 0.4565 | 0.8531 | 0.7714 | 0.7556 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|

## 4 结论

本文在模块度划分基础上,考虑有功补偿度与无功补偿度,定义源荷匹配度指标,提出一种基于源荷匹配度、模块度、有功补偿度与无功补偿度的综合性能指标的集群划分方法,采用IEEE33节点为例进行集群划分,并对划分结果进行分析对比。采用本文所提综合性能指标进行划分,相对于传统仅考虑模块度指标的方法,集群内部源荷匹配性、有功与无功补偿性均有较大提高,整体性能得到提升。对四个指标改变权重进行集群划分的结果进行对比,当本文所提源荷匹配性指标权重较大时,整体集群划分性能也较好。

## 参考文献

- [1] 李崇强,赵耀,王云,等. 面向有功潮流最优问题的配电网集群划分策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43 (03): 151-160.
- [2] 杨龙月,任焜辰,蔡智超,等. 高光伏渗透率配电网电压控制策略研究综述[J/OL]. 电网技术, 1-19[2024-07-03].
- [3] 黄冬梅,杨帆,余京朋,等. 考虑净负荷均衡的分布式光伏集群电压调控策略研究[J/OL]. 电网技术, 1-11[2024-07-03].
- [4] 成煜,杭乃馨. 基于电网中枢纽识别的无功电压控制分区方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (08): 45-52.
- [5] 徐敏非,蒋文波,程慧丽. 基于谱聚类的无功电压分区和主导节点选择[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (15): 73-78.
- [6] 于琳,孙奎,徐然,等. 改进粒子群优化算法及其在电网无功分区中的应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41 (03): 89-95+128.
- [7] 丁明,刘先放,毕锐,等. 采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42 (15): 47-52+141.
- [8] 李琰,吕南霜,刘慧涛,等. 考虑新能源消纳和网损的分布式光伏集群出力评估方法[J]. 电力建设, 2022, 43 (10): 136-146.
- [9] 马牧原. 基于分布式储能选址定容的主动配电网集群运行优化[D]. 东北电力大学, 2023.
- [10] 谢美华. 基于自适应混合粒子群算法的流水车间调度问题研究[D]. 重庆三峡学院, 2024.

收稿日期:..  
作者照片  
作者简介:  
彭琦(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行, pqf14@163.com;  
欧阳森(1974), 男, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为电力系统规划与运行, ouyangs@scut.edu.cn.  
彭琦

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 一种三相级联式桥臂复用型模块化多电平换流器

吴笑音, 于义轩, 王 毅, 高玉华

(河北省分布式储能与微网重点实验室 (华北电力大学 (保定)), 保定 071003)

## A three-phase series-connected arm multiplexing modular multilevel converter

WU Xiaoyin, YU Yixuan, WANG Yi, GAO Yuhua

(Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-Grid (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**ABSTRACT:** In order to achieve the goal of lightweight modular multilevel converter (MMC) topology, based on the idea of three-phase unit cascade and time-division multiplexing of arms, this paper proposes a series-connected arm multiplexing MMC (S-AMMC) suitable for power tap station. By dividing the bridge arms of series-connected modular multilevel converter (SC-MMC) into upper, multiplexed and lower bridge arms, and multiplexing arms via arm switches, the amount of submodule usage is reduced. In addition, according to the topological characteristics of S-AMMC, this paper designs a zero-voltage switching modulation strategy to meet its modulation requirements at power tap stations in high-voltage flexible DC transmission projects. The simulation results based on MATLAB/Simulink verify the feasibility of the proposed S-AMMC topology and the effectiveness of its modulation strategy. S-AMMC saves 25% sub-module capacitance compared to the SC-MMC, and the number of IGBT switching tubes remains unchanged, thus reducing the manufacturing cost and size of the power tap station.

**KEY WORDS:** high voltage flexible dc transmission, modular multilevel converter (MMC), lightweight design, three-phase series-connected MMC

**摘要:** 为了实现模块化多电平换流器(MMC)拓扑轻量化目标, 本文基于三相单元级联思想和桥臂时分复用思想, 提出了一种适用于柔直功率分接站的三相级联式桥臂复用型模块化多电平换流器拓扑(S-AMMC)。通过将三相串联型 MMC 拓扑(SC-MMC)的桥臂重新划分为上桥臂、复用桥臂和下桥臂, 并利用桥臂切换开关对中间桥臂进行复用, 从而降低子模块使用量。此外, 根据 S-AMMC 拓扑特点, 本文设计了零压切换调制策略, 以满足其在高压柔性直流输电工程中功率分接站的调制需求。基于 MATLAB/Simulink 的仿真结果验证

了所提 S-AMMC 拓扑的可行性及其调制策略的有效性。S-AMMC 对比 SC-MMC 可节省 25%子模块电容, 且所使用 IGBT 开关管数量不变, 从而降低了功率分接站的制造成本与体积。

**关键词:** 高压柔性直流输电, 模块化多电平换流器, 轻型化设计, 三相串联型 MMC

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)凭借其输出电压质量高、可靠性高以及开关器件级联数量少等优势, 目前已成为高压柔性直流输电工程建设的优选方案<sup>[1-2]</sup>。随着柔性直流工程的大规模建设, 以及区域性用电需求发展, 直流输电走廊附近地区存在功率需求, 柔直功率分接站的建设需求也随之产生<sup>[3]</sup>。柔直功率分接站建设要求与柔性直流输电工程不同, 分接站上传输功率较低, 且对于经济性要求相比柔直输电工程高, 因此分接站的建设应保证灵活性与经济性。

在上述背景下, 传统 MMC 由于子模块利用率低下, 导致其存在器件成本与工程占地面积等弊端, 难以适用于分接站的建设。相较于传统 MMC, 三相串联型模块化多电平换流器(series-connected modular multilevel converter, SC-MMC)凭借其三相单元级联形式, 在相同电压等级下所级联子模块数量减少 1/3, 具备良好的经济性<sup>[4-5]</sup>。虽然单相输出功率仅为传统 MMC 的 1/3, 但十分适用功率分接站的中低功率灵活传送。

为进一步降低功率分接站的器件成本与占地面积, 文献[6-8]中针对 SC-MMC 进行拓扑改进提高子模块利用率以实现轻型化设计。如文献[6]中将

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52077079); 河北省自然科学基金资助项目(E2021502048)。

The National Natural Science Foundation of China (52077079); Hebei Provincial Natural Science Foundation of China (No. E2021502048).

桥臂交替导通的思想运用于 SC-MMC 中, 引入 4 个切换开关使时刻导通的桥臂由四组变为两组, 最终将子模块需求降低至传统 MMC 的 1/4。但其交替导通的缘故会为直流侧带来 6 倍频脉动, 需增加滤波电容提升直流侧电压质量, 且正常运行时该拓扑缺乏桥臂间能量流动通路, 因此存在调制比固定问题。文献[7]中将每相中加入 H 桥并联于级联子模块, 利用 H 桥电路翻转导通的作用, 使一组桥臂实现双向导通, 最终将子模块降低至传统 MMC 的 16.7%。但 H 桥导通电路无法实现软开关, 开关切换难度较大, 且亦存在调制比固定问题。文献[8]中基于两电平电压源换流器结构, 在交流侧加入子模块栈起到有源滤波效果, 将子模块使用数量降低至 8.3%。但其切换开关无法实现零压切换, 且该拓扑结构抗交流扰动能力低下并存在调制比固定问题。

上述文献所提出的改进型 SC-MMC 虽可实现较为有效的轻型化, 但普遍存在调制比固定、开关切换难度高的问题、直流侧波形质量差等问题。因此本文基于“桥臂时分复用”<sup>[9-10]</sup>的思想, 提出一种三相级联式桥臂复用型模块化多电平换流器 (series-connected arm multiplexing MMC, S-AMMC), 该拓扑在 SC-MMC 的基础上每相增加两个复用桥臂, 可在桥臂切换开关的作用下, 与上下桥臂形成等效复用桥臂。相比传统 MMC, 可有效降低 50% 子模块, 桥臂切换开关可实现零压切换, 且无需附加控制即可实现宽电压范围调制, 不存在固定调制比, 直流侧波形较好, 无需于直流侧附加滤波电容。

本文首先介绍所提 S-AMMC 拓扑结构, 阐述其运行原理; 建立该拓扑数学模型, 并通过数学模型推导在自然状态下 S-AMMC 运行工作点; 而后, 提出一种适用于 S-AMMC 多桥臂的零压切换调制策略, 最终通过 Matlab/Simulink 仿真验证所提拓扑以及调制策略的有效性。

## 1 S-AMMC 基本原理及数学模型

### 1.1 S-AMMC 拓扑结构

本文所提 S-AMMC 拓扑结构如图 1 所示。图中  $U_{dc}$ 、 $I_{dc}$  分别为直流电压、电流,  $u_a$ 、 $i_a$  为 A 相交流电压、电流,  $K_{a1}$ 、 $K_{a2}$ 、 $K_{a3}$ 、 $K_{a4}$  分别为 4 个桥臂切换开关。该拓扑每相由左右对称的上桥臂 1、上桥臂 2、复用桥臂 1、复用桥臂 2、下桥臂 1、下桥臂 2, 共 6 个桥臂组成, 每个桥臂由相同数量的半桥子模块串联而成, 上下桥臂与复用桥臂之间引

出 4 个桥臂切换开关, 每个切换开关都由 IGBT 串联组成, 桥臂切换开关通断频率为工频。复用桥臂可通过桥臂切换开关的配合关断, 根据上下桥臂所需投入的子模块数量, 与上、下桥臂串联配合形成等效桥臂。

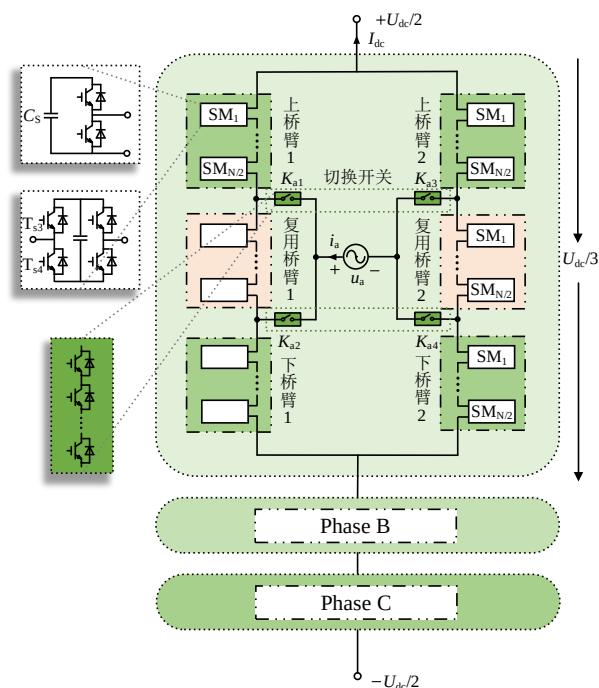


图 1 S-AMMC 拓扑结构

Fig. 1 S-AMMC topology

在直流电压为  $U_{dc}$ 、单个子模块电容电压为  $U_{cn}$  下, 传统 MMC 一相所需子模块数量为  $2N(N=U_{dc}/U_{cn})$ , SMMC 每相需要  $4N/3$ , 而 S-AMMC 单个桥臂需要  $N/6$ , 每相仅需  $N$  个子模块级联, 相比传统 MMC 其子模块利用率提高 50%, 相比 SMMC 提高 25%。

桥臂切换开关在关断时将承受整个复用桥臂输出电压, 最大承受压差为  $U_{dc}/6$ , 因此单个切换开关需级联  $N/6$  耐压为  $U_{cn}$  的 IGBT, 一相所需增设  $2N/3$  个 IGBT, 综合计算所需 IGBT 数量与 SMMC 相等。

### 1.2 S-AMMC 工作原理与数学模型

如图 2(a)所示, 以 A 相为例, 可将一相 6 个桥臂等效为 6 个电压源, 并由上桥臂 1 等效电压源  $u_{au1}$  正极端与端口  $a_1$  之间电压称为等效桥臂 I 电压  $u_{a1}$ , 端口  $a_1$  与下桥臂 1 等效电压源  $u_{al1}$  负极端之间电压称为等效桥臂 II 电压  $u_{a2}$ ; 同理, 右侧桥臂组成等效桥臂 III、IV 电压  $u_{a3}$ 、 $u_{a4}$ 。

切换开关  $K_{a1}$  与  $K_{a4}$  通断状态一致,  $K_{a2}$  与  $K_{a3}$  通断状态一致。当  $K_{a1}$  与  $K_{a4}$  关断,  $K_{a2}$  与  $K_{a3}$  导通, 拓扑运行于复用模式 I, S-AMMC 上桥臂 1 与复用

桥臂 1 串联，运行于上桥臂复用模式，下桥臂 2 与复用桥臂 2 串联，运行于下桥臂复用模式。同理，当  $K_{a2}$  与  $K_{a3}$  关断， $K_{a1}$  与  $K_{a4}$  导通，拓扑运行于复用模式 II，S-AMMC 左侧运行于下桥臂复用模式，右侧运行于上桥臂复用模式。

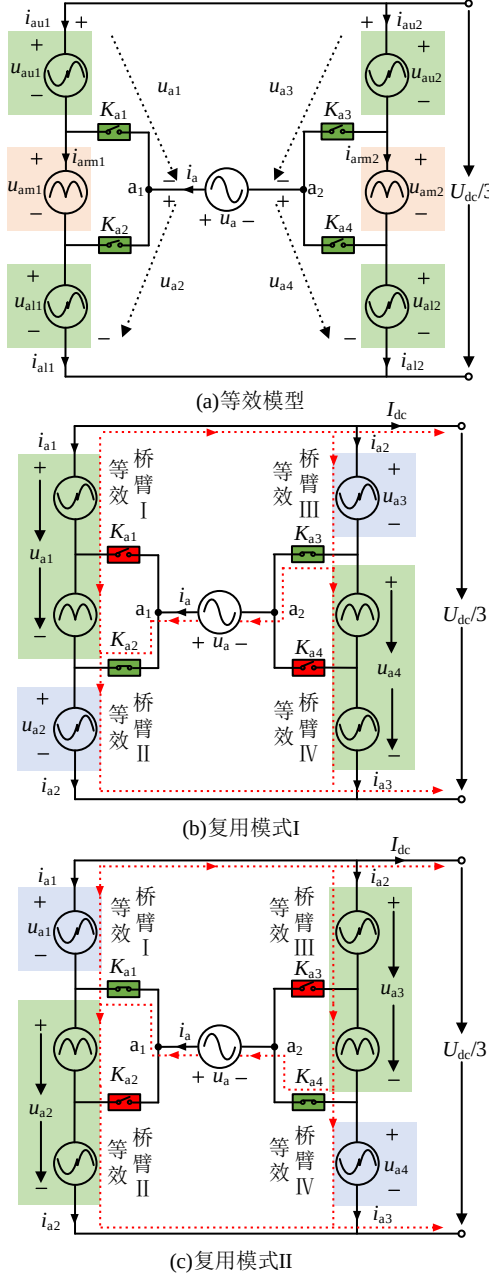


图 2 S-AMMC 等效工作原理

Fig. 2 S-AMMC equivalent working principle

对交流侧的相关定义如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_a = U_m \sin \omega t \\ i_a = I_m \sin(\omega t - \varphi) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $U_m$ 、 $I_m$  分别为交流电压与电流幅值， $\varphi$  为功率因数。

以 A 相为例，由 SMMC 基本运行原理与 KVL、KCL 基本定理得下式

$$\begin{cases} u_{a1} = u_{a4} = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{dc}}{3} - U_m \sin \omega t \right) = \frac{1}{12} (2 - m \sin \omega t) \\ u_{a2} = u_{a3} = \frac{1}{2} \left( \frac{U_{dc}}{3} + U_m \sin \omega t \right) = \frac{1}{12} (2 + m \sin \omega t) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_{a1} = i_{a4} = \frac{I_{dc}}{2} + \frac{I_m}{2} \sin(\omega t - \varphi) \\ i_{a2} = i_{a3} = \frac{I_{dc}}{2} - \frac{I_m}{2} \sin(\omega t - \varphi) \end{cases} \quad (3)$$

其中  $m$  为调制比，定义为  $m = U_m / (U_{dc}/6)$ 。  $i_{a1}$ 、 $i_{a2}$ 、 $i_{a3}$ 、 $i_{a4}$  分别对应流经等效桥臂 I、II、III、IV 的等效电流。由上式可知，仅需建立左侧桥臂数学模型即可对偶出右侧。

当运行于复用模式 I 时，等效桥臂 I 电压  $u_{a1}$  为上桥臂与复用桥臂电压  $u_{au1}$  与  $u_{am1}$  之和，等效桥臂 II 电压  $u_{a2}$  即为下桥臂电压  $u_{al1}$ 。则左侧上、复用、下桥臂电压为

$$\begin{cases} u_{au1} = \frac{U_{dc}}{6} \\ u_{am1} = -\frac{m}{6} U_{dc} \sin \omega t \\ u_{al1} = u_{a2} = \frac{1}{12} (2 - m \sin \omega t) \end{cases} \quad (4)$$

由上式同理可得运行于复用桥臂 II 时左侧上、复用、下桥臂电压，因此一个周期内三个桥臂电压可得

$$u_{au1} = \begin{cases} \frac{U_{dc}}{12} (2 - m \sin \omega t) & 0 < \omega t \leq \pi \\ \frac{U_{dc}}{6} & \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{am1} = \begin{cases} \frac{m}{6} U_{dc} \sin \omega t & 0 < \omega t \leq \pi \\ -\frac{m}{6} U_{dc} \sin \omega t & \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

$$u_{al1} = \begin{cases} \frac{U_{dc}}{6} & 0 < \omega t \leq \pi \\ \frac{U_{dc}}{12} (2 - m \sin \omega t) & \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (7)$$

流经上、下桥臂的桥臂电流与复用模式无关，上桥臂电流  $i_{au1}$  即等于等效桥臂 I 电流  $i_{a1}$ ；下桥臂电流  $i_{al1}$  即等于等效桥臂 II 电流  $i_{a2}$ 。中间复用桥臂电流  $i_{am1}$  在复用模式 I 时等于  $i_{a1}$ ，运行于复用模式 II 时等于  $i_{a2}$ 。因此一个周期内三桥臂电流为

$$i_{au1} = \frac{1}{2} (I_{dc} + I_m \sin(\omega t - \varphi)) \quad (8)$$

$$i_{am1} = \begin{cases} \frac{1}{2} (I_{dc} - I_m \sin(\omega t - \varphi)) & 0 < \omega t \leq \pi \\ \frac{1}{2} (I_{dc} + I_m \sin(\omega t - \varphi)) & \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (9)$$



$$i_{al1} = \frac{1}{2}(I_{dc} - I_m \sin(\omega t - \varphi)) \quad (10)$$

由式(5)-(10)可得出在理想情况下 S-AMMC 上、复用、下桥臂电压、电流调制波形如图 3 所示。图中可得知, 中间桥臂电流电压皆为 2 倍频。

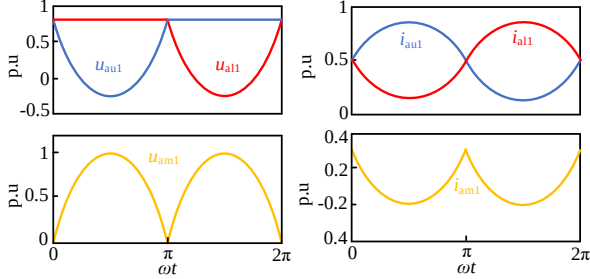


图 3 S-AMMC 三桥臂电压、电流调制波形

Fig. 3 S-AMMC three bridge arm voltage and current modulation waveform

### 1.3 S-AMMC 复用桥臂能量均衡条件

S-AMMC 拓扑存在共模电流流通通路, 因此上下桥臂存在的能量差异可通过共模电流进行能量流通均衡, 复用桥臂则为上、下桥臂能量流通的必经媒介。则复用桥臂能量在一周期内无盈余与亏损, 则可判断上、复用、下三桥臂能量均衡。由图 3 中可知复用桥臂电流电压皆为二倍频, 因此将式(6)与式(9)中 \$\omega t\$ 在 \$(0, \pi)\$ 的表达式相乘可得中间桥臂 \$\omega t\$ 在 \$(0, \pi)\$ 瞬时功率 \$p\_{am1}\$。

$$p_{am1} = -\frac{m}{24}U_{dc}I_m \cos\varphi + \frac{m}{12}U_{dc}I_m \sin\omega t + \frac{m}{24}U_{dc}I_m \cos(2\omega t) \quad (11)$$

将 \$I\_{dc}=3mI\_m\cos\varphi/4\$ 带入式(11)并对其在 \$\omega t \in (0, \pi)\$ 积分可得复用桥臂一周期的桥臂能量, 并使一周期的能量等于零可得

$$W_{am1} = \int_0^\pi p_{am1} d(\omega t) = \frac{m}{24}U_{dc}I_m \cos\varphi(m - \pi) = 0 \quad (12)$$

由式(12)可知, 当 \$m=\pi\$ 时, 复用桥臂能量均衡, 上、复用、下三桥臂能量均衡, 该调制比为三桥臂能量均衡的自然均衡点。

该自然均衡点并不是说明该拓扑只能运行于固定调制比下, 而是当 \$m\$ 不等于 \$\pi\$ 时, 中间桥臂将会成为上下桥臂的能量传递媒介, 由于该拓扑与三相独立变压器之间存在三倍频脉动, 中间桥臂电流不仅流通自然均衡时的二倍频, 而且会附加三倍频电流用以均衡上、中、下桥臂的能量。

## 2 S-AMMC 零压切换调制策略

本文针对 S-AMMC 采用等效桥臂调制策略,

其中 \$N\_{a1}\$、\$N\_{a2}\$、\$N\_{a3}\$、\$N\_{a4}\$ 分别为等效桥臂 I、II、III、IV 所输出的子模块数量, \$N\_{au1}\$、\$N\_{am1}\$、\$N\_{al1}\$ 表达为

$$\begin{cases} N_{a1} = N_{a4} = \text{round}(\frac{U_{a1}^*}{U_{cn}}) = \begin{cases} N_{au1} + N_{am1} \\ N_{al1} \end{cases} \\ N_{a2} = N_{a3} = \text{round}(\frac{U_{a2}^*}{U_{cn}}) = \begin{cases} N_{al1} \\ N_{al1} + N_{am1} \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

现将等效桥臂 I、II、III、IV 的电容量大小所组成的正排序列定义为 \$\mathbf{X}\_1\$、\$\mathbf{X}\_2\$、\$\mathbf{X}\_3\$、\$\mathbf{X}\_4\$, 均压调制策略流程如图 4 所示。当等效桥臂 I 的输出数量 \$N\_{a1}\$ 大于 \$N/6\$ 时, 此时 S-AMMC 运行于复用模式 I, 上桥臂 1 与复用桥臂 1 中的子模块电容电压按照正排序形成序列 \$\mathbf{X}\_1\$, 下桥臂中电容电压按照正排序形成序列 \$\mathbf{X}\_2\$; 右侧桥臂电容电压同理形成序列 \$\mathbf{X}\_3\$、\$\mathbf{X}\_4\$。\$N\_{a1}\$ 小于 \$N/6\$ 时运行于复用模式 II, 其 \$\mathbf{X}\$ 序列构成同理可得出。

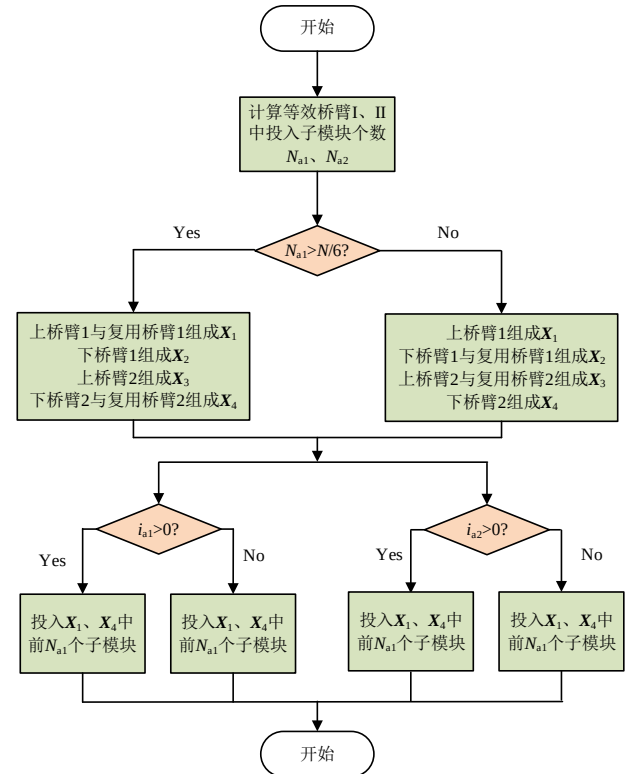


图 4 S-AMMC 调制策略

Fig. 4 S-AMMC modulation strategy

当 \$N\_{a1}\$ 等于 \$N/4\$ 时, 复用模式即将转换, 桥臂切换开关动作, 为保证切换开关零压切换, 需参照以下流程

1) 切除复用桥臂 I 与复用桥臂 II 的所有子模块。

2) 投入上桥臂 1、上桥臂 2、下桥臂 1、下桥臂 2 的所有子模块。该步骤可使得切换开关两端等电位, 且保证输出电平数量恒等于 \$2N/3\$ 用以维持

直流电压。

3) 关断上一时刻导通的切换开关组, 导通上一时刻关断的切换开关组。

### 3 仿真验证

为验证所提拓扑及其调制策略可行性, 本文利用 Matlab/Simulink 搭建拓扑系统仿真, 仿真参数如下。

表 1 仿真系统参数

Table 1 Simulation system parameters

| 参数         | 值    | 参数        | 值    |
|------------|------|-----------|------|
| 交流线电压有效值/V | 600  | 电容电压初始值/V | 60   |
| 直流电压额定值/V  | 1800 | 桥臂电感大小/mH | 2    |
| 一相子模块数量/个  | 30   | 调制比大小     | 1.63 |
| 子模块电容大小/mF | 3    | 单相直流电压/V  | 600  |

本文所搭建仿真子模块均采用半桥子模块, 调制比 1.63 小于 2, 开环仿真并未过调制, 用以验证所提拓扑在不附加控制下可运行于宽范围调制比下。

如图 5 所示, S-AMMC 在运行于调制比 1.63 工况时, 输出交流电压交流电流稳定, 三相交流电压均衡, 输出交流电流近似为标准正弦, 波形畸变率小, 输出质量优秀。

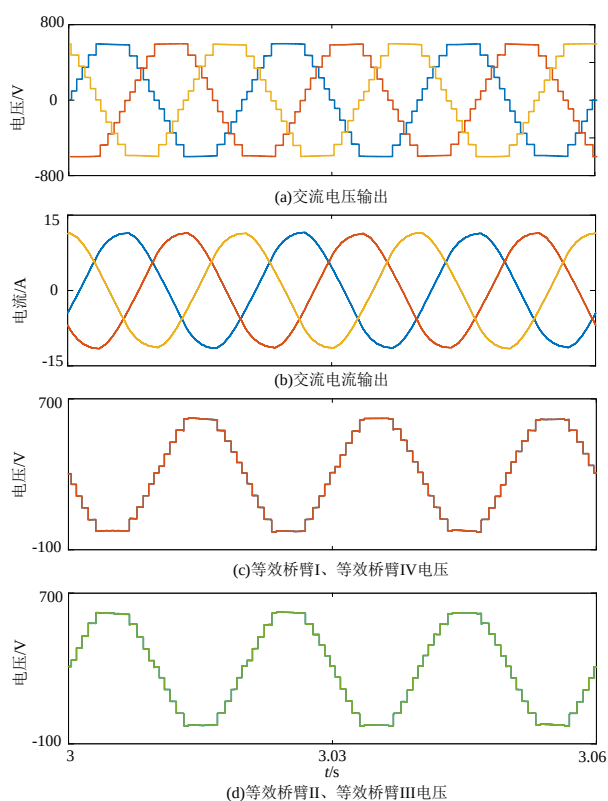


图 5 S-AMMC 电压电流输出外特性

Fig. 5 S-AMMC voltage and current output characteristics

本文所提拓扑上中下桥臂电容电压波动如图 6 所示。如图 6(a)(c)所示, 上下桥臂电容电压波动为 2 倍频波动, 波动幅值约为 3V 且为基频脉动。但由于此时调制比不在自然均衡点下, 因此电路中会存在 3 倍频谐波脉动。而中间复用桥臂和前文分析一致, 波动量为二倍频, 且波动幅度比上下桥臂电容电压更小, 约为 1.3V。但是由于能量均衡的原因, 中间复用桥臂电容电压波动中掺杂三倍频谐波脉动。

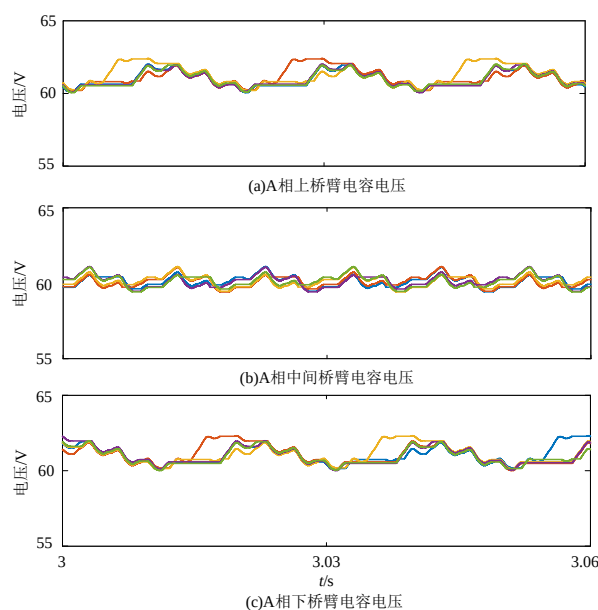


图 6 S-AMMC 上中下桥臂电容电压

Fig. 6 S-AMMC bridge arm capacitance voltage

### 4 结论

本文提出一种适用于柔直功率分接站的紧凑型三相级联式 MMC 拓扑 S-AMMC, 介绍了其拓构成以及运行原理, 推导了该拓扑的数学模型, 以及在自然状态下的能量均衡点, 最后通过仿真验证所提拓扑的有效性, 所得结论如下:

1) 通过将传统的 SC-MMC 的桥臂重新分化, 将中间桥臂进行开关切换复用, 使得所提 S-AMMC 比 SC-MMC 节省了 25% 的子模块电容, 且所使用 IGBT 开关管数量不变。

2) 所提出的 S-AMMC 存在一个自然能量均衡点, 但并非调制比固定, 而是在非自然能量均衡点的工况下, 通过三倍频电流使上中下桥臂能量均衡, 因此该拓扑具备宽范围调压特性。

3) 所提拓扑的开关具备零压切换条件, 使得开关管切换难度降低, 具备工程适用价值。

### 参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2016;

2-5

- [2] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 8.
- [3] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.
- [4] P. Naidoo and N. M. Ijumba, "A novel approach to providing on route power supplies to rural and urban communities in close proximity to the extra high voltage DC transmission line," 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA, USA, 2008: 1-3.
- [5] Q. Hao, B. -T. Ooi, F. Gao, C. Wang and N. Li, "Three-Phase Series-Connected Modular Multilevel Converter for HVDC Application," in IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 50-58.
- [6] 国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司, 国网江苏省电力有限公司. 一种串联式 MMC 拓扑结构及控制方法[P]. 中国专利: 202111107101. 5, 2021-12-31.
- [7] R. Feldman et al., "A Hybrid Modular Multilevel Voltage Source Converter for HVDC Power Transmission," in IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1577-1588.
- [8] M. B. Ghat and A. Shukla, "A New H-Bridge Hybrid Modular Converter (HBHMC) for HVDC Application: Operating Modes, Control, and Voltage Balancing," in IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6537-6554.
- [9] 王琛, 陶建业, 王毅, 等. 桥臂复用型模块化多电平换流器的拓扑及控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(09): 3373-3385.
- [10] Z. Hassan, A. J. Watson, F. Tardelli and J. Clare, "A Switched Mid-Point Modular Multilevel Converter for HVDC Applications," in IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3): 1534-1547.

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 双桥臂复用型 MMC 电路拓扑及其调制策略

杨顺<sup>1</sup>, 王毅<sup>1,2</sup>, 张振<sup>1</sup>, 刘伯文<sup>1</sup>, 张涛生<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003;

2. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北省 保定市 071003)

## Dual-Arm Multiplexing MMC circuit topology and its modulation strategy

YANG Shun<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhen<sup>1</sup>, LIU Bowen<sup>1</sup>, ZHANG Taosheng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-Grid (North China Electric Power University), Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** The Modular Multilevel Converter's (MMC) bulky size and high costs hinder its wide-scale application. This paper advances the existing Single-Arm Multiplexing MMC (SAM-MMC) with a novel design, the Dual-Arm Multiplexing MMC (DAM-MMC), along with its circuit topology and modulation strategy. To prevent individual devices from facing unbalanced voltage loads due to asynchronous switching of the arm switches, a low-voltage switching strategy is implemented. The DAM-MMC, employing  $4N$  sub-modules across three phases, achieves a 75% utilization rate, enhancing efficiency by 12.5% over the SAM-MMC. By analyzing energy fluctuations within the converter's bridge arms, the DAM-MMC has reduced the capacitance of the two multiplexed arm capacitors by approximately 31.9% and the upper and lower arm capacitors by 11.5% compared to the SAM-MMC. Effectively reduce the cost of the converter and its volume and weight, nearly realize the goal of converter lightweight.

**KEY WORDS:** Modular Multilevel Converter; Arm Multiplexing MMC; Modulation Strategy; Light-weighting

**摘要:** 模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)重量和体积大, 成本居高不下的问题降低了其实用性, 本文在单桥臂复用型 MMC (Single-Arm Multiplexing MMC, SAM-MMC) 的基础上, 提出了双桥臂复用型 MMC (Dual-Arm Multiplexing MMC, DAM-MMC), 并设计了其电路拓扑及调制策略, 为了避免桥臂切换开关开通和关断不一致导致个别器件会独自承受桥臂电压, 设计了桥臂开关低压切换策略。DAM-MMC 三相一共需要  $4N$  个子模块, 子模块的利用率为 75%, 相比于 SAM-MMC 利用率提升了 12.5%; 通过对换流器桥臂能量波动分析, DAM-MMC 的两个复用桥臂电容容值相比 SAM-MMC 的复用桥臂降低了约 31.9%, 上、下桥臂电容容值降低了约 11.5%, 有效地降低了换流器的成本及其体积和重量, 近一步实现换流器轻型化的目标。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 桥臂复用型 MMC; 调制策

略; 轻型化

## 0 引言

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 拥有诸多优势, 正逐渐成为柔性直流输电领域的前沿技术<sup>[1-2]</sup>。众多基于 MMC 的项目已经在实际成功应用<sup>[3]</sup>。与两电平或三电平换流器相比, MMC 拥有更好的运行特性, 但这种优势是以增加电容器、功率半导体器件数量为代价的<sup>[4]</sup>。以张北  $\pm 500\text{kV}$  四端柔性直流电网项目为例, 其 MMC 每个桥臂配置了 244 个模块, 这导致换流站的体积、重量和经济成本都大幅增加<sup>[5-6]</sup>。随着大规模新能源直流并网工程的推进, 对换流平台的轻量化需求日益迫切, 因此 MMC 在设备成本、重量和体积方面的问题需要得到有效解决<sup>[7]</sup>。

MMC 电容器是换流站成本和占地面积的主要组成部分, 其在成本通常占比超过 1/3, 体积上则占比超过 1/2<sup>[8]</sup>。因此, 减少电容器以及降低子模块的数量, 是实现换流站轻型化的主要思路<sup>[9-10]</sup>。前针对 MMC 轻型化主要的研究方向分为两类: 降低子模块的电容容值<sup>[11]</sup>和优化换流器的拓扑结构<sup>[12]</sup>。

优化换流器的拓扑结构方面, 单桥臂复用型 MMC (Single-Arm Multiplexing MMC, SAM-MMC) 基于时分复用原理, 通过引入一组桥臂切换开关, 将相单元划分为三个桥臂, 每个桥臂由  $N/2$  个子模块构成。与常规 MMC 相比, SAM-MMC 提升了子模块的利用率, 从 50% 增至 66.7%, 同时减少了  $1.5N$  个子模块电容<sup>[4]</sup>。本文在 SAM-MMC 的基础上增加一个复用桥臂, 提出了双桥臂复用型 MMC (Dual-Arm Multiplexing MMC, DAM-MMC), 并设计了满足耐压要求的桥臂切换开关, 改进了最近电

平逼近调制策略和切换开关低压切换策略,以降低串联器件动作不一致性带来的耐压问题。最后基于 MATLAB/Simulink 构建 DAM-MMC 的仿真模型,验证了所提出的拓扑结构和控制策略的有效性。

## 1 DAM-MMC 拓扑结构

### 1.1 复用型 MMC 经济性分析

忽略由于开关频率、调制策略的不同等所导致的子模块电容电压的波动,本文取子模块电容能量最大变化值  $\Delta E_{C\_max}$  为:

$$\Delta E_{C\_max} = \frac{1}{2} C [U_C + \Delta U_{C\_max}]^2 - \frac{1}{2} C [U_C - \Delta U_{C\_max}]^2 \quad (1)$$

$$= 2CU_C \cdot \Delta U_{C\_max}$$

公式中  $\Delta U_{C\_max}$  是子模块电容电压的最大波动值,一般工况下取 0.1 倍的电容电压额定值<sup>[13]</sup>。对于桥臂复用型 MMC,单个桥臂的能量  $E_{arm\_max}$  为:

$$\Delta E_{arm\_max} = \frac{2N}{M+1} CU_C \cdot \Delta U_{C\_max} \quad (2)$$

子模块的最小电容值一般由桥臂允许的最大能量波动来决定<sup>[14]</sup>。由式(2)我们可以推导出桥臂复用型 MMC 子模块的最小额定电容值:

$$C_{min} = \frac{(M+1)\Delta E_{arm\_max}}{2NU_C \cdot \Delta U_{C\_max}} \quad (3)$$

在参数及工况都相同的情况下对常规 MMC、SAM-MMC 和 DAM-MMC 进行仿真,得到每种换流器各桥臂能量波动的最大值,如表 1。可以看出,当换流器功率条件  $P=-1, Q=1$  时,桥臂能量波动取得最大值,常规 MMC 最大能量波动取 482.4kJ, SAM-MMC 上、下桥臂最大能量波动和复用桥臂基本相当,取其最大值 272.4kJ, DAM-MMC 上、下桥臂最大能量波动取 158.4kJ,复用桥臂取 123.2kJ。

表 1 桥臂能量的最大波动值

| Tab.1 Maximum fluctuation value of bridge arm energy |           |            |             |             |              |
|------------------------------------------------------|-----------|------------|-------------|-------------|--------------|
| 换流器各桥臂                                               |           | $P=1, Q=1$ | $P=1, Q=-1$ | $P=-1, Q=1$ | $P=-1, Q=-1$ |
| MMC                                                  | 上、下桥臂     | 412kJ      | 409kJ       | 482.3kJ     | 440.4kJ      |
|                                                      | 上、下桥臂     | 215.7kJ    | 207.9kJ     | 272.4kJ     | 243.4kJ      |
| SAM-MMC                                              | 复用桥臂      | 205.3kJ    | 201kJ       | 268.6kJ     | 232.6kJ      |
|                                                      | 上、下桥臂     | 127kJ      | 125kJ       | 158.4kJ     | 150.9kJ      |
| DAM-MMC                                              | 复用桥臂 I、II | 104kJ      | 121.7kJ     | 123.2kJ     | 115.8kJ      |

以常规 MMC 最小额定电容  $C_{MMC\_min}$  为基准,由式(3)计算得出其他换流器的最小额定电容。

$$C_{MMC\_min} = \frac{482400}{2NU_C \cdot \Delta U_{C\_max}} \quad (4)$$

$$C_{SAM\_min} = \frac{2 \cdot 272400}{2NU_C \cdot \Delta U_{C\_max}} = 1.1294 C_{MMC\_min} \quad (5)$$

$$C_{DAM\_up\&do\_min} = \frac{3 \cdot 158400}{2NU_C \cdot \Delta U_{C\_max}} = 0.9851 C_{MMC\_min} \quad (6)$$

$$C_{DAM\_I\&II\_min} = \frac{3 \cdot 123200}{2NU_C \cdot \Delta U_{C\_max}} = 0.7662 C_{MMC\_min} \quad (7)$$

由上式可以看出, DAM-MMC 的上、下桥臂和复用桥臂最小额定电容不相同,且均比常规 MMC 小,因此可以对 DAM-MMC 的不同桥臂设置不同的电容值,以实现换流器的轻型化。

### 1.2 DAM-MMC 桥臂切换开关设计

DAM-MMC 分为三种工作模式,如错误!未找到引用源。。

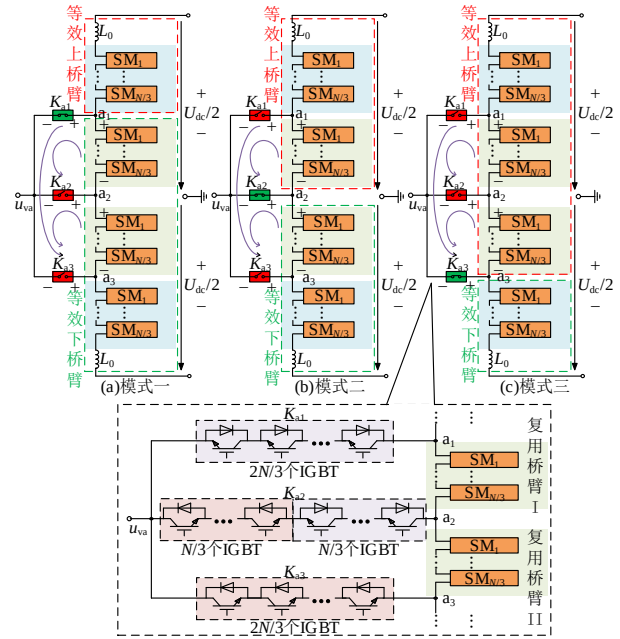


图 1 DAM-MMC 工作模式及开关拓扑结构

Fig.1 DAM-MMC working modes and switching topology

#### (1) 工作模式一

桥臂切换开关  $K_{a1}$  开通,其余切换开关关断,此时,复用桥臂 I、II 与下桥臂组成等效下桥臂。 $K_{a2}$  最大承受整个复用桥臂 I 的反向电压,  $K_{a3}$  最大承受整个复用桥臂 I 和 II 的反向电压。

#### (2) 工作模式二

桥臂切换开关  $K_{a2}$  开通,其余切换开关关断,此时,复用桥臂 I 与上桥臂组成等效上桥臂,复用桥臂 II 与下桥臂组成等效下桥臂。 $K_{a1}$  最大承受整个复用桥臂 I 的正向电压,  $K_{a3}$  最大承受整个复用桥臂 II 的反向电压。

#### (3) 工作模式三

桥臂切换开关  $K_{a3}$  开通,其余切换开关关断,此时,复用桥臂 I、II 与上桥臂组成等效上桥臂。 $K_{a2}$  最大承受整个复用桥臂 I 的正向电压,  $K_{a1}$  最大承受整个复用桥臂 I 和 II 的正向电压。



综上可知,  $K_{a1}$  最大承受会承受  $2/3$  的正向  $U_{dc}$ ,  $K_{a2}$  最大承受会承受  $1/3$  的正向  $U_{dc}$  和  $1/3$  的反向  $U_{dc}$ ,  $K_{a3}$  最大承受会承受  $2/3$  的反向  $U_{dc}$ 。按**错误!未找到引用源。**设计桥臂切换开关。

## 2 DAM-MMC 工作原理

### 2.1 DAM-MMC 等效电路

DAM-MMC 每相共计 4 个桥臂, 每个桥臂有  $N/3$  个子模块, 所以每个桥臂可以输出电压范围为  $0 \sim NU_{dc}/3$ 。以 A 相为例, 四个桥臂可以看作四个可控电压源  $u_{au}$ 、 $u_{al}$ 、 $u_{aII}$  和  $u_{ad}$ , A 相输出端电压为  $u_{va}$ , 等效上、下桥臂电压分别为  $u_{aeu}$  和  $u_{aed}$ :

$$\begin{cases} u_{aeu} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{va} \\ u_{aed} = \frac{U_{dc}}{2} + u_{va} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8), 从等效桥臂来看, DAM-MMC 与常规 MMC 的桥臂电压公式一致, 所以通过桥臂切换开关的开通和关断切换不同的工作模式, 在不同的工作模式下, 其等效电路就与常规 MMC 相当。

### 2.2 DAM-MMC 的调制策略

同文献[2], 对最近电平逼近法(Nearest Level Modulation, NLM)进行改进来对 DAM-MMC 进行调制, 在常规 MMC 使用的 NLM 上, 通过增加桥臂切换策略, 以满足不同时刻不同的工作模式。等效上、下桥臂投入的子模块数量分别  $N_{aeu}$ 、 $N_{aed}$ :

$$\begin{cases} N_{aeu} = \text{round}(\frac{u_{aeu}^*}{U_C}) = \frac{N}{2} - \text{round}(\frac{u_{va}^*}{U_C}) \\ N_{aed} = \text{round}(\frac{u_{aed}^*}{U_C}) = \frac{N}{2} + \text{round}(\frac{u_{va}^*}{U_C}) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可得出, 等效上、下桥臂投入的子模块数量最大为  $N$ , DAM-MMC 每个桥臂只有  $N/3$  个子模块, 所以需要设计桥臂切换开关的动作策略。

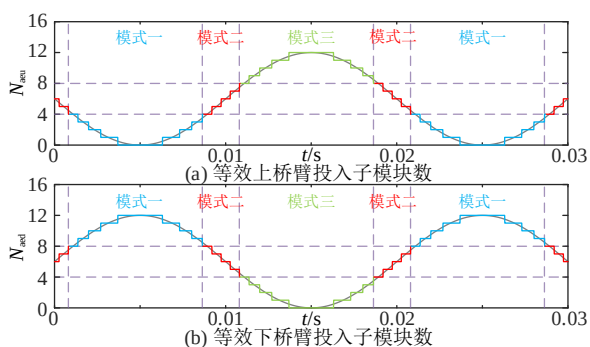


图2 DAM-MMC 改进最近电平逼近调制策略

Fig.2 DAM-MMC improved NLM modulation strategy

以等效上桥臂为例, 由 1.2 节可以得出, 桥臂

切换开关的动作策略为: 当  $N_{aeu} < N/3$  时或者  $N_{aeu} = N/3$  且  $N_{aeu}$  在递增时, 工作在模式一; 当  $N/3 < N_{aeu} < 2N/3$  时、 $N_{aeu} = 2N/3$  且  $N_{aeu}$  在递增时或者  $N_{aeu} = N/3$  且  $N_{aeu}$  在递减时, 工作在模式二; 当  $N_{aeu} > 2N/3$  时或者  $N_{aeu} = 2N/3$  且  $N_{aeu}$  在递增时, 工作在模式三。

式(9)可以进一步写为:

$$\begin{cases} N_{aeu} = \text{round}(\frac{u_{aeu}^*}{U_C}) = \begin{cases} N_{au} & \text{模式一} \\ N_{au} + N_{al} & \text{模式二} \\ N_{au} + N_{al} + N_{aII} & \text{模式三} \end{cases} \\ N_{aed} = \text{round}(\frac{u_{aed}^*}{U_C}) = \begin{cases} N_{al} + N_{aII} + N_{ad} & \text{模式一} \\ N_{aII} + N_{ad} & \text{模式二} \\ N_{ad} & \text{模式三} \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $N_{au}$ ,  $N_{al}$ ,  $N_{aII}$  以及  $N_{ad}$  分别为上桥臂、复用桥臂 I、复用桥臂 II 以及下桥臂投入的子模块数。

对于子模块电容电压的均衡, 同样由上式决定, 如**错误!未找到引用源。**, 不同的模式对应不同的投入桥臂, 再对所投入的桥臂所构成的等效桥臂中的电容电压进行排序, 然后根据桥臂电流的方向确定电容是应该充电还是放电, 充放电的电容个数由式(9)得出。

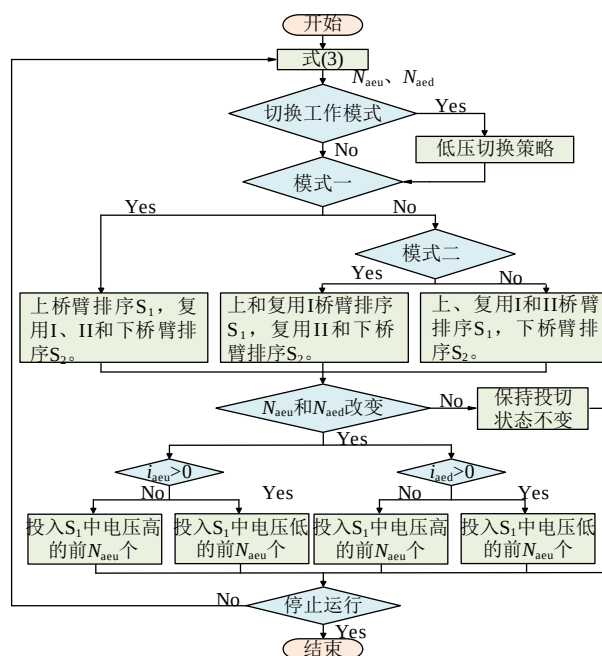


图3 DAM-MMC 电容均压策略

Fig.3 DAM-MMC Capacitor Equalization Strategy

在由串联的功率开关器件构成的桥臂切换开关中, 实际操作时开关的动作可能存在不同步的现象, 这可能会导致部分功率开关器件单独承受整个桥臂的电压, 从而增加了过电压损坏的风险。本文提出了一种桥臂切换开关的低压切换策略, 如**错误!**

未找到引用源。。

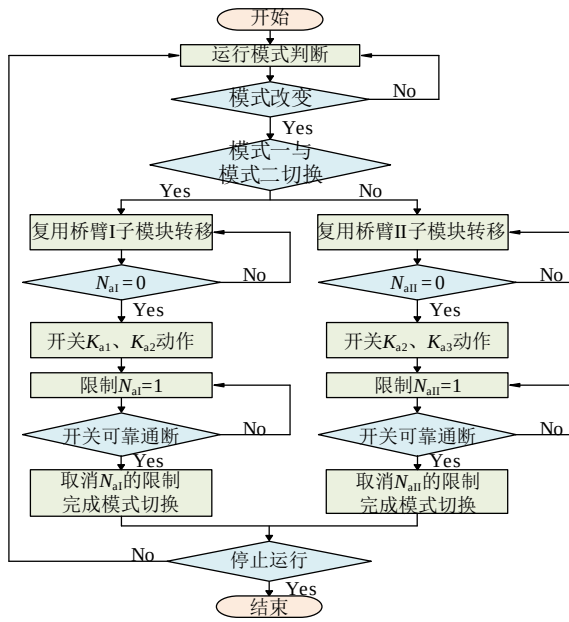


图4 工作模式低压切换策略

Fig.4 Low voltage switching strategy for working modes

当  $N_{aeu}$  等于  $N/3$  和  $2N/3$  时, 会触发工作模式的切换, 同时桥臂开关也会相应动作。以  $N_{aeu}$  为  $N/3$  的时刻为例, 此时, 开关  $K_{a1}$  和  $K_{a2}$  将进行切换, 使复用桥臂 I 从等效下桥臂的一部分转换为等效上桥臂的一部分。当检测到需要切换工作模式时, 先将复用桥臂 I 中的所有子模块旁路, 为了保证系统的稳定性, 其余的子模块将全部投入, 以满足所投入的子模块总数为  $N$ 。如果桥臂切换开关没能可靠动作, 将复用桥臂 I 投入子模块强制限制为 1 个, 保证桥臂切换开关中滞后动作的器件仅承受电容电压  $U_C$ 。这种策略的优势在于, 当开关  $K_{a1}$  和  $K_{a2}$  进行切换时, 它们的两端电位是相等的, 桥臂切换开关不会承受过高的电压。

### 3 仿真验证与分析

基于 MATLAB/Simulink 构建如错误!未找到引用源。所示的单端 DAM-MMC-HVDC, 仿真参数如表 2 所示。验证前文所提出的改进 NLM 调制策略对实现 DAM-MMC 的可行性, 以及低压切换策略对于桥臂切换开关设计的合理性。

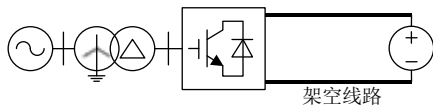


图5 单端 DAM-MMC-HVDC 系统结构图

Fig.5 Single-Ended DAM-MMC-HVDC System Structure

仿真结果以 A 相为例, 由错误!未找到引用源。可以看出 DAM-MMC 交流侧电压一共有 25 个电

平, 符合前文推导, 且由错误!未找到引用源。知 DAM-MMC 谐波和常规 MMC 相当, 都能满足实际需求, 说明了改进 NLM 调制策略对实现 DAM-MMC 的可行性。

表2 DAM-MMC 仿真系统参数

Tab2 DAM-MMC simulation system parameters

| 参数                            | 数值                |
|-------------------------------|-------------------|
| 额定有功功率 $P/\text{MW}$          | 3                 |
| 额定无功功率 $Q/\text{Mvar}$        | 0.9               |
| 直流侧额定电压 $U_{dc}/\text{kV}$    | $\pm 10\text{kV}$ |
| 交流侧额定电压幅值 $U_{ac}/\text{kV}$  | 10kV              |
| 桥臂电感值 $L_0/\text{mH}$         | 5                 |
| 电容额定电压 $U_C/\text{kV}$        | 833.33            |
| 上、下桥臂电容值 $C_1/\text{mF}$      | 3                 |
| 复用 I、II 桥臂电容值 $C_2/\text{mF}$ | 2.28              |

错误!未找到引用源。所示为 DAM-MMC 的 A 相各桥臂切换开关的电压, 由 1.2 节推导可知  $K_{a1}$  最大承受会承受  $2/3$  倍的正向  $U_{dc}$ , 加之实际运行中电容电压会存在 10% 的波动, 结合表 2 的参数得  $K_{a1}$  最大承受电压应为 14.67kV, 仿真得到最大电压为 13.6kV, 满足要求, 其余两个桥臂也都满足, 说明了 DAM-MMC 桥臂切换开关设计的合理性。

图 10 所示为 DAM-MMC 的 A 相各桥臂电容电压的波动情况, 通过本文提出的电容电压均衡策略, 各桥臂电容电压均在额定值附近波动, 且波动范围控制在了 10% 以内。此外, 由 1.1 节的结论, 降低了复用桥臂的电容值并没有影响各桥臂间能量均衡的效果, 说明了 DAM-MMC 降低复用桥臂电容容值的实现轻型化的可行性。

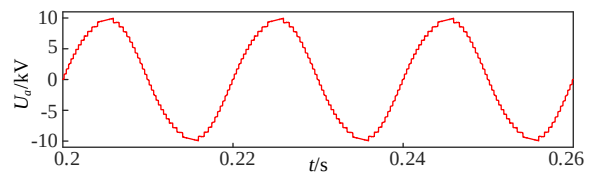


图6 DAM-MMC 交流侧输出电压

Fig.6 DAM-MMC AC Side Output Voltage

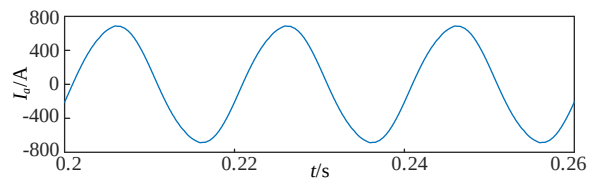


图7 DAM-MMC 交流侧输出电流

Fig.7 DAM-MMC AC Side Output Current

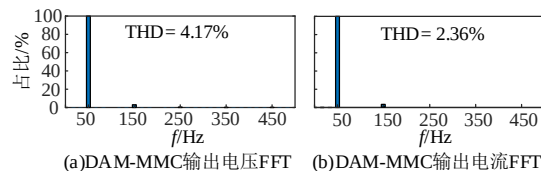


图8 DAM-MMC 交流侧输出电压电流 FFT

Fig.8 DAM-MMC AC Side Output Voltage Current FFT

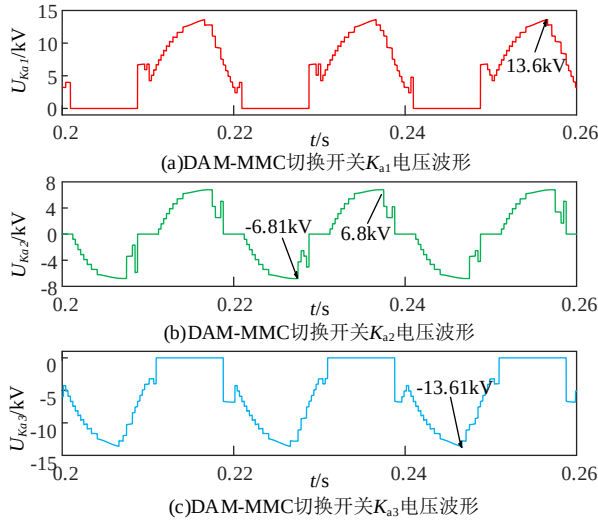


图9 DAM-MMC 切换开关电压

Fig.9 DAM-MMC toggle switch voltage

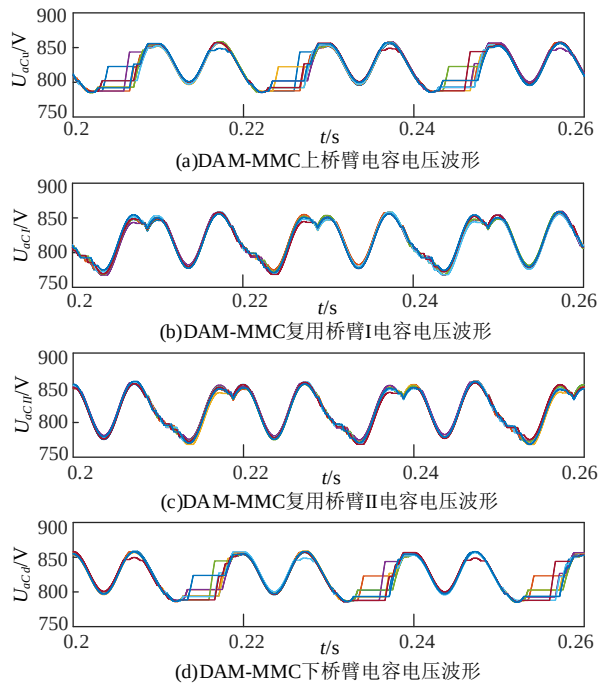


图10 DAM-MMC 各桥臂电容电压

Fig.10 DAM-MMC capacitor voltage for each bridge arm

## 4 总结

本文基于单桥臂复用型 MMC 提出了双桥臂复用型 MMC, 分析了其经济性, 并设计了基于 NLM 的改进调制策略以及满足桥臂切换开关耐压要求的低压切换策略。

DAM-MMC 与 SAM-MMC 相比, 子模块电容数量由  $4.5N$  降低至  $4N$ , 子模块的利用率为 75%, 相比于 SAM-MMC 利用率提升了 12.5%; 而且其中复用桥臂的  $2N/3$  个电容容值降相比 SAM-MMC 的

复用桥臂降低了约 31.9%, 上、下桥臂电容容值降低了约 11.5%, 显著降低了转换器的成本、体积和重量, 近一步实现换流器的轻型化。

## 参考文献

- [1] 余祖泳, 张振, 王毅, 等. 轻型化 MMC 子模块配置方法及其控制策略[J]. 电源学报: 1-13.
- [2] 陶建业. 桥臂复用型的轻型化 MMC 拓扑及其控制策略研究[D]. 华北电力大学, 2022.
- [3] 杨仁忻, 施刚, 蔡旭, 等. 风电-多端柔直送出系统电压源型控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(05): 1498-1509.
- [4] 王琛, 陶建业, 王毅, 等. 桥臂复用型模块化多电平换流器的拓扑及控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(09): 3373-3385.
- [5] 郭贤瑞, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [6] 刘麒麟, 张英敏, 陈若尘, 等. 张北柔直电网单极接地故障机理分析[J]. 电网技术, 2020, 44(08): 3172-3179.
- [7] 蔡旭, 陈根, 周党生, 等. 海上风电变流器研究现状与展望[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(02): 102-115.
- [8] 董鹏, 蔡旭, 吕敬. 大幅减小子模块电容容值的 MMC 优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5369-5380.
- [9] Rui Li, Lujie Yu, Lie Xu, 等. Coordinated Control of Parallel DR-HVDC and MMC-HVDC Systems for Offshore Wind Energy Transmission[Z], 2019.
- [10] 许建中, 李钰, 陆锋, 等. 降低 MMC 子模块电容电压纹波幅值的方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(02): 571-584, 654.
- [11] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(07): 2097-2106.
- [12] 王朝亮, 吕文韬, 许烽, 等. 柔性直流配电网 MMC 子模块级联数量优化设计[J]. 浙江电力, 2019, 38(04): 8-12.
- [13] Ilves Kalle, Norrga Staffan, Harnfors Lennart, 等. On Energy Storage Requirements in Modular Multilevel Converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29: 77-88.
- [14] Michaël M. C. Merlin, Tim C. Green. Cell capacitor sizing in multilevel converters: cases of the modular multilevel converter and alternate arm converter[J]. Iet Power Electronics, 2015, 8: 350-360.



杨顺

### 作者简介:

杨顺(1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电, E-mail: [yangshun\\_edu@163.com](mailto:yangshun_edu@163.com);

王毅(1977-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为柔性直流输电技术、电力电子技术在电力系统中的应用等, E-mail: [yi.wang@ncepu.edu.cn](mailto:yi.wang@ncepu.edu.cn).

张振(1997-), 男, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电, E-mail: [zhangzhen99ncepu@163.com](mailto:zhangzhen99ncepu@163.com);

刘伯文(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电, E-mail: [bowen6534@outlook.com](mailto:bowen6534@outlook.com);

张涛生(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电, E-mail: [2632422687@qq.com](mailto:2632422687@qq.com).

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于灵敏度分析的地铁杂散电流泄漏点定位方法研究

杨雯萱, 王爱民\*

(1. 西华大学电气与电子信息学院、四川省 成都市 611730)

## Study on the Location Method of Leakage Points for Stray Current in Subway Systems Based on Sensitivity Analysis\*

YANG Wenxuan, WANG Aimin

(School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 611730, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** As urban rail transit systems have been developing at a high pace, the problem of electrochemical corrosion caused by stray currents in subway systems has become increasingly critical and cannot be ignored. However, any local failure in the insulation layer between the subway tracks and the ground exacerbates the leakage of stray currents. Therefore, how to utilize online information to accurately identify areas of deteriorated insulation along the line is particularly important. In this paper, we first establish a resistance network model for the subway system. On this basis, we investigate the sensitivity relationship of station track voltages due to the transition resistances of the rails. We propose a computational method for locating the leakage points of stray currents in subway systems based on sensitivity analysis. According to analytical examples, the proposed method shows good accuracy and applicability. It achieves the rapid, efficient, and accurate determination of degraded insulation sections on subway lines without the need for manual offline measurements.

**KEY WORDS:** Urban Rail Transit, Stray Current, Insulation Deterioration, Online Localization

**摘要:** 随着城市轨道交通系统的高速发展, 地铁杂散电流引起的电化学腐蚀问题越发不容忽视, 然而地铁轨道与地面绝缘层的任何局部故障都会加剧杂散电流的泄漏, 因此, 如何利用在线信息实现对线路上绝缘劣化区域定位尤其重要。本文首先建立了地铁电阻网络模型, 在此基础上研究钢轨过渡电阻引起的车站网轨电压灵敏度关系, 提出了基于灵敏度分析的地铁杂散电流泄漏点定位的计算方法。根据算例分析, 所提方法具有良好的准确性和适用性。实现了无需人工线下测量, 快速高效准确地确定地铁线路绝缘劣化区间定位。

**关键词:** 城市轨道交通, 杂散电流, 绝缘劣化, 在线定位

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

目前, 随着城市轨道交通的高速发展以及线路运营时间的增加, 钢轨和道床的绝缘垫层逐渐发生不同程度的劣化导致绝缘性能的下降, 导致地铁杂散电流泄漏加剧, 一旦泄漏超过阈值, 就会触发排流装置工作, 但此举反而会导致钢轨电势增加, 形成一个不利的循环效应, 更加速了杂散电流引起的对阴直流电车路轨和轨道附近埋地金属的腐蚀。因此, 相较于被动投入排流装置, 采取主动策略精确识别轨道绝缘破损位置, 是从源头上减轻杂散电流引发的腐蚀危害的更加行之有效的方法。

现有的针对轨道和地面绝缘劣化区域的定位主要有两种方法, 其一, 通过分析存在绝缘损坏点对的钢轨电位和杂散电流的影响分布和特征, 实现对绝缘劣化区域的定位。文献<sup>[1]</sup>利用轨道对地存在局部绝缘损坏点会导致钢轨对地零电位会偏移至损坏点且该损坏点不位于机车和牵引变电所的中间位置这一特征, 确定了该零电位点就是地铁轨道对地的局部损坏点; 文献<sup>[2]</sup>建立了杂散电流分布的离散模型, 并用过渡电阻替换接地电阻模拟模型中绝缘损坏点, 以此来研究局部绝缘损坏位置以及接地阻值对钢轨电位分布的影响; 文献<sup>[3]</sup>使用CDEGS仿真了单个绝缘扣件绝缘损坏对杂散电流分布的影响, 仿真结果显示在绝缘性能损坏的绝缘扣件处的杂散电流泄漏量剧增; 其二, 根据地铁规章规定的地铁过渡电阻测量方法, 在此基础上对相关测量的参数、步骤进行优化提高。文献<sup>[4]</sup>提出了基于C型行波法的轨地绝缘损坏定位方法, 人工

向绝缘损坏线路注入脉冲信号,根据行波信号在测量点与故障点之间往返的时间和行波的波速来确定绝缘损坏故障点的具体位置,对绝缘损坏点进行定位。文献<sup>[5]</sup>基于地铁绝缘破损定位的需求及绝缘扣件压降分布规律,提出了基于光纤光栅的绝缘破损定位方案。然而此类方法大多为离线测量,需要工人在列车停运时在线路上测量相关数据,耗时耗力。

经现有研究发现,地铁轨道存在局部破损点会导致钢轨电位发生变化,因此,本文针对局部绝缘破损引起的钢轨对地过渡电阻变化影响钢轨电位变化的灵敏度展开研究,提出一种基于灵敏度分析的地铁杂散电流泄漏点定位方法,通过直接获取列车与车站在线监测信息与线路信息,建立地铁网络电阻模型,并基于此模型构建杂散电流泄漏诊断模型,采用迭代法确定钢轨过渡电阻分布并确定过渡电阻异常区域即杂散电流泄漏点。最后,通过理论计算实例证明该方法具有良好的适用性、可靠性、便捷性,实现了无需对地铁系统加装其他电气设施,在线定位一个或多个地铁杂散电流泄漏点的目标。

## 1 基本原理

对于一个“钢轨-大地”结构杂散电流离散模型如图1所示

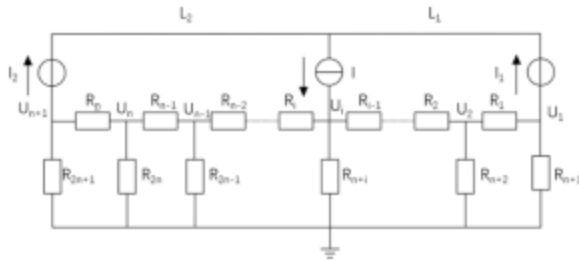


图1 钢轨-大地结构离散模型网络图

Fig.1 Discrete Model Network Diagram of Rail-Soil Structure

图1 钢轨-大地结构离散模型网络有  $B(B=2n+1)$  个支路包含钢轨纵向电阻支路和钢轨对地过渡电阻支路,  $N(N=n+1)$  个钢轨电位节点, 设置节点间距相等, 节点数量决定模型泄漏点定位精细化程度。牵引变电所1向机车供电电流为  $I_1, A$ ; 牵引变电所2向机车供电电流为  $I_2, A$ ; 机车取流位置距牵引变电所1的距离为  $L_1, km$ ; 距牵引变电所2的距离为  $L_2, km$ ; 钢轨电阻和过渡电阻如图所示。

对各钢轨电位节点节点列节点电压方程如下:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{n+1}}\right)U_1 - \frac{1}{R_1}U_2 = -I_1 \\ -\frac{1}{R_1}U_1 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{n+2}}\right)U_2 - \frac{1}{R_1}U_3 = 0 \\ \dots \\ -\frac{1}{R_{i-1}}U_{i-1} + \left(\frac{1}{R_{i-1}} + \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_{n+i}}\right)U_i - \frac{1}{R_i}U_{i+1} = I \\ \dots \\ -\frac{1}{R_{n-1}}U_{n-1} + \left(\frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{n+n}}\right)U_n - \frac{1}{R_n}U_{n+1} = 0 \\ -\frac{1}{R_n}U_n + \left(\frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{2n+1}}\right)U_{n+1} = -I_2 \end{cases}$$

(1)

且其中供电电流与机车取流的关系为:

$$I = I_1 + I_2, \text{ 且 } I_1 = \frac{L_2}{L}I, \quad I_2 = \frac{L_1}{L}I$$

其节点方程矩阵形式为:

$$Y_N \times U_N = I_N \quad (2)$$

式(2)中  $U_N$  为接地网各个节点电位组成的向量,  $Y_N$  为节点导纳矩阵,  $I_N$  为列车向钢轨注入电流向量。其中节点导纳矩阵有电路的连接方式和各个支路的电导共同决定, 可以表示为:

$$Y_N = A \times Y_b \times A^T \quad (3)$$

$$A \times Y_b \times A^T \times U_N = I_N \quad (4)$$

式(3)(4)中:  $A$  为电路的关联矩阵,  $Y_b$  为接地网各支路的电导组成的对角矩阵。

$$Y_b = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_B \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式(2)可推导

$$U_N = Y_N^{-1}I_N \quad (6)$$

将  $U_N$  对第  $i$  条支路求偏导数可得<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial U_N}{\partial R_i} = \frac{\partial Y_N^{-1}}{\partial R_i} I_N + Y_N^{-1} \frac{\partial I_N}{\partial R_i} \quad (7)$$

由于列车向钢轨注入电流的大小与钢轨过渡电阻变化无关, 因此  $I_N$  与各支路电阻  $R_i$  无关, 上式可化作



$$\frac{\partial U_N}{\partial R_i} = \frac{\partial Y_N^{-1}}{\partial R_i} I_N \quad (8)$$

由  $Y_N^{-1} Y_N = 1$  (1 为单位矩阵) 可得

$$\frac{\partial Y_N^{-1}}{\partial R_i} Y_N + Y_N^{-1} \frac{\partial Y_N}{\partial R_i} = 0 \quad (9)$$

将(3)式(6)式(9)式代入(8)式得

$$\frac{\partial U_N}{\partial R_i} = -Y_N^{-1} A \frac{\partial Y_b}{\partial R_i} A^T U_N \quad (10)$$

因  $U_N$  的变化与支路上每一过渡电阻变化有关, 每一过渡电阻的变化量乘以其灵敏度之和就是  $U_N$  的变化量, 由全微分定理可得

$$dU_N = \sum_{i=1}^{2n+1} \frac{\partial U_N}{\partial R_i} dR_i \quad (11)$$

由于杂散电流泄漏与钢轨电阻无关, 绝缘扣件的损坏会引起过渡电阻的变化, 所以上式可写作

$$dU_N = \sum_{i=n+1}^{2n+1} \frac{\partial U_N}{\partial R_i} dR_i \quad (12)$$

写成增量矩阵的形式可得  $\Delta U_N = M \Delta R$ , 展开形式为

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \dots \\ \Delta U_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_1}{\partial R_{n+1}} & \frac{\partial U_1}{\partial R_{n+2}} & \dots & \frac{\partial U_1}{\partial R_{2n+1}} \\ \frac{\partial U_2}{\partial R_{n+1}} & \frac{\partial U_2}{\partial R_{n+2}} & \dots & \frac{\partial U_2}{\partial R_{2n+1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial U_{n+1}}{\partial R_{n+1}} & \frac{\partial U_{n+1}}{\partial R_{n+2}} & \dots & \frac{\partial U_{n+1}}{\partial R_{2n+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R_{n+1} \\ \Delta R_{n+2} \\ \dots \\ \Delta R_{2n+1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\Delta U_N = U'_N - U_N^0 \quad (14)$$

其中  $U'_N$  是测得绝缘劣化后钢轨节点的电压值,  $U_N^0$  是各个支路电阻在初始设计值下的各个节点电压。

令  $Y_N^{-1} = C$ , 由(10)式可得

$$\frac{\partial U_k}{\partial R_i} = \frac{1}{R_i^2} C_{k(i-n)} U_{i-n} \quad (15)$$

其中,  $U_k$  代表第  $k$  个节点电压,  $C_{k(i-n)}$  代表  $C$  矩阵中第  $k$  行第  $(i-n)$  个元素,  $U_{i-n}$  代表第  $(i-n)$  个节点电压。

城轨地铁回流系统中的固有信息包含: 车站里程信息、钢轨对地绝缘劣化前钢轨电压、牵引变电

所电压、线路参数信息等, 可通过监测系统直接获取的参数信息包含: 车站节点的实时电压、机车位置以及机车向钢轨注入的电流。由于只有车站节点处的  $\Delta U_N$  可以得到, 因此式(13)中只能抽取车站节点相关的若干行得到一个高度欠定的线性方程组。

若要增加该方程组数量, 须充分利用车站节点钢轨电压监测信息, 当列车处于不同的位置时可以看作对钢轨回流系统进行不同的激励, 假设在第  $k$  种激励方式下, 对系统的  $N_j$  ( $j$  为可及节点) 个节点得到电压进行观测, 则系统施加  $L$  种不同的激励方式可获得  $P = \sum_{k=1}^L N_j$  个节点电压增量的观测值, 可以构造  $P$  个关于各个支路的方程, 这样大大扩大了方程个数。将这  $P$  个方程写成矩阵形式, 为

$$\Delta U_N = U'_N - U_N^0 = M \Delta R \quad (16)$$

令  $\frac{\partial U_i^k}{\partial R_j} = M_{ij}^{kj}$  表示第  $k$  种激励下支路  $j$  的电阻变化对节点  $i$  的电压影响的灵敏度

$$\begin{bmatrix} \Delta U_\alpha^1 \\ \dots \\ \Delta U_\varphi^1 \\ \Delta U_\alpha^2 \\ \dots \\ \Delta U_\varphi^2 \\ \dots \\ \Delta U_\alpha^L \\ \dots \\ \Delta U_\varphi^L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{n+1}^{1,\alpha} & M_{n+2}^{1,\alpha} & \dots & M_{2n+1}^{1,\alpha} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n+1}^{1,\varphi} & M_{n+2}^{1,\varphi} & \dots & M_{2n+1}^{1,\varphi} \\ M_{n+1}^{2,\alpha} & M_{n+2}^{2,\alpha} & \dots & M_{2n+1}^{2,\alpha} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n+1}^{2,\varphi} & M_{n+2}^{2,\varphi} & \dots & M_{2n+1}^{2,\varphi} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n+1}^{L,\alpha} & M_{n+2}^{L,\alpha} & \dots & M_{2n+1}^{L,\alpha} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n+1}^{L,\varphi} & M_{n+2}^{L,\varphi} & \dots & M_{2n+1}^{L,\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta R_{n+1} \\ \Delta R_{n+2} \\ \dots \\ \Delta R_{2n+1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中  $M$  为  $P$  行  $n+1$  列的矩阵  $\Delta U_N$ 、 $U'_N$ 、 $U_N^0$  均为  $P$  行一列的列向量, 分别称作增广电压增量、增广电压量测向量和增广电压初值向量。 $\alpha \sim \varphi$  为可及节点的编号。

由于  $\Delta U_N$  和  $\Delta R$  之间存在非线性关系, 也即  $M$  中的元素并不是常数, 因此增广故障诊断方程不能直接采用线性的方法求解。为了利用线性方法求解非线性问题, 采取迭代的措施。

为了叙述方便, 用  $X_T$  代表  $X$  的第  $T$  次迭代结果。迭代采取下列步骤:

第 1 步: 获取车站位置实时获取列车在不同位置注入电流状态下的实时电压测向量  $U'_N$ 。采用节点电压法, 根据接地网各个支路电阻的初值  $R_0$  (即设计值) 计算出增广电压初值向量  $U_{N,0}$ 。令迭代次数计数器  $T=1$ 。

第 2 步: 计算第  $T$  次迭代时的增广电压增量向

量

$$\Delta U_{N,T} = U'_N - U_{N,T-1} \quad (18)$$

和增广故障诊断矩阵  $M_T$ ,  $M_T$  中的元素为

$M_{j,T}^{k,i}$ 。

$$M_{j,T}^{k,i} = \frac{\partial U_i^k}{\partial R_j} = \frac{1}{R_j^2} \left|_{R_{T-1}} C_{i(j-n)T-1} U_{j-nT-1}^k \right. \quad (19)$$

$$C_T = Y_{NT}^{-1} \quad (20)$$

其中  $C_{i(j-n)}$  为  $C$  中第  $i$  行第  $j-n$  个元素, 构造第  $T$  次迭代时的增广故障诊断方程

$$\Delta U_{N,T} = M_T \Delta R_T \quad (21)$$

第 3 步: 采用最小二乘法, 求第  $T$  次迭代时, 满足式(1.18)描述的目标函数最优解  $\Delta R_T$ 。

$$\begin{aligned} \min f(\Delta R_{n+1,T}, \Delta R_{n+2,T}, \dots, \Delta R_{2n+1,T}) = \\ \|M_T \Delta R_T - \Delta U_{N,T}\|_2 \end{aligned} \quad (22)$$

计算第  $T$  次迭代时的支路电阻向量

$$R_T = R_{T-1} + \Delta R_T \quad (23)$$

第 4 步: 如果

$$\|R_T\|_2 < \varepsilon \quad (24)$$

则退出迭代,  $R_T$  就是最终的诊断结果, 记  $R_D$ 。式(24)中  $\varepsilon$  是一个很小的正数, 代表收敛精度。若式(24)不满足, 则: 采用节点电压法, 根据  $R_T$  计算出第  $T$  次迭代时的增广电压初值向量  $U_{N,T+1}$ ; 令迭代次数计数器  $T=T+1$ ; 返回第 2 步。

## 2 案例实例

图 2 所示为一个有 6 个钢轨电位节点和 11 条钢轨纵向电阻和钢轨过渡电阻的地铁电阻网络理论模型, 设置两牵引变电所间距  $3\text{km}$ , 线路节点与节点之间距离相等, 其中 1、6 节点为牵引变电所, 3 节点为车站节点, 设置  $R7$  位置为杂散电流泄漏点, 获取列车在 1 至 6 节点行驶时向地铁钢轨注入的电流以及这些时刻相应的牵引变电所和车站节点钢轨电位。

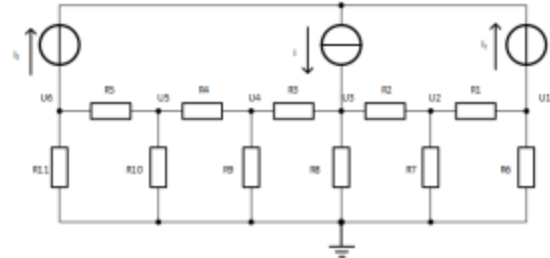


图 2 钢轨—大地结构离散模型网络图  
Fig.2 Discrete Model Network Diagram of Rail-Soil Structure

使用 Matlab 对图 2 所示地铁网络模型进行建模, 设置钢轨纵向电阻为  $0.03\Omega/\text{km}$ , 钢轨过渡电阻为  $3\Omega/\text{km}$ , 列车注入电流大小为  $1000\text{A}$ , 牵引变电所牵引电压为  $1500\text{V}$ 。

设置迭代收敛容差为  $1\text{e-}6$ 。

定义各个过渡电阻支路诊断结果对于实际电阻的相对误差  $e_i$  为

$$e_i = \frac{R_{z,i} - R_{r,i}}{R_{r,i}} \times 100\% \quad (25)$$

其中  $R_{zi}$  为过渡电阻支路最终迭代结果,  $R_{ri}$  为设置的过渡电阻支路真实值。

设置  $R7$  支路为杂散电流泄漏点且杂散电流泄漏点处设置过渡电阻缩小为泄漏前的  $1/200$ 。由 Matlab 计算结果如表 1 所示

表 1  $R7$  支路为杂散电流泄漏点时诊断结果

|               | R6 | R7    | R8 | R9 | R10 | R11 |
|---------------|----|-------|----|----|-----|-----|
| 真实值/ $\Omega$ | 5  | 0.025 | 5  | 5  | 5   | 5   |
| 计算值/ $\Omega$ | 5  | 0.025 | 5  | 5  | 5   | 5   |
| 误差/%          | 0  | 0     | 0  | 0  | 0   | 0   |

设置  $R7$ 、 $R9$  支路为杂散电流泄漏点且杂散电流泄漏点处设置过渡电阻缩小为泄漏前的  $1/200$ 。由 Matlab 计算结果如表 2 所示

表 2  $R7$ 、 $R9$  支路为杂散电流泄漏点时诊断结果

|               | R6 | R7    | R8 | R9    | R10 | R11 |
|---------------|----|-------|----|-------|-----|-----|
| 真实值/ $\Omega$ | 5  | 0.025 | 5  | 0.025 | 5   | 5   |
| 计算值/ $\Omega$ | 5  | 0.025 | 5  | 0.025 | 5   | 5   |
| 误差/%          | 0  | 0     | 0  | 0     | 0   | 0   |

从表 1 表 2 可知, 本文算法能够正确诊断出一个或多个杂散电流泄漏点位置, 且能计算出该泄漏点绝缘劣化后的钢轨对地过渡电阻, 证明了本文方法的可靠性和适用性。

## 3 结论

局部绝缘破损引起的钢轨对地过渡电阻变化

影响钢轨电位变化的灵敏度展开研究,提出一种基于灵敏度分析的地铁杂散电流泄漏点定位方法,通过设计迭代算法,实现了线路上存在一个或多个杂散电流泄漏点时对绝缘劣化区域的准确定位。

本文提出的方法准确率高,可适用性强,且不需要添置额外的电气设备,仅从获取车站以及列车在线监测的信息即可计算出杂散电流泄漏点的位置区域,随着模型划分钢轨电位节点数越多,定位精细化程度越高,有助于提前排查绝缘劣化区域,帮助检修人员及时维护钢轨对地绝缘装置,从源头上抑制杂散电流泄漏带来的危害。

## 参考文献

- [1] 胡先茂,李国欣,王崇林,等.局部绝缘损坏对地铁杂散电流的影响[J].都市轨道交通,2009,22(03):76-78.
- [2] 袁朋生.回流系统绝缘损坏情况下钢轨电位分布研究[J].硅谷,2014,7(06):58-60.
- [3] Charalambos A. Comprehensive Modeling to Allow Informed Calculation of DC Traction Systems' Stray Current Levels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(11):9667-9677.
- [4] 刘建华,穆明亮,裴文龙,等.基于C型行波法的轨地绝缘损坏定位方法研究[J].城市轨道交通研究,2015,18(09):37-39+54.DOI:10.16037/j.1007-869x.2015.09.008.
- [5] 薛宏宇.基于光纤光栅的地铁走行轨绝缘破损定位关键技术研究[D].中国矿业大学,2021.DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2021.002026.
- [6] 罗先觉.一种同时求解电路全部响应对全部参数灵敏度的算法[J].西安交通大学学报,1997,(12):3-9.



杨婕

收稿日期: 2024-07-26。

作者简介:

杨婕(1999),女,硕士研究生,研究方向为城市轨道交通杂散电流外析与计算, E-mail: 806681256@qq.com;

王爱民(1991),女,博士,硕士生导师,研究方向为城市轨道交通杂散电流计算方法及外布规律外析研究等, E-mail: wam501382@163.com

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 一种基于分层核 PCA 和层次聚类的电费支付行为模式识别方法

张文<sup>1</sup>, 闫富荣<sup>1</sup>, 陈雁<sup>1</sup>, 张明珠<sup>1</sup>, 周春<sup>1</sup>, 陈亮<sup>1</sup>, 陈岩<sup>1</sup>, 赵婧<sup>1</sup>

(1 北京中电普华信息技术有限公司, 北京 100085)

## A method of electricity bill payment behavior pattern recognition based on hierarchical kernel PCA and hierarchical clustering

ZHANG Wen<sup>1</sup>, YAN Furong<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>, ZHANG Mingzhu<sup>1</sup>, ZHOU Chun<sup>1</sup>, CHEN Liang<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>1</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>

(1 Beijing China Power Information Technology Co.LTD., 100085, Beijing)

**ABSTRACT:** The identification of the user's electricity payment behavior pattern is of great significance to both the power enterprise and the electric power user. On the one hand, through the recognition of electricity bill payment behavior pattern, the power enterprise can assess the credit status of users and discover the potential risk of non-payment in a timely manner. On the other hand, through the recognition of electricity bill payment behavior pattern, the power enterprise can provide users with personalized electricity advice and personalized service, which can not only achieve energy saving and emission reduction, reduce operating cost and further improve economic benefit, but also enhance the satisfaction and loyalty of the electric power user. In this paper, we propose a method for recognizing electricity bill payment behavior pattern of the electric power user based on hierarchical kernel principal component analysis (PCA) and hierarchical clustering. The method firstly extracts the user's electricity bill payment features and electricity consumption behavior features, and then uses the hierarchical kernel PCA method to downscale the above features to obtain the user's key nonlinear features. Finally, different electricity bill payment behavior patterns of the electric power users are recognized by the hierarchical clustering. The results show the method can realize accurate prediction and classification of users' electricity bill payment behavior patterns.

**KEY WORDS:** Electricity Bill Payment Behavior Patterns, Electricity Bill Payment Features, Electricity Consumption Behavior Features, Hierarchical Kernel Principal Component Analysis, Hierarchical Clustering.

**摘要:** 用户电费支付行为模式的识别对于电力企业和电力用户都具有重要的意义。一方面, 电力企业可以通过对电费支付行为模式的识别, 评估用户的信用状况, 及时发现潜在的欠费风险。另一方面, 通过识别用户的电费支付行为模式,

电力企业可以向用户提供个性化的用电建议及个性化服务, 不仅可以实现节能减排, 降低运营成本, 进一步提高经济效益, 而且可以提升电力用户满意度和忠诚度。本文提出一种基于分层核主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和层次聚类的电费支付行为模式识别方法, 首先提取用户的电费支付特征和用电行为特征, 然后使用分层核 PCA 方法对以上特征进行分步迭代降维获取用户的关键非线性特征, 最后通过层次聚类识别用户不同的电费支付行为模式, 实现对用户电费支付行为模式的精确预测与分类。

**关键词:** 电费支付行为模式, 电费支付特征, 用电行为特征, 分层核主成分分析, 层次聚类。

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号 (P10163)

## 0 引言

电费是电力企业维持电力供应的重要资金来源。及时、足额的电费回收有助于保障电力供应的稳定性和可靠性, 为社会经济发展提供坚实的能源保障。电费回收管理<sup>[1-5]</sup>一直是供电企业的工作重点, 且是供电企业经营活动中最为重要的环节。由于当前外部经济运行情况错综复杂, 且很多企业面临转型压力, 在多重影响因素影响下, 用户面临产量下降、销售困难等问题, 因此电费回收逐渐成为困扰电力企业的一大问题。电费支付行为模式的识别对电费回收管理具有非常重要的作用。目前供电公司对客户电费支付行为模式的预判能力不足, 不能根据用户的用电特性及历史电费支付行为提前采取针对性的防范措施, 是目前防范电费回收风险面临的一大难题<sup>[6]</sup>。

国内外专家和学者在电费回收风险识别方面进行了大量研究工作, 主要集中在对用户的基本属性、缴费行为、逾期行为、用电行为、客户信用等维度进行特征筛选及优化形成电费风险指标体系, 并在此基础上建立机器学习模型对风险进行预测。文献[7]对某区域内用户的历史数据进行统计分析,

发现影响电费回收的关键因素,进而运用逻辑回归模型进行建模分析,但未对模型输入变量的预处理做详细说明。文献[8]根据市场细分理论,对高压用户、低压非居民用户、低压居民用户分别构建了预测模型。文献[9]对用户的属性和行为表现等进行分析,提取相关业务逻辑,建立了电费回收风险分类预测模型,但是未对逻辑回归模型中出现的数不平衡问题进行研究。文献[10]采用多个维度确定模型的指标体系,运用逻辑回归算法构建电费风险预测模型,并依据得到的模型结果量化出变量标准评分卡表,将客户划分为高风险、中风险和低风险用户,但没有对变量重要性进行分析,难以优选关键影响因素。文献[11]使用大数据分析工具 Spark 和 HDFS 来扩展电力用户的支付数据的特征。文献[12]从用电量以及法律信用风险等方面构建指标体系和评估模型,通过主成分分析和德尔菲法分析出目标值,最终得到客户分级信息,但未对算法训练的参数值选择进行详细说明。文献[13,14]构建了用户画像方法。现有的这些研究均利用了机器学习算法构建了回收风险预测模型或者用户画像,但是未对用户的电费支付模式进行识别。

本文充分考虑模型对数据的适应能力、用户的电费支付特征及用户的用电行为特征,提出了基于分层核 PCA 和层次聚类的电费支付行为模式识别方法,首先提取了电费支付特征及用电曲线的可能非线性特征,使用分层核 PCA 引入核函数的方式,提取用户的关键非线性特征,在此基础上采用层次聚类识别不同的电费支付行为模式。电力公司可以通过用户电费支付行为模式的识别,定期为用户生成电费账单,并通过邮件、短信或 APP 推送等方式发送给用户,提醒其及时支付电费。对于延迟支付或拖欠支付的用户,通过增加支付提醒的频率、发送催缴通知等方式,促使其尽快完成电费支付。而且,在建立用户信用评估体系中可以加入用户的电费支付模式信息。本文提出的方法具有重要的实践意义和拓展性。

## 1 数据处理与特征工程

本文首先对用户的电费支付记录数据和用电行为数据进行了数据清洗工作,包括对缺失值不超过 30% 的数据列使用均值填充缺失值和删除异常数据等。

对数据进行预处理后,提取包括平均缴费时间间隔、缴费金额标准差、缴费周期的平均电费支付金额、缴费平均间隔时长、电费的支付方式(现金、银行转账、电子渠道等)、缴费渠道变更次数、连续缴费时长、月度电费缴纳频率因素等用户的电费支付行为特征,这些长期的电费支付序列数据可以反映用户的电费支付习惯和行为模式。

然后引入域知识,并结合专家经验提取用户用电曲线的非线性特征,如表 1 所示。

表 1 用电曲线的非线性特征

Tab.1 The nonlinear characteristics of the electricity curve

| 特征序号 | 非线性特征   | 具体描述                                       |
|------|---------|--------------------------------------------|
| 1    | 用电量突增特征 | 月用电量相比去年同期突增 50% 以上<br>日用电量较上周同期突增 20% 以上  |
|      | 用电波动特征  | 日用电量波动幅度较去年同期增大 50% 以上<br>周用电量的标准差增大超过 40% |
| 3    | 用电阶跃特征  | 日用电量在相邻时间间隔内出现大于 30% 的跳变<br>日电曲线存在多个大幅跳变点  |
|      | 周期异常特征  | 日用电量的周期性波动模式发生明显改变<br>周用电量的波动范围超出历史同期的正常区间 |

1、用电量突增特征:计算月用电量与去年同期的增长率,根据增长率是否大于 50%,设为不同的数值;计算日用电量较上周同期的增长率,根据增长率是否大于 20%,设为不同的数值。

2、用电波动特征:计算日用电量的标准差与去年同期的增长率,根据增长率是否大于 50%,设为不同的数值;计算周用电量的标准差与上周的增长率,根据增长率是否大于 40%,设为不同的数值。

3、用电阶跃特征:根据日用电量在相邻时间间隔内是否出现大于 30% 的跳变,设为不同的数值;根据日电曲线是否存在多个大幅跳变点(跳变幅度可设为 50%),设为不同的数值。

4、周期异常特征:根据日用电量周期性波动模式是否发生明显变化(变化幅度可设为 50%),设为不同数值;根据周用电量的波动范围是否超过历史同期的正常区间,设为不同的数值。

最后采用 z-score 标准化方法对提取的用户电费支付行为特征和用电曲线的非线性特征进行标准化,将各特征转换到同一量纲。z-score 标准化的公式为:

$$z = (x - \mu) / \sigma \quad (1)$$

其中,  $x$  为原始特征值,  $z$  为原始特征值  $x$  标准化后的特征值,  $\mu$  为原始特征值  $x$  的平均值,  $\sigma$  为原始特征值  $x$  的标准差。

## 2 电费支付行为模式识别方法

基于分层核 PCA 和层次聚类的电费支付行为模式识别方法的流程见图 1。首先对用户的电费支付数据和用电数据进行预处理,在此基础上提取电费支付行为特征和用电曲线的非线性特征,基于以上特征进行分层核 PCA,提取关键非线性特征,然后使用合成少数类过采样技术(synthetic minority



over-sampling technique, SMOTE)<sup>[15]</sup>解决不平衡数据问题,最后进行高斯核凝聚层次聚类,最终实现对用户的电费支付模式的识别。

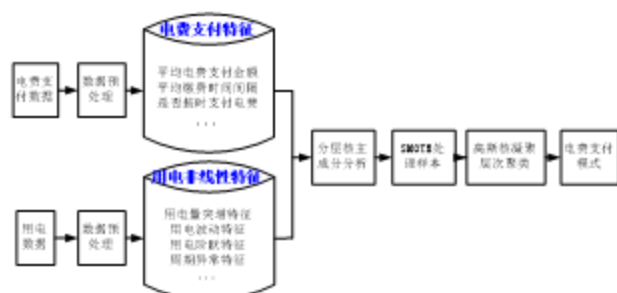


图1 电费支付行为模式识别流程图

Fig.1 The recognition flow chart of electricity payment behavior pattern

## 2.1 分层核主成分分析

核主成分分析属于基于核技巧的一种非线性降维技术,首先将原始空间中的样本非线性地映射到特征空间中,进而在特征空间中进行主成分分析。由于电费支付行为体现在用户长期的用电和支付模式上,而不是短期的波动。低频主成分能够反映用电和支付模式的整体趋势特征,而高频主成分更多捕捉短时间内的波动。故低频主成分与用户的电费支付习惯、支付时间等行为特征更为相关,主成分分析后,使用低频主成分作为特征可以更准确地刻画不同用户的支付行为模式。

核主成分分析过程如下所述。

算法输入:假定用户的原始数据为 $[\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n]$ ,选择一个核函数 $k(x, y)$ ,将两个样本映射到高维特征空间的内积,计算样本之间的核函数值 $K_{ij} = k(\vec{x}_i, \vec{x}_j)$ ,构成核矩阵 $K$ ,进行分层核PCA,即对 $K$ 进行低秩分解。由于提取主要低频成分(即特征值较小的主成分),保留最重要的 $p$ 个低频主成分,减少维数。使用低频主成分作为新特征,再次计算核矩阵 $K$ ,再次实施分层核PCA,继续提取更少的低频成分,重复迭代多次分层核PCA,每次保留较少的低频成分,分层迭代可提取特征的低频和全局信息,滤除高频噪声,最后保留足够表达非线性特征的低维主成分。

常见的核函数:线性核函数公式为

$$k(x, y) = x \cdot y \quad (2)$$

其中,线性核函数定义输入高维特征空间中的样本点 $x$ 和 $y$ 的内积关系为线性,实现线性学习。

poly核函数通过计算输入样本点特征值的多项式来完成非线性映射,公式如下:

$$K(x, y) = (\gamma x^T y + c)^d \quad (3)$$

其中, $x, y$ 是两个样本点, $\gamma$ 是核参数,一般取1, $c$ 是核参数,常取0, $d$ 是核参数,指定了核函数的阶数。

高斯核函数公式为:

$$K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2) \quad (4)$$

其中, $\gamma$ 是核宽度参数,控制着高斯核函数的宽

度,值越小,核函数变狭窄;值越大,核函数变宽。通过调整 $\gamma$ 可以改变核函数在特征空间上的响应范围,从而影响学习效果。 $\|x - y\|$ 计算输入样本 $x$ 和 $y$ 在原始空间中的欧式距离。

Sigmoid核函数,将样本点映射到一个有限的特征空间,实现了非线性转换。公式为:

$$K(x, y) = \tanh(\gamma x^T y + c) \quad (5)$$

其中, $x, y$ 是两个样本点, $\gamma$ 是核参数,控制函数曲率, $c$ 是核参数偏移项。

之后,对不同核函数和降维方案的效果进行评估,选择优秀的组合并挑选出低频且对目标识别影响显著的核非线性特征。

## 2.2 层次聚类识别电费支付行为模式

层次聚类算法能在不同的层次上对数据样本进行划分归类,而不需要提前指定聚类的类别数量。层次聚类可分为两种特定的策略。一是:将样本从小类到大类进行分组,即凝聚层次聚类;二是将大类进行划分,即分裂层次聚类。根据本文数据的具体情况,采用凝聚层次聚类,将每个样本视为一个单独的聚类,然后计算类之间的距离,逐步合并具有最短距离的类,直到达到停止条件,比如预设的聚类数量。给定 $n$ 个样本点 $[\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n]$ ,具体流程如下:

- (1) 将每个样本作为一类,并计算两个样本之间的距离 $\text{dist}(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = k(\vec{x}_i, \vec{x}_j)$ ;
- (2) 将两个最接近的类,合并为一个新类;
- (3) 更新类间的距离;
- (4) 重复步骤(2)和(3),直到达到结束条件为止。

为了保证原始层次聚类算法的简单性,又提高算法在克服线性不可分情况下的缺陷,本文使用基于高斯核的凝聚层次聚类,在计算样本之间距离时,选用高斯核函数的形式,公式如下:

$$\begin{aligned} k(\vec{x}_i, \vec{x}_j) &= (\varphi(\vec{x}_i), \varphi(\vec{x}_j)) = e^{-\sigma \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|^2} \\ &= e^{-\sigma(\vec{x}_i^2 + \vec{x}_j^2)} e^{2\sigma \vec{x}_i \vec{x}_j} = \\ &= e^{-\sigma(\vec{x}_i^2 + \vec{x}_j^2)} \left( 1 + \frac{2\sigma \vec{x}_i \vec{x}_j}{1!} + \frac{(2\sigma \vec{x}_i \vec{x}_j)^2}{2!} + \frac{(2\sigma \vec{x}_i \vec{x}_j)^3}{3!} + \dots \right) \quad (6) \\ &= e^{-\sigma \vec{x}_i^2} \left[ \frac{\sqrt{2\sigma}}{2} \vec{x}_i \right] \left[ \sqrt{\frac{(2\sigma)^2}{2}} \vec{x}_j^2 \right] \end{aligned}$$

在进行层次聚类前,为了解决数据不平衡问题,本文使用SMOTE,通过创建新的合成样本来平衡数据集,以提高聚类模型性能。其工作原理是利用 $k$ 最近邻域算法创建合成样本 $x_{\text{合成}}$ ,来增加少数类样本的数量,计算公式如下:

$$x_{\text{合成}} = x + \text{rand}(0,1) * (x_{\text{邻近}} - x) \quad (7)$$

其中, $x_{\text{邻近}}$ 为样本 $x$ 的最近邻, $\text{rand}(0,1)$ 为0和1间的随机数。

在此基础上,选择低频主成分作为主要特征进行基于高斯核的凝聚层次聚类。首先仅以主要特征

进行聚类,然后迭代添加更多特征实现对聚类结果的调整。

### 3 实验结果与分析

本文以国网公司某省的大用户为例进行算例分析,取2020年3月至2022年4月期间的用户基本属性、用电行为、缴费行为等基本数据作为样本数据。

将用户的电费支付特征和用电的非线性特征通过不同的核函数映射到高维特征空间,通过多次核PCA降维,得到数据的低频和高频成分。选择低频主成分作为特征进行层次聚类。首先仅以主要特征聚类,然后迭代添加更多特征调整。根据聚类结果,对支付行为的模式进行划分。评价不同核函数、特征选择和类别设置的识别效果。重复以上步骤,寻找最优模型参数,对模型不断进行优化。

选用线性核函数、poly核函数、高斯核函数和sigmoid核函数分别对特征进行分层核主成分分析降维后,分别进行聚类,轮廓系数如图2所示:

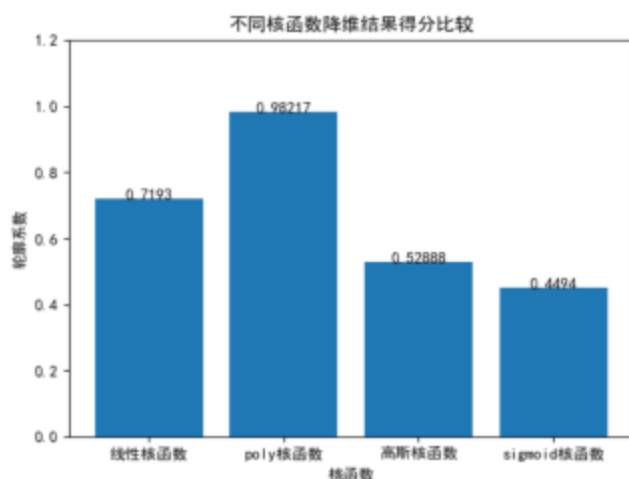


图2 不同核函数降维效果比较图

Fig.2 The Comparison diagram of dimensionality reduction effect of different kernel functions

从图2中可以看出:四种核函数对应的轮廓系数值从高到低依次是:poly核函数、线性核函数、高斯核函数、sigmoid核函数。使用poly核函数得到的轮廓系数最高,值为0.98217,这说明使用poly核函数对特征进行映射后,聚类结果质量最好,能提供更清晰的聚类结构,对非线性特征的降维更合适。

故选择poly核函数对非线性特征进行降维,降维后,进行高斯核凝聚层次聚类,当类别数 $k$ 设置为5时,聚类结果如图3所示。



图3 聚类结果图

Fig.3 The diagram of clustering result

由上图可以看出数据被分为5个簇类别:提前支付模式、按时支付模式、间断支付模式、延迟支付模式、拖欠支付模式。在各簇样本数量分布上,存在着不均匀的情况,间断支付模式所占的比例很高,达到67.2%。

对待测用户进行支付模式识别时,计算待测用户的特征与以上5个簇类别的欧式距离,即 $L = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i^i - x_j^j)^2}$ ,其中 $x_i^i$ 为待测用户的第 $i$ 维坐标值, $x_j^j$ 为第 $j$ 簇中心的第 $i$ 维坐标值。

若 $L$ 小于最大距离(即类簇中的对象到聚类中心的最大欧式距离),则待测用户的支付模式属于第 $j$ 簇。

### 4 结论

本文提出了一种基于分层核PCA和层次聚类的电费支付行为模式识别方法。首先,基于对长序列电费支付数据和用电数据的分析,提取电费支付行为特征和用电行为特征,然后通过分层核PCA从中提取用户的关键非线性特征。最后,采用层次聚类识别不同的电费支付行为模式。实验结果表明本文构建的模型具有较高的性能,具备工程应用性和实用性。本文提出的方法能够充分挖掘深层用户支付行为数据信息,识别隐含模式特征,有效描述分类评估用户风险类型,为电力企业制定个性化风险防控提供基础。

在后期的优化过程中,可以选取更全面的用户基本特征,充分考虑地理位置等因素对风险的影响。

### 参考文献

- [1] 汤晓前,刘俊,徐亮,等.构建基于大数据的电费风险精益化管理模式[J].浙江省电力学会2021年度优秀论文集,2022(7): 169-172.
- [2] 王俊芳,戴泽宇.基于多维精益管理的电价预测与电费风险控制分析研究[J].电工技术,2021(16): 135-136, 145.
- [3] 李锐雷,魏玲,王忠强,等.基于改进随机森林的电力用户欠费风险分析预警[J].电测与仪表,2019,56(9): 56-62.

- [4] Shang, S. , Qian, S. , Shi, Y. , etc. An improved hybrid feature selection algorithm for electric charge recovery risk. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1-18.
- [5] 田珂, 马文栋, 王坤等. 针对电费回收风险防控分析的用户信用评分模型[J]. *微型电脑应用*, 2021, 37(11): 113-116.
- [6] 金文娟. 基于大数据的电费稽查数字化能力提升[J]. *数字技术与应用*, 2022(7): 47-49.
- [7] 赵永良, 蔡重, 吴尚远等. 基于数据挖掘的高压用户电费回收风险预测[J]. *电力信息与通信技术*, 2015, 13(9): 57-61.
- [8] 涂莹, 林士勇, 欧阳柳等. 基于市场细分的逻辑回归模型在电费回收风险预测中的应用研究[J]. *电力需求侧管理*, 2016, 18(04): 46-49.
- [9] 夏洪涛, 施永益, 凌卫家等. 电费回收风险预测模型研究与实践[J]. *电力信息与通信技术*, 2016, 14(08): 58-63.
- [10] 赵雅迪, 吴钊, 李庆兵等. 电费回收风险预测的大数据方法应用[J]. *电信科学*, 2019, 35(02): 125-133.
- [11] Huianguang Wu, Yongsheng Shi, Shenyi Qian, etc. Application of Improved Feature Pre- processing Method in Prevention and Control of Electricity Charge Risk [J]. *Int J Performability Eng*, 2019, 15(9): 2453-2461.
- [12] 赵海莹, 周盛成, 安旭东等. 基于电费大数据客户欠费风险分级管理探索研究[J]. *电工技术*, 2020(12): 141-143+149.
- [13] 王成亮, 郑海雁. 基于模糊聚类的电力客户用电行为模式画像[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(18): 77-81.
- [14] 张壮, 冯小年, 钱铁云. 基于多模态融合技术的用户画像方法[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(1): 105-111.
- [15] 石洪波, 陈雨文, 陈鑫. SMOTE 过采样及其改进算法研究综述[J]. *智能系统学报*, 2019, 14(6): 1073-1083.



收稿日期: 2024-07-31。

作者简介:

张文(1973), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力营销数据处理, E-mail: 458365950@qq.com;

闫富荣(1984), 通信作者, 女, 博士研究生, 研究方向为数据挖掘与分析, 机器学习等, E-mail: yfthappy@126.com,

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于 LC 滤波型多电平级联 H 桥逆变器通用离散模型及分岔与混沌行为分析

杨维满<sup>1,2</sup>, 张钰沛<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省新能源电力变换及控制工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

## General discrete model and bifurcation and chaos behavior Analysis of LC multilevel cas-caded H-bridge inverter based on coefficient linearization

YANG Wei-man<sup>1,2</sup>, Zhang Yu-pei<sup>1</sup>

(1.Lanzhou University of Technology, College of Electrical Engineering and Information Engineering, Lanzhou 730050, China; 2. Gansu Province New Energy Power Conversion and Control Engineering Research Center, Lanzhou 730050, China)

**ABSTRACT:** The LC-filtered multilevel cascaded H-bridge inverter is taken as the object of study, and in this way, a generalized discrete mapping mathematical model of the LC-filtered multilevel cascaded H-bridge inverter under quasi-proportional resonance control of the outer-loop voltage and proportional regulator of the inner-loop current is established; the impacts of the proportional gain of the voltage loop and the proportional gain of the current loop, the control parameter, and the other parameters on bifurcation and chaos of this topology are focused on; finally, the correctness of the results is verified by using folded diagrams and phase diagrams, respectively, in a methodological point of view. Finally, the correctness of the bifurcation and chaos behavior analysis results are verified from the methodological point of view by using folding and phase diagrams, respectively.

**KEY WORDS:** cascaded h-bridge inverters; bifurcation and chaos; general purpose

**摘要:** 以 LC 滤波型多电平级联 H 桥逆变器为研究对象, 以此建立了 LC 滤波型多电平级联 H 桥逆变器在外环电压准比例谐振控制和内环电流比例调节器下的通用型离散映射数学模型; 重点分析了电压环比例增益与电流环比例增益、控制参数以及其他参数对该拓扑结构分岔与混沌的影响; 最后, 从方法论角度分别采用折叠图和相图验证了分岔与混沌行为分析结果的正确性。

**关键词:** 级联 H 桥逆变器; 分岔与混沌; 通用型

## 0 引言

多电平级联 H 桥逆变器(Multilevel cascaded H-bridge inverter, MCHI)因其输出谐波含量少、开关应力小、低噪声、易于模块化设计与扩展等优点, 目前在光伏并网系统、海上风电、直挂式储能系统、

静止无功补偿器、UPS 系统、微电网、电气化铁路与城市轨道交通的牵引系统<sup>[1]</sup>中发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。电力电子变换器的分岔与混沌行为初期多针对 DC-DC 变换器研究, 主要对其动力学建模方法、稳定性分析理论以及对分岔与混沌控制等方面<sup>[3]</sup>。2009 年, 文献[4]首次将正弦信号作为参考输出, 较系统地研究了 H 桥逆变器比例调节电流闭环作用下所出现的分岔、混沌行为。自此, 国内外研究者广泛将其应用于各类控制策略与调制技术的研究之中, 涵盖了电压/电流闭环控制体系、模拟/数字混合控制技术和改良幂次趋近律滑模控制等手段。他们针对主电路参数、控制方式、负载阻抗(电阻和电感)和开关频率等多种变量因素, 以及离网独立运行和并网接入两种运行模式, 对逆变系统中的分岔现象、混沌行为进行了深入探讨。此外, 一些研究文献还特别关注了针对此类非线性动力学现象的抑制方法, 并对此开展了专门研究<sup>[5-6]</sup>。

本研究针对 LC 滤波型 MCHI 在建模时将虚拟遍历法和离散映射建模法相结合, 有效解决了由于变换器阶数变化而导致建模困难的难题。通过构建通用离散数学模型和采用分岔图、折叠图和相图, 分析了双环控制结构下、主电路和其他控制参数变化下的分岔与混沌行为, 揭示了其内部复杂动态特性。研究成果将丰富电力电子非线性动力学理论, 为级联 H 桥逆变器的优化设计和控制提供理论依据。

# 1 LC 滤波型 N 单元级联 H 桥逆变器离散数学模型

## 1.1 主电路离散模型的建立

图 1 所示是单相 LC 滤波型离网 N 单元级联 H 桥逆变器在电压外环和电流内环控制以及加入混沌抑制下的主电路及控制框图。其中,  $E$  为直流侧电源电压,  $S_{11} \sim S_{N4}$  为功率开关管,  $N$  为 H 桥单元的级联个数,  $L$  为输出滤波电感,  $C$  为滤波电容, 逆变器将直流电压源  $E$  通过功率开关和滤波电路转换为交流电, 并向负载提供交流电。

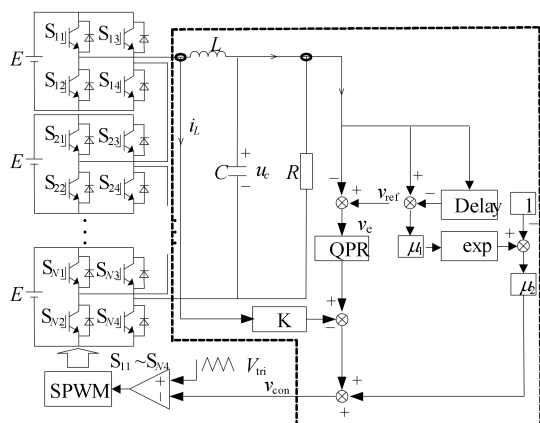


图 1 LC 滤波型 N 单元级联 H 桥逆变器电路拓扑及控制框图

Fig.1 LC-filtered N-cell cascaded H-bridge inverter circuit topology and control block diagram

在此基础根据 MCHI 的运行方式及特点采用离散映射模型分析法建立 LC 滤波型 N 单元级联 H 桥逆变器通用离散映射模型。经过 KVL 和 KCL 分析知级联 H 桥逆变器的状态方程组有  $2N+1$  个, 如式 (1) 所示。

采用虚拟遍历法和离散映射模型分析法<sup>[18-20]</sup>相结合的方法建立 LC 型 N 单元级联 H 桥逆变器通用离散映射模型。级联 H 桥逆变器的状态方程组有  $2N+1$  个, 依据 SPWM 调制特点进一步扩展成  $4N$  个微分方程组, 得到如式(1)所示方程。

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -\frac{1}{L}U_c + \frac{\delta}{L}E \\ \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{1}{RC}U_c \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta \in \{N, N-1, \dots, 0, \dots, -N+1, -N\}$$

式中:  $\delta$  表示电平系数,  $i_L$  为电感电流,  $E$  为直流侧电压,  $U_c$  表示电容两端电压。

MCHI 采用同向层叠移幅载波调制方法, 调制原理如图 2 所示, 图中  $v_x$  为三角载波, 下标

$x=1, 2, \dots, 2N-1, 2N$ ,  $v_{con}$  为调制波;  $v_1, v_2, \dots, v_{2N}$  代表  $2N$  路载波, 通过  $2N$  路载波与调制波的比较来确定输出电平  $U$ 。

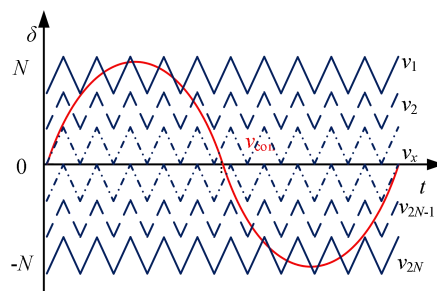


图 2 同向层叠移幅载波调制原理图

Fig.2 Co-directional stacked amplitude carrier modulation schematic diagram

引入双环控制 MCHI 的状态变量为  $\mathbf{x} = [i_L \ u_c]^T$ , 则考虑 MCHI 所有工作模态之后对应的状态方程为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{cases} \mathbf{A}_1 \mathbf{x} + \mathbf{B}_1 \delta_m E \\ \mathbf{A}_2 \mathbf{x} + \mathbf{B}_2 \delta_m E \\ \dots \\ \mathbf{A}_i \mathbf{x} + \mathbf{B}_i \delta_m E \\ \dots \\ \mathbf{A}_{4N} \mathbf{x} + \mathbf{B}_{4N} \delta_m E \end{cases} \quad m=1, 2, \dots, i, \dots, 4N \quad (2)$$

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_2 = \dots = \mathbf{A}_i = \dots = \mathbf{A}_j = \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 = \dots = \mathbf{B}_i = \dots = \mathbf{B}_j = \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{A}_i$ ,  $\mathbf{B}_i$  是第  $i$  个矩阵, 与变换器拓扑和参数有关。

设电感电流或者电容电压的初始状态为  $\mathbf{x}(t_0)$ , 开关系统依次经历  $4N$  种状态, 将每一种状态所作用的时间记为  $t_j$ , 其中  $j=1, 2, \dots, i, \dots, 4N-1, 4N$ 。通过求解上述状态方程, 可得到一个开关周期  $T_s$  结束时的电感电流或者电容电压。对应式(3)的第  $i$  种工作状态, 可解得:

$$\mathbf{x}(t_i) = e^{\mathbf{A}_i t_i} \mathbf{x}(t_{i-1}) + \int_{t_{i-1}}^{t_i} e^{\mathbf{A}_i (t_i - \tau)} \mathbf{B}_i \delta_i E d\tau \quad (5)$$

对上式  $4N$  个方程进行迭代, 可得到单相 LC 滤波型离网 N 单元级联 H 桥逆变器主电路的通用型离散数学模型。

## 1.2 调节器离散模型

单相 LC 滤波型离网  $N$  单元级联 H 桥逆变器的双环控制策略如图 1 所示的虚线框图所示。电压外环采用 QPR 控制器，电流内环采用比例控制器。

设 QPR 控制器传递函数为  $G(s)$ ，如式 (15) 所示：

$$G(s) = K_{pp} + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (6)$$

将式(15)写成离散形式，得到如式(16)所示的式子。式中： $a=2K_r\omega_c T_s$ ； $b=-2K_r\omega_c T_s$ ； $c=1+2\omega_c T_s+\omega_0^2 T_s^2$ ； $d=-2(1+\omega_c T_s)$ ； $T_s$  为 QPR 控制器离散化时的步长； $x(n)$  表示参考电流和实际电流的差； $y(n)$  表示 QPR 控制器的输出； $n$  是第  $n$  个开关周期。

$$y(n) = K_{pp}x(n) + \frac{1}{c} * [ax(n) - bx(n-1) - dy(n-1) - y(n-2)] \quad (7)$$

在公式中，所提及的各项参数分别为：比例增益系数、谐振增益因子以及两个关键频率——截止频率和谐振频率，它们分别用符号  $K_{pp}$ 、 $K_r$  和  $\omega_c$ 、 $\omega_0$  表示。

## 2 分岔与混沌分析

本节首先采用分岔图对 MCHI 稳定性进行分析，然后用折叠图和相图验证稳定性分析方法所得稳定域的正确性，展现逆变器的运行状态。根据图 1 所示 MCHI 电路拓扑搭建系统仿真模型，设定参数如下： $R=10\Omega$ ； $L=2.5\text{mH}$ ； $C=20\mu\text{F}$ ； $f_s=10\text{kHz}$ ； $f_1=50\text{Hz}$ ； $v_{ref}=54\sin(\omega_0 t)$ ； $\omega_0=2\pi f_1\text{rad/s}$ ； $\omega_c=5\text{rad/s}$ 。

### 2.1 基于分岔图的控制参数对逆变器动力学行为特性影响

研究级联 H 桥逆变器的分岔与混沌行为，以  $N=3$ ，即 3 单元七电平级联 H 桥为例，其他参数不变。研究逆变器电容电压在不同谐振系数  $K_r$  下的分岔图，增加电压环谐振增益系数  $K_r$ ，当  $K_p=1.4$ ， $K_r=100$ ，混沌抑制系数  $\mu_1=0$ ， $\mu_2=0$ ，如图 3(a)所示：

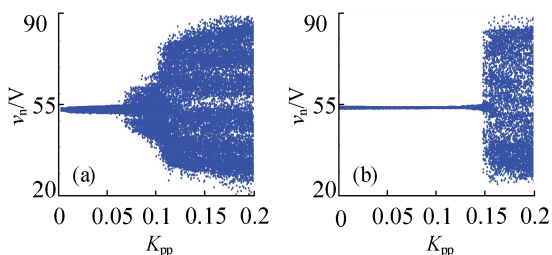


图 3 电容电压随  $K_{pp}$  变化的分岔图

Fig.3 Bifurcation diagram of capacitor voltage with

### $K_{pp}$ change

在图 5(a)中，由于增加了电压环谐振增益使得  $K_r=100$ ，从图中得知当  $K_{pp}<0.013$  时，系统处于稳定的周期一状态，大于 0.013 这个临界值后处于混沌态。

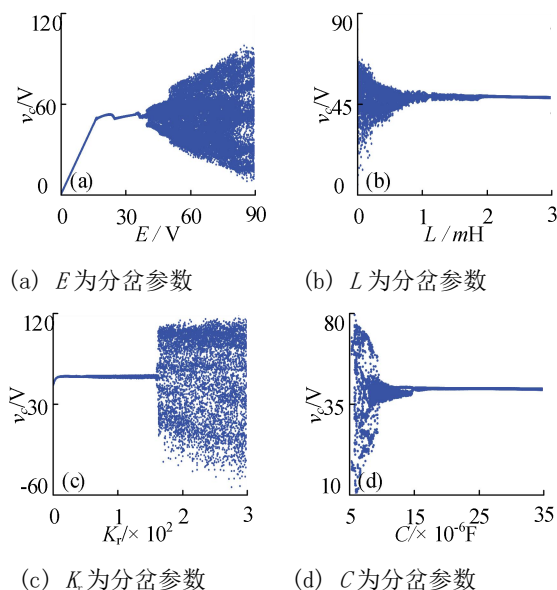
### 2.2 其他参数对逆变器动力学行为特性影响

除了上述参数对三单元七电平 LC 滤波型级联 H 桥逆变器非线性动力学行为产生影响外，还有主电路参数  $E$ 、电感  $L$ 、参数  $\omega_c$ 、 $K_r$ 、开关频率  $f_s$  和给定频率  $f_1$  也会对系统动力学行为产生影响。在图 4(b)中周期运动的范围内选取系统稳定的  $K$  值和  $K_{pp}$  值，取  $K=1.4$ 、 $K_{pp}=0.04$ ，分析结果如图 4 所示。

图 4(a)中其他主电路参数与图 3(b)保持一致，当  $E$  小于 40.1V 时系统保持稳定，而超过 40.1V 后系统就会进入失稳状态。图 4(b)中， $E$  取系统稳定状态的电压值 24V，电感  $L$  在小于 2.3mH 时，系统处于不稳定状态，而当  $L$  大于 2.3mH 后，系统可保持稳定状态。

如图 4(c)所示，当  $K_r$  取值大于 160 时电容电压处于混沌状态。在图 4(d)中，电容  $C$  的取值范围处于 0-17 $\mu\text{F}$  时，电容两端电压处于随机无规则的混沌态，超过 17 $\mu\text{F}$  后，电容电压处于稳定的周期一状态。

如图 4(e)所示，开关频率的变化也会影响系统的稳定性。当开关频率  $f_s>9360\text{Hz}$  系统才处于稳定态， $f_s=9360\text{Hz}$  是稳定与不稳定的临近点，在小于 9360Hz 的范围内处于混沌态。在图 4(f)中，以给定频率作为变量做分岔图，当给定频率  $f_1>50\text{Hz}$  后，随着给定频率的增加电容两端电压与给定参考电压的差距逐渐变大并处于混沌态。



(c)  $K_r$  为分岔参数

(d)  $C$  为分岔参数



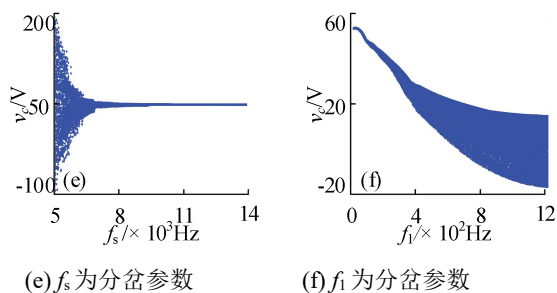


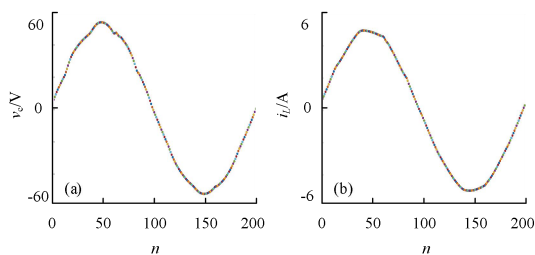
图4 系统其他参数分岔图

Fig.4 Bifurcation diagram of other parameters of the system

### 2.3 折叠图分析

为验证系统稳定域的准确性,经过分岔图得到系统稳定的参数范围后,使用数值仿真方法中的折叠图予以验证。通过任意选择一个初值,并将其代入系统的离散模型进行多次迭代,观察当系统达到稳定状态后,连续 40 个正弦周期内的样本在采样时刻上进行重叠,得到 3 个 H 桥单元级联后不同电压环控制系数  $K_{pp}$ (其他参数与图 3(b)保持一致)下的电容电压与电感电流的折叠图,如图 5 所示,图中横坐标  $n$  为采样点数。

如图 5(a)所示,当  $K=1.4$ ,  $K_{pp}=0.1$ ,  $K_r=10$  时,系统输出的电容电压出现多个不定值,说明此时系统已经进入混沌状态。相同的参数下,如图 5(b)所示,电感电流也出现多个不定值,说明此时系统已经进入混沌状态。数值仿真结果表明,数值仿真波形与系统电容电压随  $K_{pp}$  变化的分岔图 3(b)的稳定域划分一致,验证了上述理论分析的正确性。

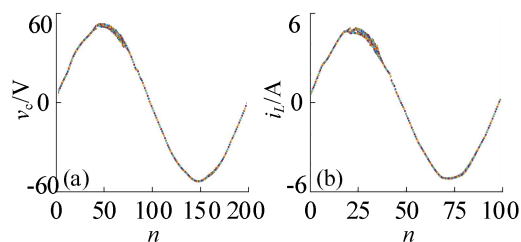


$K=1.4$ ,  $K_{pp}=0.04$ ,  $K_r=10$

图5 电容电压与电感电流数值仿真图(周期一)

Fig.5 Numerical simulation diagram of capacitor voltage and inductor current (period 1)

如图 6(a)所示,当  $K=1.4$ ,  $K_{pp}=0.1$ ,  $K_r=10$ , 系统输出的电容电压出现多个不定值,说明此时系统已经进入混沌状态。相同的参数下,如图 6(b)所示,电感电流也出现多个不定值。数值仿真结果表明,数值仿真波形与系统电容电压随  $K_{pp}$  变化的分岔图 3(b)的稳定域划分一致,验证了上述理论分析的正确性。



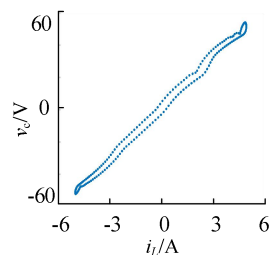
$K=1.4$ ,  $K_{pp}=0.1$ ,  $K_r=10$

图6 电容电压与电感电流数值仿真图(混沌态)

Fig.6 Numerical simulation diagram of capacitor voltage and inductor current (chaotic state)

### 2.4 相图分析

为验证系统稳定域的准确性,经过稳定性分析得到系统稳定的参数范围后,使用相图予以验证。相空间中的每个点都对应着其系统的某个状态,随着时间的变化,系统的状态变量将在相空间中形成相轨迹,该轨迹就是系统的相图。作电容电压和电感电流的相轨图如图 7 和图 8 所示。

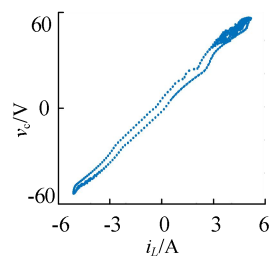


$K=1.4$ ,  $K_{pp}=0.04$ ,  $K_r=10$

图7 电容电压与电感电流相图(周期一)

Fig.7 Phase diagram of capacitor voltage and inductor current (period 1)

如图 7 所示,当  $K=1.4$ ,  $K_{pp}=0.04$ ,  $K_r=10$ ,  $\mu_1=0$  和  $\mu_2=0$  时,  $v_c-i_L$  为一个闭合的轨道,由于不是一个标准的圆,可以用相图的转折点来识别,因为此时有两个转折点,所以判定逆变器系统运行于周期一的稳定状态。



$K=1.4$ ,  $K_{pp}=0.1$ ,  $K_r=10$

图8 电容电压与电感电流相图(混沌态)

Fig.8 The phase diagram of capacitor voltage and inductor current (chaotic state)

如图 8 所示, 当  $K=1.4$ ,  $K_{pp}=0.1$ ,  $K_r=10$  时,  $v_c-i_L$  为一个闭合的轨道, 但是转折点是两边密集填充, 由此判断逆变器系统处于混沌态。图 7 和图 8 共同验证了分岔图 3(b)的稳定域划分的正确性, 结果与分岔图 3(b)与数值仿真图 7 和图 8 验证结果一致。

### 3 结论

利用离散映射模型分析法建立了 LC 滤波型  $N$  单元级联 H 桥逆变器通用型离散映射数学模型, 并对系统在电压环 QPR 控制和电流环比例控制参数、主电路参数变化情况下以及引入 IEDFC 下的分岔、混沌行为特性进行了分析。通过分岔图、折叠图和相图重点分析了系统控制参数对系统动力学稳定性的影响。结果表明: 增大电压环谐振增益  $K_r$  会导致比例增益系数  $K_{pp}$  的稳定域缩小, 系统整体稳定域随之减小; 适当降低开关频率有助于提高电容电压稳定性, 同时减少电容电压纹波, 但需大幅下调  $K_{pp}$  值。

### 参考文献

- [1] 胡文华, 张军仁, 董 运. 一种新型载波移幅 SPWM 调制策略[J]. 电气传动, 2019, 49(08): 53-56.
- [2] 张东辉, 陈 新, 杨舒婷, 等. 含静止无功补偿装置的光伏电站高频谐振分析及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9580-9594.
- [3] 高志强, 陈翰博, 周雪松, 等. 单相 H 桥光伏逆变器的混沌控制[J]. 振动与冲击, 2023, 42(2): 157-165+174.
- [4] ZHANG Jinke, WU Xiaojie, XING Lvshuai. Bifurcation analysis of five-level cascaded h-bridge inverter using proportional-resonant plus time-delayed feedback[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2016, 26(11): 1-1.
- [5] Yu Yongjin, Zhang Chao. Bifurcation analysis of cascaded h-bridge converter controlled by proportional resonant[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125, 106476.
- [6] 高志强, 陈翰博. 线性化模型下二阶逆变器的混沌控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(03): 152-160.

#### 作者简介:

杨维满(1984—), 男, 副教授, 研究生导师, 研究方向新能源电力系统运行控制与稳定性分析方面的研究工作, E-mail: [ggdywm@126.com](mailto:ggdywm@126.com);

张钰沛(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统建模与控制及稳定性分析。  
E-mail: [1746243628@qq.com](mailto:1746243628@qq.com)。



杨维满

# 基于换流站滤波器组投切与触发角调节配合下的 LCC-HVDC 交流系统等值阻抗识别方法

贺小鹏, 郭春义\*

(新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

## Equivalent impedance identification of traditional DC transmission AC system based on the combination of converter station filter bank switching and trigger angle adjustment

HE Xiao-peng, GUO Chun-yi,

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** Line commutated converter high voltage direct current is widely used at home and abroad due to its large transmission capacity, long transmission distance and rich operation experience. With the large-scale new energy access to the power grid, the grid structure of the system is becoming more and more complex and the operating conditions are changeable, which leads to the risk of commutation failure of the traditional DC transmission electrode when the system is weak, so it is necessary to identify the strength of the system in real time to improve the operation stability of the system. Based on this, this paper proposes a short-circuit ratio identification method for traditional DC transmission based on the cooperation between converter station filter bank switching and trigger angle adjustment. From the perspective of theoretical derivation, the principle of the method is explained, the error factors affecting the recognition accuracy of the method are introduced, and the correctness of the method is verified by simulation.

**KEY WORDS :** conventional DC transmission; filter switching; trigger angle; Short-circuit ratio;

**摘要:** 电网换相换流器(line commutated converter high voltage direct current)高压直流输电由于输送容量大、输送距离远以及运行经验丰富被国内外广泛采用。随着大规模的新能源接入电网导致系统的网架结构日益复杂以及运行工况多变,导致了系统在较弱时传统直流输电极易发生换相失败的风险,因此需要实时对系统的强度进行识别来提高系统的运行稳定性。基于此本文提出了一种基于换流站滤波器组投切与触发角调节相互配合的传统直流输电的短路比识别方法。从理论推导的角度解释了该方法的原理,介绍了影响该方法识别精度的误差因素以及最后进行仿真验证该方法的正确性。

**关键词:** 传统直流输电; 滤波器投切; 触发角; 短路比;

## 0 引言

随着“双碳”目标的提出,我国也加快了构建以新能源为主体的新型电力系统。因为我国地理环境的影响导致了大规模的风电光伏等新能源主要集中在我国的西北部地区,而主要的负荷中心分布在东南沿海地区,因此这就需要进行远距离的大容量输电来实现资源的合理分配。电网换相换流器(line commutated converter high voltage direct current)高压直流输电由于运行经验丰富以及输送容量大被广泛应用于远距离输电。新能源发电由于具有随机性以及波动性,当大规模的新能源接入电网,导致了电力系统的网架结构日益复杂且运行工况多变,这会给系统的稳定运行带来极大的挑战。同时考虑到传统直流输电由于晶闸管不能控制关断的特性,在系统较弱时极易发生换相失败[1],因此有必要对电力系统进行系统强度的识别,为后续的控制采取何种控制策略以及控制策略的切换提供参考。

国内外常用短路比作为衡量交流系统强度的重要的指标。在电力系统中将短路比定义为交流系统的短路容量与设备额定容量的比值[2]。基于此定义,国内外学者分别从短路容量和系统等值阻抗两个方面进行系统的短路比计算。文献[3]和文献[4]基于投切母线上已知容量的电容器或者电抗器,通过投切前后母线上相关电气量进行短路容量的计算;文献[5]基于戴维南定理提出了一种等效电源电压变异系数约束的短路容量测试

方法;文献[6]验证了不同类型的风电机组对系统短路容量有着不同的影响同时风机装置的保护动作也会对短路容量产生影响;文献[7]通过人工接地设置短路故障进行短路电流的计算,该方法在实际中会对系统的安全运行造成隐患;文献[8]通过切除母线上的负荷造成小的扰动来进行短路容量的计算,该方法会对用户的供电产生影响,故不能成为常用的方法;文献[9]提出了一种基于扰动曲线拟合法的测量技术来计算系统的短路容量,但是最终的方法还是通过投切母线上已知容量的电容器或者电抗器来实现的。对于等值阻抗的计算,文献[10]就新型电力系统下提出了电压刚度的指标,同时探讨了非同步机电源对电网电压以及频率的支撑作用,对研究大规模的新能源接入电网提供了一定的理论支撑;文献[11]基于短路比的物理本质提出了一种基于新能源多场站的短路比指标,为新能源并入交流电网计算短路比的提供了计算方法;文献[12]提出了一种基于无功功率注入的交流系统等值阻抗的识别方法,同时提出了一种阻抗识别精度的评价指标;文献[13,14]提出了一种附加简谐波的注入来识别系统的等值阻抗,该方法会对系统的电能质量造成污染;文献[18]提出了一种基于分层估计的戴维南等值阻抗的计算方法,相比于以前该方法不仅提高了计算精度而且能够很好的克服等值阻抗波动的问题;文献[22]考虑了VSC对LCC作用下的短路比的计算,提出了一种量化混合直流馈入的短路比指标。

针对上述存在的问题,本文提出了一种基于换流站滤波器组投切与触发角调节相互配合的传统直流输电交流系统等值阻抗的识别方法,该方法主要针对大容量的LCC-HVDC并网系统。首先从理论推导的角度介绍了该方法进行阻抗识别的原理以及分析了该方法的可行性,然后分析了滤波器组投切与触发角调节的配合边界问题,最后基于PSCAD/EMTDC仿真软件搭建相应的直流输电系统对所提方法的可行性进行验证,仿真结果证明了该方法的可行性以及识别精度也在可接受范围内。

## 1 基于滤波器组投切与触发角调节相互配合的等值阻抗识别原理

### 1.1 LCC-HVDC 系统拓扑结构

本文所研究的直流输电系统主要由送端受端

交流电网、公共耦合母线、联结变压器、交流滤波器组、换流站以及直流输电线路组成。其中换流站主要是由晶闸管构成主要器件的电网换相换流器,通过锁相环跟踪电网的相位为晶闸管的触发提供相位基准。整流侧的控制模式采用的是定电流控制,在逆变侧采用的是定关断角控制,同时配备有定电流以及电流偏差控制。图1展示了双端LCC的直流输电系统结构拓扑图,其中对于交流系统用戴维南定理等效为一个电压源与一个阻抗串联的形式。详细的电气控制参数见附表1。

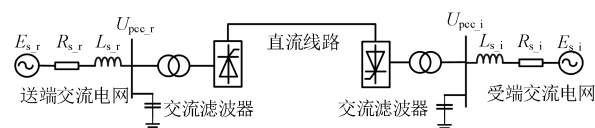


图1 双端LCC直流输电系统结构拓扑图

对于交流滤波器组合的结构如图2所示,在整流侧滤波器的种类主要有三类:A型双调谐滤波器,来滤除11、13次谐波;B型三调谐滤波器,滤除3、24、36次谐波;C型单调谐滤波器,滤除48次谐波,整流侧的滤波器组配备为2A+2B+1C;对于逆变侧滤波器的种类主要有两类:A型双调谐滤波器滤除12、24次谐波;C型单调谐滤波器滤除36次谐波,逆变侧的滤波器组配备为4A+1C,滤波器组的相关电气参数设计如附表1所示。

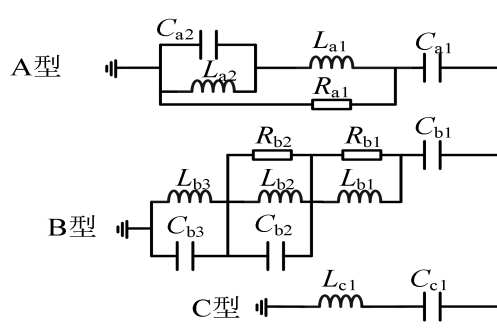


图2 交流滤波器结构

### 1.2 滤波器组投切与触发角调节相互配合的系统等值阻抗识别原理

考虑到高压直流输电的电压等级较高,交流电网线路的电抗是远远大于电阻的<sup>[15]</sup>,故对于高压直流输电常用电抗来表示系统线路的阻抗。如图1所示,以直流输电系统的送端为例将公共耦合母线PCC点处的交流滤波器组进行投切,然后检测母线处电压的变化量以及整流站控制系统的

触发角变化范围, 基于上述相关电气量的变化趋势, 通过触发角的调节来使母线电压的变化置于安全稳定的变化区间内。

考虑到电压等级高于 500kV 的直流输电忽略线路电阻对系统线路阻抗的影响不大, 因此定义交流系统送端的等值阻抗  $Z_s$  为:

$$Z_s \approx X_s = j\omega_0 L_s \quad (1)$$

式中,  $\omega_0$  是系统的基频角频率。

如图 1 所示, 对送端交流电网的戴维南等值电路列写潮流方程:

$$E_s = \sqrt{\left( U_{pcc} + \frac{PR + QX}{U_{pcc}} \right)^2 + \left( \frac{PX - QR}{U_{pcc}} \right)^2} \quad (2)$$

式中  $E_s$  为等效电源电动势,  $U_{pcc}$  为公共耦合母线处的电压有效值,  $P$ 、 $Q$  分别为等效交流系统流向 PCC 母线处的有功功率以及无功功率,  $R$ 、 $X$  分别为等效交流系统的电阻以及电抗。

式(2)中存在 3 个未知量: 等效电源电压、等值阻抗中的电阻以及电抗分量。考虑到高压直流输电系统忽略线路电阻的影响不大故可以忽略线路电阻, 同时假设滤波器投切配合触发角调节前后等效电源电压以及等值阻抗不变, 基于此分析可以将式(2)拓展为下式:

$$\begin{cases} E_s = \sqrt{\left( U_{pcc1} + \frac{Q_1 X}{U_{pcc1}} \right)^2 + \left( \frac{P_1 X}{U_{pcc1}} \right)^2} \\ E_s = \sqrt{\left( U_{pcc2} + \frac{Q_2 X}{U_{pcc2}} \right)^2 + \left( \frac{P_2 X}{U_{pcc2}} \right)^2} \end{cases} \quad (3)$$

上式中下标 1 和下标 2 分别表示滤波器组投切配合触发角调节前后的相关电气量的测量值。联立(3)式两个方程即可求得送端交流系统的等值阻抗以及等效电源电压。求得交流系统等值阻抗之后基于下式计算可得交流系统的短路比:

$$SCR = \frac{U_N^2}{P_{dN} Z} \quad (4)$$

其中  $U_N$  为交流母线 PCC 点处的额定电压,  $P_{dN}$  为传统直流输电传输的额定功率,  $Z$  为交流系统的等值阻抗。

### 1.3 滤波器组投切与触发角调节相互配合的机理分析

采用电网换相换流器的直流输电换流站, 不管是作为整流站还是逆变站都会吸收大量的无功功率。交流电源一般作为主要的无功电源, 考虑到换流站与交流系统的距离较远, 进行远距离的无功补偿会得不偿失, 因此会在换流站附近配备大量的无功补偿装置来进行无功补偿以及滤除交流谐波<sup>[16]</sup>。对于换流站无功补偿装置的投切, 换流站也配备了无功电压控制策略, 按照优先级的划分主要为 5 级<sup>[16]</sup>, 但是在投切时主要满足以下 3 级限制:

1) 绝对最小滤波器组: 防止因滤波器组投入数量不足导致流经的谐波电流过大烧坏设备。

2) 换流母线电压限制: 保证换流母线电压在合理的区间范围内。

3) 交流系统交换无功最大限制: 防止换流站向交流系统注入大量的过剩无功。

根据换流器的原理可知, 换流器消耗的无功功率可用下式来表示(以整流站为例):

$$Q_{dc} = P_{dc} \tan \varphi \quad (5)$$

$$\tan \varphi = \frac{(\pi / 180) \mu - \sin \mu \cos (2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin (2\alpha + \mu)} \quad (6)$$

式中,  $Q_{dc}$  为换流站消耗的无功功率,  $P_{dc}$  为直流线路传输的有功功率,  $\varphi$  为换流站的功率因数角,  $\mu$  为换相角,  $\alpha$  为整流侧的触发角。

通过上式分析得知换流站消耗的无功功率不仅与直流功率有关, 还与许多参数相关, 其中最灵敏的当属整流器的触发角  $\alpha$ , 如果是逆变站即与关断角  $\gamma$  相关。对于触发角的改变, 整流站内一般通过改变直流电流的指令值实现对触发角的控制, 对于逆变站, 根据采取的控制策略的不同, 定电压控制下一般改变直流电压的指令值, 定关断角控制下一般改变关断角的指令值实现对触发角的改变从而改变换流站的无功损耗。

基于上述的分析, 通过滤波器组投切与触发角调节的相互配合, 使得母线电压以及系统与换流站之间的无功交换处于合理的区间范围内实现系统工况的改变来对系统的等值阻抗进行识别。

## 2 传统交流电网等值阻抗识别验证

为了验证基于滤波器组投切与触发角调节相互配合的交流系统短路比识别的有效性, 本章基于第二章所示的双端 LCC 直流输电系统为研究对象进行以下案例验证。其中交流系统的额定电

压为 500kV,换流站传输的额定功率为 1500MW。在获取两端交流系统等值阻抗的基准值时,采用电路中的等值阻抗的计算原理,将交流系统中的电压源置零,从公共交流母线处注入单位电流来测得交流系统的阻抗基准值<sup>[17]</sup>,送端和受端的阻抗基准值分别为  $Z_1=73.5\Omega$ ,  $Z_2=45.94\Omega$ 。以下案例算出的等值阻抗结果均以上述的基准值作为参考来验证所提方法的有效性。

案例一:以送端交流系统为例进行验证,考虑到整流侧滤波器组的配备,分别投切 A 型滤波器和 B 型滤波器为例进行验证。基于第二章节计算原理的分析,测得系统流向交流母线处的有功功率 P、无功功率 Q 以及母线电压的有效值 U 如下表所示:

表 1 切换滤波器 A 与触发角配合下的等值阻抗计算

|                | 稳态值     | 切除滤波器 A    | 改变电流指令值     |
|----------------|---------|------------|-------------|
| P/MW           | 1488.52 | 1488.17    | 1434.52     |
| Q/Mvar         | 110     | 183.6      | 150.83      |
| U/kV           | 525     | 512.3      | 521.48      |
| 等值阻抗/ $\Omega$ | 73.5    | 72.3(1.6%) | 74.3 (1.1%) |
| 触发角/ $^\circ$  | 17.16   | 11.94      | 14.2        |

表 2 切换滤波器 B 与触发角配合下的等值阻抗计算

|                | 稳态值     | 切除滤波器 B      | 改变电流指令值      |
|----------------|---------|--------------|--------------|
| P/MW           | 1488.52 | 1488         | 1434.11      |
| Q/Mvar         | 110     | 181.52       | 153.86       |
| U/kV           | 525     | 511.1        | 521.06       |
| 等值阻抗/ $\Omega$ | 73.5    | 78.37 (6.6%) | 72.45 (1.4%) |
| 触发角/ $^\circ$  | 17.16   | 11.84        | 14.14        |

基于上述表格的分析,可以发现在投切完滤波器后交流母线的电压以及换流阀的触发角都会发生较大的变化,若此时系统较弱时极易导致系统发生失稳,在配合触发角调节后交流母线的电压以及换流阀的触发角都有所恢复。同时基于所提方法计算下的系统等值阻抗与系统阻抗基准值的误差也在可允许的范围之内(表中百分数表示计算出的等值阻抗与基准值的误差)。

案例二:以受端交流系统为例进行验证,逆变侧采用的是定关断角控制,因此可以通过改变关断角指令值来改变触发角。考虑到逆变侧滤波器组的配备,只投切 A 型滤波器进行验证。测得系统流向交流母线处的有功功率 P、无功功率 Q 以及母线电压的有效值 U 如下表所示:

表 3 切换滤波器 A 与触发角配合下的等值阻抗计算

|                | 稳态值     | 切除滤波器 A     | 改变关断角指令值      |
|----------------|---------|-------------|---------------|
| P/MW           | 1396.21 | 1338.68     | 1406.8        |
| Q/Mvar         | 90.01   | -105.31     | 150.57        |
| U/kV           | 519.07  | 502.74      | 524.37        |
| 等值阻抗/ $\Omega$ | 45.94   | 43.35(5.6%) | 45.92 (0.04%) |

基于上述表格中数据分析可以得出用所提方法来计算等值阻抗的有效性,配合以触发角的调节可以减小因为投切滤波器而造成的母线电压大幅度跌落。

### 3 结语

本文提出了一种基于滤波器组投切与触发角调节相互配合的系统等值阻抗的计算方法,现得到以下结论:

1)本文所提的计算交流系统等值阻抗的方法同时适用于送端和受端交流系统;

2)配合触发角的调节,可以解决投切滤波器使换流母线电压大范围变化的问题;

3)本文所提的方法具有主动识别系统等值阻抗的功能,可以为后续的控制策略的选取提供一定的参考。

考虑到现在越来越多的新能源也需要远距离的直流外送,因此在送端交流系统侧不仅有火电水电,还会有大规模的新能源接入,基于该场景下本文所提的方法是否还适用将作为下一步的工作内容。

### 参考文献

- [1]赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 中国电力出版社, 2004.
- [2] 潘卫明, 卢东斌, 崔恒丰等. 特高压直流系统运行短路比检测方法及应用[J]. 电气技术, 2023, 24 (09): 71-75+79.
- [3]陈薇. 基于测量法的配电网短路容量监测技术研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2020.
- [4]邓朴, 郝正航, 薛毅等. 基于实验技术的电网短路容量测试方法[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(01): 8-12.
- [5]苏灿, 周文, 高敏等. 等效电源电压变异系数约束的短路容量测试方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(05): 118—124.
- [6]季宇, 吴鸣, 刘海涛等. 不同类型风电机组对系统短路容量的影响[J]. 电测与仪表, 2019, 56(22): 72-78.
- [7]马御棠, 黄曹炜, 王科等. 交、直流输电线路人工接地短路电流地线分流的测量及频率分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(12): 3914-3921.



- [8] 武云生, 胡波, 朱敏. 利用负荷干扰测算铜川、耀县变电所母线短路容量的试验研究[J]. 西北电力技术, 1996(02): 1-10.
- [9] 聂春芳, 邓朴, 薛毅等. 基于扰动曲线拟合法的短路容量测量技术[J]. 电力大数据, 2021, 24(06): 67-75.
- [10] 徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3805-3819.
- [11] 孙华东, 徐式蕴, 许涛等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(02): 497-506.
- [12] 郝晓宇, 郭春义, 蒋雯等. 基于无功功率注入的 MMC-HVDC 交流电网等值阻抗识别方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(09): 184-192.
- [13] R. Petrella, A. Revelant and P. Stocco. Advances on inter-harmonic variable-frequency injection-based grid-impedance estimation methods suitable for PV inverters. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 1173-1179.
- [14] Asiminoaei, L.&Teodorescu, R.&Blaabjerg, F.&Borup, Uffe. (2005). A Digital Controlled PV-Inverter With Grid Impedance Estimation for ENS Detection. Power Electronics, IEEE Transactions on. 20. 1480-1490.
- [15] 常鲜戎, 赵书强. 电力系统暂态过程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [16] 王秋楠, 晋宏杨, 刘东等. LCC-HVDC 换流站无功电压控制问题综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(02): 10-17.
- [17] 白惠珍. 电路理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [18] 张森, 王慧芳, 叶睿恺. 基于分层估计的戴维南等值阻抗在线计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 90-98.
- [19] 陈巧地, 张兴, 李明等. 基于基波阻抗辨识的短路比测量方法[J]. 电气工程学报, 2019, 14(02): 7-11.
- [20] 黄启元, 曹善康, 吴宇奇等. 计及新能源幅相特性的新型多馈入短路比指标[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-15[2023-12-13].
- [21] 马富艺龙, 辛焕海, 刘晨曦等. 新能源基地柔性直流送出系统小扰动电压支撑强度评估[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5758-5770+5938.
- [22] 杨晓雷, 韩中杰, 叶琳等. 考虑 VSC-HVDC 作用的 LCC-HVDC 系统短路比实用计算[J]. 浙江电力, 2023, 42(01): 31-38.
- [23] 庞博, 郭春义, 王燕宁等. 交流系统短路比和阻抗角对模块化多电平高压直流输电系统低频段振荡模式的影响[J]. 现代电力, 2022, 39(02): 151-159.
- [24] 何遥, 张英敏, 李保宏等. 基于等效电流源的级联混合直流馈入系统强度影响分析[J/OL]. 电网技术: 1-14[2023-12-13].
- [25] 肖浩, 李银红, 石东源等. 适用于多馈入直流系统静

态电压稳定分析的综合短路比强度指标[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(22): 6471-6480+6759.

- [26] 周瑞涵, 辛焕海, 鞠平. 基于广义短路比的多馈入系统强度量化原理与方法: 回顾、探讨与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3794-3811.

作者照片



作者简介:

贺小鹏(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电, E-mail: hxp904980794@163.com;  
郭春义(1984), 通信作者, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为直流输电系统的稳定和控制、新能源并网与稳定控制等, E-mail: chunyi.guo@outlook.com.

附录

附表 1 LCC-HVDC 系统控制参数

| 参数                      | 数值                             |                                        |
|-------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
|                         | 整流侧                            | 逆变侧                                    |
| 系统<br>额定值               | 额定功率 $P_N/\text{MW}$           | 1500                                   |
|                         | 额定直流电压 $U_N/\text{kV}$         | 500                                    |
|                         | 额定直流电流 $I_N/\text{kA}$         | 3                                      |
|                         | 交流母线额定电压<br>$U_{sN}/\text{kV}$ | 525                                    |
|                         | 交流系统频率 $f_N/\text{Hz}$         | 50                                     |
| 换流<br>变压器               | 额定容量 $S_{TN}/\text{MVA}$       | 889.5      833.4                       |
|                         | 电压比                            | 525:209.7      525:196.5               |
|                         | 短路电抗 ( $\text{pu}$ )           | 0.16      0.152                        |
| 定电流<br>/定关<br>断角控<br>制器 | 比例系数 $K_p$                     | 0.5      0.2                           |
|                         | 积分系数 $K_i$                     | $\frac{1}{0.01092}$ $\frac{1}{0.0144}$ |
| 交流滤<br>波器<br>A 型        | 电阻 $R_1/\Omega$                | 2500      500                          |
|                         | 电感 $L_1, L_2/\text{mH}$        | 44.731, 1.239      17.01, 9.918        |
|                         | 电容 $C_1, C_2/\mu\text{F}$      | 1.605, 56.824      1.963, 3.709        |
| 交流滤<br>波器<br>B 型        | 电阻 $R_1, R_2/\Omega$           | 400, 1500                              |
|                         | 电感 $L_1, L_2, L_3/\text{mH}$   | 8.116, 129.39, 1.634      ——           |
|                         | 电容 $C_1, C_2, C_3/\mu\text{F}$ | 1.578, 7.218, 7.704                    |
| 交流滤<br>波器<br>C 型        | 电感 $L_1/\text{mH}$             | 2.721      3.964                       |
|                         | 电容 $C_1/\mu\text{F}$           | 1.616      1.972                       |

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 新能源基地稳态运行风险评估方法

徐鹏, 杨松浩, 郝治国

(西安交通大学电气工程学院, 西安市 碑林区 710049)

## Risk assessment methodology for steady-state operation of new energy bases

Xu Peng, Yang Songhao, Hao Zhiguo

(School of Electrical Engineering Xi'an Jiaotong University, Beilin District, Xi'an 710049, China)

**ABSTRACT:** To address the risk assessment of the new energy base, this paper first considers the uncertain characteristics of new energy output and adopts a Gaussian mixture model based on the KDE-DPHEM method to model the output of new energy units. A steady-state mathematical model of the new energy base is constructed based on its structural and operational characteristics. Secondly, an assessment model based on comprehensive risk indicators is proposed, integrating risk assessment theory and the operational characteristics of the new energy base. Finally, for the long-term operation risk assessment of new energy bases, a large number of general operation scenarios are generated using the Monte Carlo sampling method. An improved K-means clustering algorithm based on data feature extraction is proposed to cluster typical operation scenarios of new energy bases under long-term operation conditions, inspired by data mining concepts. This leads to a risk assessment method based on both general and typical scenarios. The paper utilizes actual output data of new energy units released by the State Grid, and simulations of the two assessment methods are conducted based on the constructed steady-state operation mathematical model of new energy bases. The results verify the feasibility of the proposed methods. This study's findings provide valuable insights and references for the risk assessment of the steady-state operation of new energy bases.

**KEY WORDS:** New energy base; Risk assessment; New energy unit uncertainty modeling; Auto encoder; clustering method

**摘要:** 针对新能源基地风险评估问题, 本文首先考虑到新能源出力不确定特性, 采用基于 KDE-DPHEM 方法的高斯混合模型对新能源机组出力进行建模, 并基于新能源基地结构和运行特点, 构建了新能源基地的稳态数学模型。其次, 结合风险评估理论以及新能源基地的运行特性, 提出了

一种基于综合风险指标的评估模型。最后, 针对新能源基地长期运行风险评估问题, 利用蒙特卡罗方法抽样生成了大量新能源基地一般性运行场景, 借鉴数据挖掘思想, 提出了基于数据特征提取的改进 K 均值聚类算法, 实现新能源基地长期运行情况下的典型运行场景的聚类生成, 提出了基于一般性场景和典型场景的风险评估方法。本文使用国家电网发布的新能源机组实际出力数据, 基于构建的新能源基地稳态运行数学模型, 对两种评估方法进行了仿真, 结果验证了所提方法的可行性。本研究的结果可为新能源基地稳态运行风险评估提供思路和参考。

**关键词:** 新能源基地; 风险评估; 新能源机组不确定性建模; 自动编码器; 聚类方法

## 0 引言

新能源基地在稳态运行时可以看作一个以风电、光电为主体的新型电力系统。新型电力系统不确定性主要来源于源荷、元件故障以及分布式可再生能源的不确定性<sup>[1]</sup>。而其稳态运行过程中的不确定性主要来源于新能源出力的波动性和不确定性, 对其进行不确定性建模是量化分析风险的基础。目前常见的思路是建立新能源机组出力的概率密度模型, 文献<sup>[2]</sup>提出了一种基于改进非参数核密度估计(kernel density estimation, KDE)的新能源机组出力模型, 通过设立带宽评价机制获得最佳带宽, 较传统 KDE 方法具备更优秀的局部适应性; Copula 理论<sup>[3-5]</sup>是目前研究新能源不确定性建模的常用方法。文献<sup>[6]</sup><sup>[38]</sup>利用建立了特殊高斯混合模型, 通过改进 DPHEM 算法求解克服了估计精度较低的问题。

针对含新能源并网的新型电力系统的风险评估, 目前主要研究方法是基于系统可能承受的风险, 结合相关参数并设立评估指标来量化风险<sup>[7]</sup>。文献<sup>[8]</sup>创新性的提出了基于风险价值理论的具备递进关系的三层评估方法; 在新能源大量并网的背景下, 典型场景的应用越发广泛, 利用典型场景进行风险

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2022YFB2402705); 国家电网公司科技项目(52272222001J)。

National Key Research and Development Program of China(2022YFB2402705); State Grid Technology Project(52272222001J).

评估,具备更快速度的同时占用内存更小;文献<sup>[9]</sup>用电力曲线间的相似性度量指标代替传统的欧氏距离,在此基础上进一步优化初始质心提取后进行聚类,获得了良好的结果;文献<sup>[10]</sup>基于长短期神经网络对数据进行提炼后聚类,精度获得了进一步提升;文献<sup>[11]</sup>利用与时间特征关联的 DTC 距离取代传统的欧氏距离,同时采用改进的自动编码器进行数据降维后聚类,具备优越的典型运行场景提取能力。

本文采用基于 KDE-DPHEM 方法的高斯混合模型对新能源机组的出力进行建模,较传统的高斯混合模型具备更高的精度,并建立了新能源基地稳态运行模型,同时提出了综合风险评估模型;最后探讨了新能源基地稳态运行下的风险评估方法,首先利用蒙特卡罗方法抽样生成大量新能源基地一般性运行场景,利用一般性场景进行风险评估。考虑到大量一般性场景消耗算力和内存的问题,提出了基于稀疏自动编码器的改进 K 均值聚类方法,从大量一般性运行场景中提炼出典型运行场景,利用典型场景进行风险评估。最后使用实际数据对方法进行测试和对比,结果验证了所提方法的有效性和可行性。

## 1 新能源基地稳态运行数学模型

### 1.1 新能源机组出力不确定性建模

高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)可用于构造新能源机组出力的概率分布<sup>[12]</sup>,对一维变量而言,当采用高斯函数作为核函数时,基于 KDE 方法可以得到各高斯成分权重相同,高斯成分数等于样本数的特殊高斯混合模型。即:

$$e^{M_b}(x) = \sum_{t=1}^{M_b} \omega_t^b \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t^b}} e^{-\frac{(x-\mu_t^b)^2}{2\sigma_t^b}} \quad (1)$$

式中:  $M_b$  表示样本数量;  $\omega_t^b$  代表第  $t$  个高斯成分的权重;  $\mu_t^b$ 、 $\sigma_t^b$  分别表示第  $t$  个高斯成分的均值与方差;  $\mu_t$  等于第  $t$  个样本  $x_t$ ,  $\sigma_t$  等于带宽  $h$ 。

样本的增加会导致高斯成分数的增加,这不利于后续的分析。当样本数过多时需要高斯成分数进行约简,文献<sup>[13]</sup>将高斯成分数约简的过程转变为一个优化问题:对于一个满足  $e^{M_b}(x)$  概率分布的样本集  $\alpha$ ,求简化模型  $e^{M_a}(x)$  的参数,使得  $e^{M_a}(x)$  对数似然函数期望值最大,利用 DPHEM 算法进行求解。文献<sup>[6]39</sup>在此基础上提出了相关改进,具备更快的计算速率和更加稳定的计算结果。本文采用改进后的 DPHEM 算法求解模型,具体算法见文献<sup>[6]39</sup>。考

虑到新能源机组出力必须大于 0 这一边界问题,本文采用镜像法解决。

### 1.2 新能源基地建模

新能源基地的模型拓扑可以看作反向的配电网模型。因此本文提出了一个包含 15 个节点的新能源基地网络模型。模型拓扑如图 1 所示。

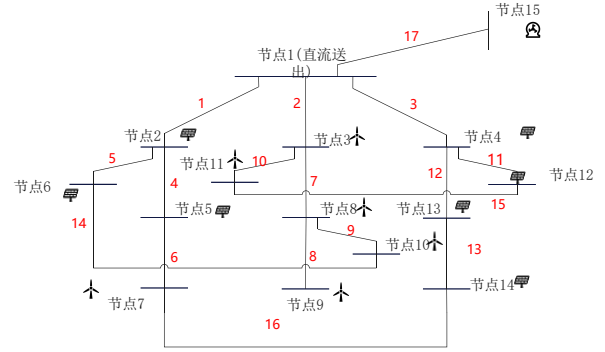


图 1 15 节点新能源基地网络模型拓扑

Fig.1 15-node new energy base network model topology

## 2 综合风险评估模型

新能源基地概率潮流计算的结果是风险的量化体现,新能源基地风险与其有着数学上的联系,因此,本文设置了以下风险评估指标。

电压越限指标:

$$V_{OI} = \sum_{d=1}^C \frac{e^{\max(U_{d,\min}-U_d, U_d-U_{d,\max}, 0)} - 1}{e - 1} \quad (2)$$

式中:  $C$  为电网中节点的数量;  $U_d$  为电网某节点的电压值;  $U_{d,\min}$ ,  $U_{d,\max}$  分别为设定电压允许出现的最小值和最大值。本文设置  $U_{d,\min} = 0.97\text{p.u.}$ ,  $U_{d,\max} = 1.07\text{p.u.}$ 。

潮流越限指标:

$$F_{OI} = \sum_{l=1}^F \frac{e^{\max(P_l-P_{l,\max}, 0)} - 1}{e - 1} \quad (3)$$

式中:  $F$  为电网中支路的数量;  $P_l$  为电网中某支路的传输功率;  $P_{l,\max}$  为设定运行支路中允许通过的最大功率。本文设置  $P_{l,\max} = 50\text{MW}$ 。

网损越限风险指标:

$$L_{OI} = \sum_{l=1}^F \max(r_l - r_{l,E}, 0) \quad (4)$$

式中:  $r_l$  表示电网中某支路的功率损失;  $r_{l,E}$  表示设定的支路的期望损失。本文设置  $r_{l,E} = 0.03$ 。

负荷损失指标和电源损失指标:

$$L_{LI,t} = \frac{L_{L,t}}{L_t} \quad (5)$$

$$P_{LI,t} = \frac{P_{L,t}}{P_t} \quad (6)$$

式中:  $L_t$  表示负荷的大小;  $L_{L,t}$  表示负荷损失的大小。  $P_t$  表示新能源出力的大小;  $P_{L,t}$  表示新能源出力损失的大小。

综合风险值指标由五个指标的加权和得到:

$$R_{oa} = \omega_1 V_{OI} + \omega_2 F_{OI} + \omega_3 L_{OI} + \omega_4 L_{LI} + \omega_5 P_{LI} \quad (7)$$

各指标权重可由层次分析法得到, 本文的五个指标权重分别为: 0.02, 0.02, 0.07, 0.67, 0.22。

综上所述, 本文建立了综合风险评估模型, 考虑电网常规风险的同时兼顾了新能源基地的运行特点, 具备一定实用性。

### 3 典型运行场景生成方法

#### 3.1 一般性运行场景生成

本文不考虑系统中各线路或元件出现故障的情况, 认为新能源基地运行场景仅由机组出力和负荷确定。由于新能源基地往往经直流送出向城市供电, 考虑到城市负荷的特点, 本文设置了阶梯型负荷, 不同时刻的负荷大小如表 1 所示:

表 1 不同时刻基地负荷

| Table 1 Base load at different moments |          |
|----------------------------------------|----------|
| 时间区间                                   | 负荷大小(MW) |
| (23:00,6:00]                           | 100      |
| (6:00,10:00]                           | 280      |
| (10:00,17:00]                          | 200      |
| (17:00,21:00]                          | 360      |
| (21:00,23:00]                          | 200      |

在此基础上, 利用蒙特卡罗抽样法, 等概率抽取生成场景所对应的时刻, 在该时刻下依据各机组出力的概率密度抽取机组出力。最终得到了 20000 个新能源基地的一般运行场景。

但大量一般性场景会消耗大量内存和算力, 因此有必要提取新能源基地运行的典型场景, 用少量数据去评估基地运行的风险。为此, 本文提出了一种基于数据特征的场景聚类方法。

#### 3.2 稀疏自动编码器

稀疏自动编码器是一种神经网络模型, 仅包含一个隐含层。通过引入稀疏性这一概念, 降低每次迭代学习算法中隐含层激活神经元的数目, 较一般自动编码器具备更快的运算速度。训练过程基于成本函数进行优化。

$$Cost = A + \lambda \times \Omega_{sparsity} + \beta \times \Omega_{weights} \quad (8)$$

式中:  $A$  为训练误差;  $\lambda$  为稀疏正则项的权重系数;  $\Omega_{sparsity}$  为相对熵;  $\beta$  为  $L_2$  正则项的权重系数;  $\Omega_{weights}$  为  $L_2$  正则项。

自动编码器的稀疏性可量化为常数  $\rho$ , 相对熵用于衡量平均激活度与稀疏度之间的差距。  $L_2$  正则项

用于衡量各神经元映射函数权值对稀疏性的影响。

$$\Omega_{sparsity} = \sum_{c=1}^C \rho \log \left( \frac{\rho}{\rho_c} \right) + (1 - \rho) \left( \frac{1 - \rho}{1 - \rho_c} \right) \quad (9)$$

$$\Omega_{weights} = 0.5 \sum_{c=1}^C \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (W_{mn}^1)^2 \quad (10)$$

式中:  $C$  表示稀疏自编码器隐含层神经元的数目;

$M$  表示样本数量;  $N$  表示输入变量的维数。

通过训练稀疏自编码器, 在提高计算速度的同时还能够得到良好的编码结果, 数据能够保持原有数据的深层次特征, 这对聚类操作十分有利。

#### 3.3 优化初始聚类中心选取的 K 均值聚类方法

初始聚类中心的选择是 K 均值算法十分重要的一环, 随机选取初始中心得到的结果随机性较大且不稳定。为此, 本文提出了一种初始聚类中心选取方法。

定义数据集  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_a\}$  中第  $i$  个样本点的密度  $dis_{avg,i}$ , 已选聚类中心与某样本点  $m$  的平均距离  $dis_{tc,m}$  以及综合密度如下:

$$dis_{avg,i} = \frac{1}{a} \sum_{j=1}^a (x_i - x_j)^2 \quad (11)$$

$$dis_{tc,m} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (x_m - x_j)^2 \quad (12)$$

$$dis_{s_j} = \lambda dis_{avg,j} + (1 - \lambda) dis_{tc,j} \quad (13)$$

式中:  $K$  表示你已选取的聚类中心数量;  $\lambda$  表示权重。

本算法首先选取密度最稀疏的点(密度最大)作为第一个初始聚类中心。选取第二个及以后的聚类中心时, 首先, 删去已选取的聚类中心, 计算处理后数据集中各样本点的综合密度。选取综合密度最稀疏的样本点作为新的聚类中心。

基于上述原理, 该方法生成的初始聚类中心不会出现过于靠近的问题。可根据不同情况调整权重  $\lambda$ , 以求达到最优的聚类效果。

本文采用了数据集中所有样本的轮廓系数指标 (Silhouette) 的平均值作为聚类性能评估指标。指标越大表明所有样本与所属分类更匹配。单个样本指标计算公式如下式所示:

$$s_p = \frac{n_p - y_p}{\max(n_p, y_p)} \quad (14)$$

式中:  $n_p$  表示该样本与所有与它属于不同聚类样本的平均距离, 称为类间距离;  $y_p$  表示该样本与同聚类所有其他样本的平均距离, 称为类内距离。

### 4 算例分析

#### 4.1 机组出力建模

本文采用的数据集<sup>[14]</sup>是由国家电网发布的完整数据集。本文考虑以零时为起点,将一天均分为96个时刻,对每个时刻下新能源机组出力进行建模。得到的一光伏机组出力结果如图2、图3所示:

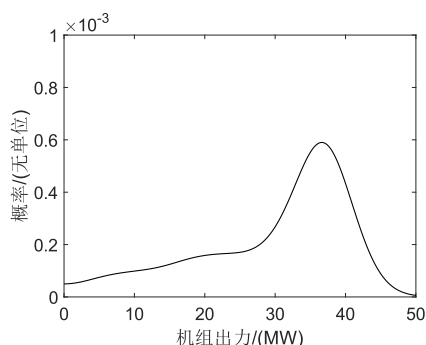


图2 12时机组出力概率密度分布

Fig.2 Probability density distribution of unit output at 12 o'clock

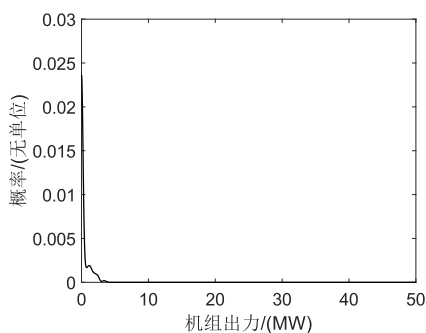


图3 20时机组出力概率密度分布

Fig.3 Probability density distribution of unit output at 20 o'clock

可以看出,光伏机组出力呈现明显的时间特征,在夜间出力较小,而在午间出力较大,与实际相符,证明使用该方法进行不确定性建模具有可行性。

#### 4.2 一般性场景风险评估结果

计算新能源基地的潮流,在此基础上计算出每个场景的风险指标。最后得出两年内新能源基地综合风险指标的概率分布函数,结果如图4所示。

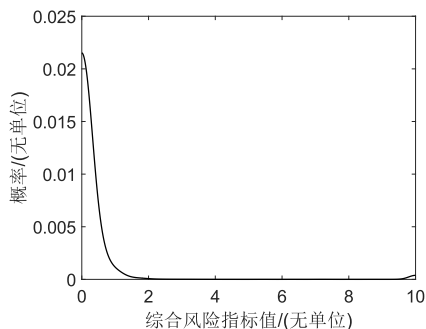


图4 综合风险指标概率分布图

Fig.4 Probability distribution of composite risk indicators

为评估基地风险水平程度,还需要添加相关指

标的评价标准。评价标准的选取公式如下:

$$R_B = R_W \times \lambda \quad (15)$$

式中:  $R_B$  表示风险指标评价标准;  $R_W$  表示电网中可能出现最坏情况下的风险指标值;  $\lambda$  为允许系数,取值范围为[0,1],表示基地能够容许的最坏情况。

五项评估指标的评价标准如表2所示:

表2 指标评价标准

| Table 2 Indicator evaluation criteria |           |           |           |           |           |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $V_{OIS}$                             | $P_{OIS}$ | $L_{OIS}$ | $L_{LIS}$ | $P_{LIS}$ | $R_{OIS}$ |
| 0.2363                                | 4.865     | 1.44      | 1         | 1         | 1.0928    |

基于上述评价指标,得出该新能源基地在长期运行下各指标处于较高风险时的概率如表3所示:

表3 指标高风险概率

| Table 3 Indicator high-risk probability |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $V_{OIS}$                               | $P_{OIS}$ | $L_{OIS}$ | $L_{LIS}$ | $P_{LIS}$ | $R_{OIS}$ |
| 3.678%                                  | 3.873%    | 11.673%   | 19.797%   | 1.940%    | 4.120%    |

从表中可以看出,该新能源基地运行时网损越限风险和负荷损失高风险概率较大,均在10%以上,在实际运行时需更加关注相关指标。同时,该新能源基地运行时综合风险指标高风险概率较低,表明其大部分时间运行正常。

#### 4.3 典型场景风险评估结果

利用训练好的稀疏自编码器进行数据特征提取,将提取特征后的数据利用改进初始聚类中心选取的K均值算法进行聚类,本文进行了聚类数目从4至17的聚类模拟。通过对不同聚类数目下各次模拟的所有样本点的轮廓系数指标的平均值进行比较,以此确定最优聚类数目。得到平均轮廓指标变化如图5所示。

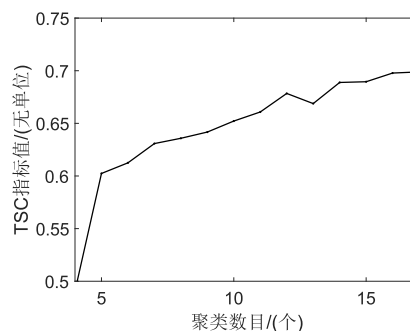


图5 平均轮廓指标变化图

Fig.5 Chart of Change in average Silhouette

可以看出聚类数目较少时指标平均值增长较快,但当聚类数目达到13时出现拐点,在此之后指标平均值虽然恢复上升的趋势,但是增长幅度却大大降低,为减少算力消耗,确定最优聚类数目为14。

采用 T-sne 方法绘制聚类效果如图6所示,可以看出,场景聚类效果较好。



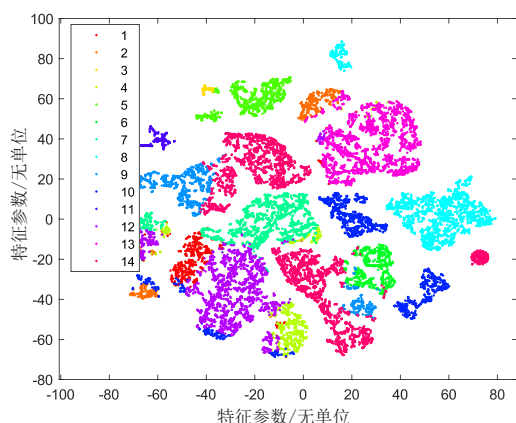


图6 聚类效果图

Fig.6 Clustering effect diagram

为了评估基于典型场景的长期风险评估方法的评估效果,本文利用生成的20000个一般性场景进行测试,计算基于本方法得出的综合风险指标与一般性运行场景风险评估方法得出的综合风险指标之间的相对误差。剔除异常值后,得到的结果如图7所示:

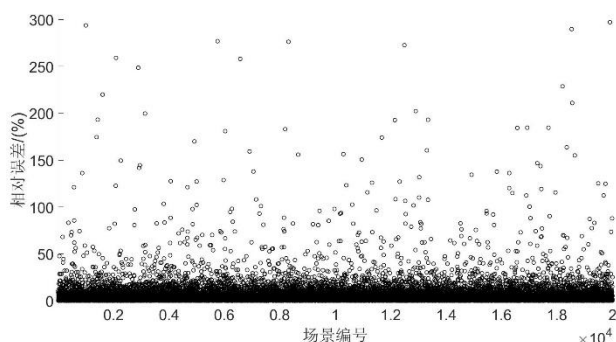


图7 两种风险评估方法相对误差

Fig.7 Relative error of the two risk assessment methods

处理异常数据后得到平均相对误差为7.43%;同时,从上图可以看出,相对误差绝大部分在20%以下,处于一个较低的水平。表明使用典型场景进行风险评估与使用一般性场景风险评估效果差距较小。

综上所述,基于典型场景的沙戈荒新能源基地运行风险评估方法获得的效果较好,具备可行性。

## 5 结论

本文结合新能源不确定性建模、风险评估、聚类相关理论开展了对于沙戈荒新能源基地稳态运行风险在线评估方法的研究,主要结论如下:

(1) 基于KDE-DPHEM方法的新能源不确定性建模结果很好的吻合了新能源机组实际的出力

特性,建模方法具备可行性和实用性。

(2) 基于一般性运行场景进行风险评估,能够得到各项风险指标的概率分布,结合评价标准能够对新能源基地运行状态进行有效评估。

(3) 基于数据特征提取的改进K均值聚类方法提取典型场景效果较好。利用典型场景进行风险评估与一般性场景风险评估相对误差较小。

## 参考文献

- [1] 徐潇源,王晗,严正,等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 2-13.
- [2] 杨楠,黄禹,叶迪,等. 基于自适应多变量非参数核密度估计的多风电场出力相关性建模 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3805-12+4021.
- [3] 潘雄,王莉莉,徐玉琴,等. 基于混合Copula函数的风电场出力建模方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 17-22.
- [4] 王精卫,周步祥,彭章刚,等. 基于综合Copula函数的风电出力相关性建模 [J]. 电测与仪表, 2016, 53(16): 96-101.
- [5] 王小红,周步祥,张乐,等. 基于时变Copula函数的风电出力相关性分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(01): 43-8.
- [6] 高元海,徐潇源,严正. 基于多维高斯混合模型的电力系统不确定性建模方法 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(01): 37-48.
- [7] 翟阿瑞. 高比例风电并网电力系统运行风险评估和应对措施分析 [J]. 机电信息, 2023, (23): 20-2.
- [8] 马燕峰,杨小款,王子建,等. 基于风险价值的大规模风电并网电力系统运行风险评估 [J]. 电网技术, 2021, 45(03): 849-55.
- [9] 程雄,戴鹏,钟浩,等. 考虑综合相似性度量的光伏典型出力场景聚类方法 [J]. 中国电机工程
- [10] 庞传军,余建明,冯长有,等. 基于LSTM自动编码器的电力负荷聚类建模及特性分析 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 57-63.
- [11] 庄颖睿,程林,齐宁,等. 基于深度时间聚类的微电网典型场景生成方法 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 95-103.
- [12] 陈金富,孙鑫,段献忠,等. 基于机会约束规划的含风电场电力系统可用输电能力计算 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6804-14+7094.
- [13] YU L, YANG T, CHAN A B. Density-Preserving Hierarchical EM Algorithm: Simplifying Gaussian Mixture Models for Approximate Inference [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019, 41(6): 1323-37.
- [14] CHEN Y, XU J. Solar and wind power data from the Chinese State Grid Renewable Energy Generation Forecasting Competition [J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 577.



徐鹏

收稿日期: 2024-07-22。

作者简介:

徐鹏 (2002), 男, 本科生, 研究方向为电力系统稳定性分析, E-mail: pengxuxjtu@163.com;

杨松浩(1989), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统安全稳定防御、电力系统稳定性分析与控制、人工智能在电力系统保护和稳定中的应用, E-mail: songhaoyang@xjtu.edu.cn。

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 基于线性二次控制的柔性互联台区负载均衡策略

梁栋<sup>1</sup>, 吴成奥<sup>1</sup>

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学), 天津市北辰区 300401)

## Flexible Interconnected Area Load Balancing Strategy Based on Linear Quadratic Control

Dong LIANG, Chengao WU

(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment (Hebei University of Technology), Tianjin 300401, China)

**ABSTRACT:** This paper proposes a load balancing control strategy for flexible interconnection stations based on linear quadratic control (Linear Quadratic Regulator, LQR) to deal with the load balancing problem in microgrids. By introducing flexible interconnection devices, power balance between stations can be achieved. Based on the state space model, an optimal control algorithm is designed to ensure balanced load rates among each station and achieve stable operation of the system. The simulation results show that the proposed strategy can significantly balance the load rate of each station area and improve the operational reliability and stability of the power system.

**KEY WORDS:** flexible interconnection, FDS, linear quadratic control, load balance

**摘要:** 本文提出了一种基于线性二次控制(Linear Quadratic Regulator, LQR)的柔性互联台区负载均衡调控策略,以应对微电网中的负载均衡问题。通过引入柔性互联装置,实现台区间的功率平衡。基于状态空间模型,设计了优化控制算法,确保各台区间的负载率均衡,实现系统的稳定运行。仿真结果表明,所提出的策略能够显著均衡各台区负载率,提高电力系统的运行可靠性和稳定性。

**关键词:** 柔性互联; FDS; 线性二次控制; 负载均衡

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.P20166

## 1 引言

高效、灵活、可靠、安全的配电网是坚强智能电网建设的重要内容。当前随着经济快速发展,电网负荷节节攀升,现有变压器时常处于满载或过载运行状态,威胁低压配电台区的安全可靠运行<sup>[1]</sup>。电源出力和用户需求的随机性和不确定性,特别是高渗透率分布式电源的大量、无序接入电网带来的净负荷的剧烈波动,会进一步加大网侧负荷峰谷差、减少变压器寿命以及增大网损,导致变压器过载等问题,进而导致系统在局部时段的灵活性严重

不足,对低压配电网安全运行带来严峻挑战。

柔性多状态开关(Flexible Distribution Switch, FDS)作为可调度单元已成为配电网运行优化一大研究热点<sup>[2]-[5]</sup>。柔性互联配电网可以基于FDS精准、快速、连续的有功、无功控制功能,实现多条馈线、多个区域乃至不同电压等级之间的能量转移,有效促进风光互补、均衡馈线负载,从而提高配电网运行控制的灵活性、经济性与可靠性,满足高电能质量与高供电可靠性的定制电力需求。

时至今日,国内外学者已经针对柔性互联配电网运行优化问题进行了大量的探索。Cao W等在文献[6]中考虑了多个时间尺度,提出了两端口FDS在正常运行、模式切换、供电恢复等场景下的控制策略,充分发挥了FDS连续可调、快速响应的优点,有效保障了系统的安全运行;在此基础上,文献[7]分析了多端口FDS的接入方式与拓扑结构,提出了三端口FDS不同运行模式间的切换技术。霍群海等在文献[8]中提出了一种多变流器共同调节直流母线电压的多端口FDS复合控制策略,实现了有功、无功功率的独立控制。文献[9]中Bai L提出了FDS与储能等优化控制手段的联合调度方法,从时间和空间两个维度对配电网进行优化调度,以最大程度地降低系统运行的网络损耗。此外,Hou Y等在文献[10]建立了双闭环协调控制系统的三端口FDS模型,并分析比较了PQ和PV两种接入模式下FDS优化效果的不同,为FDS参与配电网潮流控制提供了有效的指导。郑焕坤等在文献[11]分析了FDS与有载调压变压器等离散无功调控装置的动作特性,构建了两两者协调互补的双层优化模型,首先在上层模型中采用预动作表法确定离散控制设备的最优动作时刻,随后在下层模型制定具体的动作指令,并通过FDS进行动态调整,以有效应对高渗透率DG并网引起的电压波动。彭元泉等在文献[12]综合

对比有载调压变压器、可投切电容器组、静止无功补偿器、储能及 FDS 等多种设备的优化效果,构建了多手段协同的配电网优化模型,并基于二阶锥规划 (Second Order Cone Programming, SOCP) 与大 M 法对模型进行松弛求解,在保障求解效率的同时,确保了优化调度决策方案的全局最优。

上述模型均为优化调度问题,求解复杂、计算量大、实时性较差。为了应对上述挑战,本文在建立系统状态空间模型的基础上,提出了一种基于线性二次控制的柔性互联台区负载均衡调控策略。该策略通过在台区间引入柔性互联装置,实现各台区之间的负载均衡,并通过仿真验证了该策略的有效性。结果表明,所提出的控制策略能够有效均衡各台区配变之间的负载率并具有一定的鲁棒性,介意显著提升微电网运行的稳定性。

## 2 基于线性二次控制的柔性互联台区负载均衡建模

### 2.1 状态空间模型

$N$  个台区低压侧直流柔性互联,最少需要  $N-1$  条联络线,使所有台区低压侧直流母线连接成一棵生成树。选择每条联络线的其中一端 VSC 有功功率为控制变量,共计  $N-1$  个控制变量,其对应的 VSC 属于  $N-1$  个不同台区:

$$\mathbf{u} = [\Delta P_{\text{VSC}2} \cdots \Delta P_{\text{VSC}N}] \in \mathbb{R}^{N-1} \quad (1)$$

选择台区 1 为参考,可定义状态变量为其他  $N-1$  个台区配变负载率与参考配变负载率之差:

$$\mathbf{x} = [T_{\text{dev}2} \cdots T_{\text{dev}N}] \in \mathbb{R}^{N-1}, T_{\text{dev}i} = T_i - T_1, i = 2, \dots, N \quad (2)$$

其中:  $T_i$  为配变  $i$  的负载率;  $T_{\text{dev}i}$  为配变  $i$  与参考配变负载率之差。

联络线有功功率以注入各台区为正方向,若台区  $i$  末端联络线注入功率增加  $\Delta P_{\text{VSC}i}$ ,忽略线路和器件损耗时配变有功负荷增量为:

$$\Delta P_{Ti} = -\Delta P_{\text{VSC}i}, i = 1, \dots, N \quad (3)$$

其中:  $\Delta P_{Ti}$  为配变  $i$  的有功负荷增量。

假设台区无功负荷很小,则不考虑无功负荷时,配变  $i$  负载率增量为:

$$\Delta T_i = \frac{\Delta P_{Ti}}{S_{Ti}} = \frac{-\Delta P_{\text{VSC}i}}{S_{Ti}}, i = 1, \dots, N \quad (4)$$

其中:  $\Delta T_i$  为配变  $i$  的负载率增量;  $S_{Ti}$  为配变  $i$  的额定视在功率。

状态变量  $T_{\text{dev}i}$  增量为:

$$\Delta T_{\text{dev}i} = \Delta T_i - \Delta T_1 = \frac{-\Delta P_{\text{VSC}i}}{S_{Ti}} - \frac{-\Delta P_{\text{VSC}1}}{S_{T1}} \quad (5)$$

由于注入所有台区的有功功率代数和为 0:

$$\sum_{j=1}^N \Delta P_{\text{VSC}j} = 0 \Rightarrow \Delta P_{\text{VSC}1} = -\sum_{j=2}^N \Delta P_{\text{VSC}j} \quad (6)$$

式(6)变为:

$$\Delta T_{\text{dev}i} = \frac{-\Delta P_{\text{VSC}i}}{S_{Ti}} + \frac{\sum_{j=2}^N (-\Delta P_{\text{VSC}j})}{S_{T1}} = \left[ -\frac{1}{S_{T1}} \cdots \left( -\frac{1}{S_{Ti}} - \frac{1}{S_{T1}} \right) \cdots -\frac{1}{S_{T1}} \right] \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{VSC}2} \\ \vdots \\ \Delta P_{\text{VSC}N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

即可得状态转移方程:

$$T_{\text{dev}i,t+1} = T_{\text{dev}i,t} + \left[ -\frac{1}{S_{T1}} \cdots \left( -\frac{1}{S_{Ti}} - \frac{1}{S_{T1}} \right) \cdots -\frac{1}{S_{T1}} \right] \begin{bmatrix} \Delta P_{\text{VSC}2} \\ \vdots \\ \Delta P_{\text{VSC}N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中  $i = 2, \dots, N$ 。将  $N-1$  个方程联立,改写为矩阵向量形式,即可建立离散时间状态空间模型:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y}(t+1) &= \mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

其中:  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{(N-1) \times (N-1)}$ 。

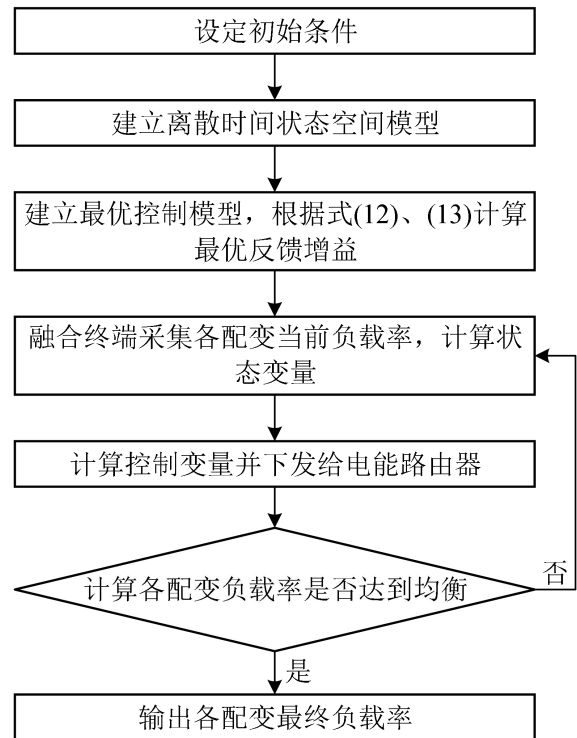


图 1 LQR 控制流程图

Figure 1 LQR Control flow chart

### 2.2 最优控制模型

控制目标为:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} [\mathbf{x}'(k)\mathbf{Q}\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}'(k)\mathbf{R}\mathbf{u}(k)] \quad (10)$$

式中,  $Q$ 、 $R$  为权重矩阵。

最终得到控制量:

$$u(k) = Kx(k) \quad (11)$$

其中:  $K$  是最优反馈增益, 即使得成本函数  $J$  最小的反馈增益, 由下式给出:

$$K = -(R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (12)$$

其中:  $P$  可以通过求解 Riccati 方程来计算:

$$P = A^T P A + Q - A^T P B (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (13)$$

当  $P$  是(13)的唯一正定解时系统  $(A+BK)$  是稳定的。控制流程图如图 1 所示。

### 3 算例分析

本节采用图 2 所示某地交直流混联配电网示范工程对所提方法进行测试。其中, 变压器容量分别为 80kVA、200kVA、630kVA。

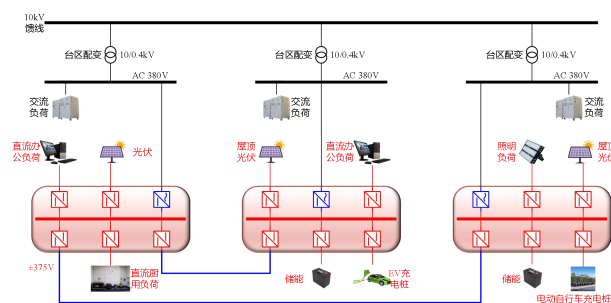


图 2 某地交直流混联配电网示范工程单线图

Figure 2 A single line diagram of an AC-DC hybrid distribution network demonstration project

#### 3.1 情形 1

本节假设所有光伏和负荷均保持不变, 分析所提控制方法的控制效果。

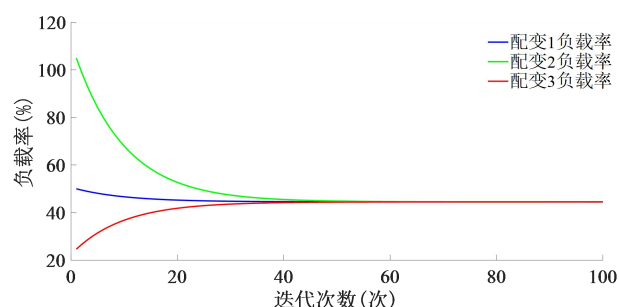


图 3 实施所提方法后各配变的负载率

Figure 3 The load rate of each transformer after implementing the proposed method

实施 LQR 控制后的结果如图 3 所示, 三个配变的负载率趋于一致。通过 LQR 控制, 配变 1、配变 2 的负载率分别由 50%、105%降低到了 44.51%、44.51%, 配变 3 的负载率从 24.60%上升到 44.50%,

有效避免了变压器重载。仿真结果表明, 所提 LQR 控制策略能有效均衡变压器负载。

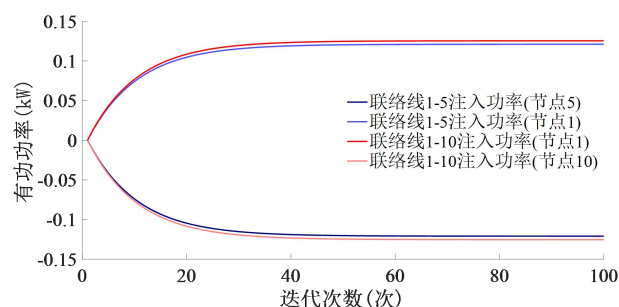


图 4 直联络线注入电路由器各端口节点有功功率曲线  
Figure 4 The active power curve of each port node of the router is injected by the DC link line

由于子网 2 与子网 3 没有直接互联, 二者的传输需要通过联络线 1-10 经过子网 1 和联络线 1-5 进行, 传输到配变 1 的子网后将剩余的调度到子网 2 中。这样不但解决了子网 1 的用电匮乏问题, 还能进一步保障子网 2 的供电能力。通过能量路由器连接, 实现了各子网之间的能量共享, 避免了单一子网负荷过重导致的供电中断。子网 1 作为能量中转站, 能够有效平衡各子网之间的能量需求, 提高整个配电网的稳定性。假设联络线上没有能量损耗, 由图 4 的仿真结果可知, FDS1 和 FDS2 馈线上始末端的有功功率变化曲线表现出对称特性, 即其总和恒为零。

综上, 仿真验证了所提出的控制策略能够在各节点之间实现平衡的有功功率分配, 有效避免了单一节点过负载的情况。同时, 在子网 2 与子网 3 没有直接互联的情况下, 通过子网 1 和联络线 1-10 的有效传输, 能够实现能量的共享和平衡, 解决了各子网之间的用电压力问题。经过动态调整后, 各节点有功功率趋于稳定且相对均衡, 表明所提控制策略具备良好的动态响应和负载均衡能力。

#### 3.2 情形 2

本节假设所有光伏和负荷均产生一定程度的波动, 分析所提控制方法的控制效果。设置光伏和负荷的扰动均为高斯噪声, 均值为 0, 标准差为 0.001。

实施 LQR 控制后的结果如图 5 所示, 三个配变的负载率趋于一致。通过 LQR 控制, 配变 1、配变 2 的负载率分别由 90.77%、106.38%降低到了 51.82%、54.17%, 配变 3 的负载率从 33.84%上升到 54.10%, 虽然负载率曲线有所波动, 但仍能达到较理想的效果, 有效避免了变压器重载。仿真结果表明, 所提 LQR 控制策略能有效均衡变压器负载。



实施LQR控制后各联络线上的注入功率结果如图6所示，FDS1和FDS2馈线上始末端的有功功率变化曲线仍然表现出对称特性。为了进一步探究所提方法的鲁棒性，又进行了不同标准差下控制效果的仿真验证，结果如表1所示。

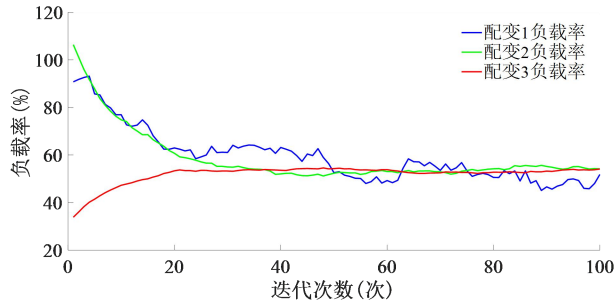


图5 光伏和负荷均存在扰动时实施所提方法后各配变的负载率

Figure 5 The load rate of each transformer after implementing the proposed method with disturbances in both photovoltaic and load

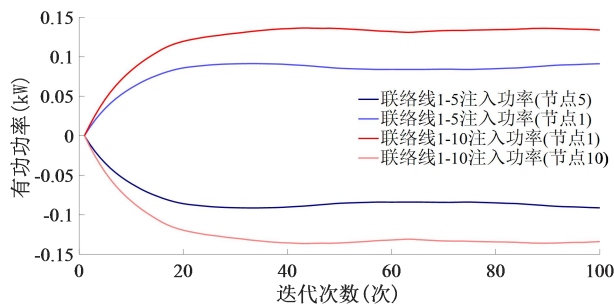


图6 光伏和负荷均存在扰动时直流联络线注入电能路由器各端口节点有功功率曲线

Figure 6 The active power curve of each port node of the power router is injected by the DC link line when there is disturbance in both PV and load

Table 1 Comparison of control results of different noise standard deviations

表1 不同噪声标准差的控制结果对比

| 噪声标准差 | 控制前各配变负载率 | 控制后各配变负载率 |
|-------|-----------|-----------|
| 0.002 | 87.43%    | 53.30%    |
|       | 104%      | 50.51%    |
|       | 34.57%    | 47.36%    |
| 0.003 | 72.47%    | 38.73%    |
|       | 103%      | 48.85%    |
|       | 34.40%    | 49.39%    |
| 0.004 | 98.20%    | 52.41%    |
|       | 103%      | 52.81%    |
|       | 34.49%    | 54.30%    |

综上，仿真验证了所提的线性二次控制的负载均衡调控策略在不同标准差下均达到较为理想的效果，证明了所提方法的具有一定鲁棒性。

## 4 结论

本文提出的基于线性二次控制的柔性互联台区负载均衡调控策略，能够有效解决台区间负载分配不均的问题。通过构建状态空间模型，定义各台区之间的负载率之差作为状态变量，应用LQR控制器最小化成本函数，获得了最优控制策略。仿真结果表明，LQR控制策略显著提高了台区间的负载分配均衡性，实现了各台区负载率趋于一致，避免了变压器过载问题。此外，所提方法具有良好的鲁棒性和适应性，能够在实际应用中推广和实施。未来的研究可以进一步考虑其他控制策略的应用，以及在更复杂的电网环境中的验证和优化。

## 参考文献

- [1] 国家能源局《关于新形势下配电网高质量发展的指导意见》
- [2] Ji H, Wang C, Li P, et al. An enhanced SOCP-based method for feeder load balancing using the multi-terminal soft open point in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2017.
- [3] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(04): 1-14.
- [4] 董旭柱, 刘志文, 李鹏, 等. 基于多端柔性多状态开关的智能配电网调控技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(01): 86-92.
- [5] 贾善翔, 彭克, 李喜东, 等. 基于智能软开关的柔性互联交直流配电系统分布式优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(08): 95-103.
- [6] Cao W, Wu J, Jenkins N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165(01): 36-47.
- [7] 张国荣, 朱一鸣, 彭勃, 等. 基于三端口柔性多状态开关不同运行模式间的切换技术[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 1-8.
- [8] 霍群海, 栗梦涵, 吴理心, 等. 柔性多状态开关新型复合控制策略. 电力系统自动化, 2018, 42(07): 166-170.
- [9] Bai L, Jiang T, Li F, et al. Distributed energy storage planning in soft open point based active distribution networks incorporating network reconfiguration and DG reactive power capability[J]. Applied Energy, 2017, 210(15): 1082-1091.
- [10] Hou Y, Xu Y, Wang Z, et al. Research on application of three-port SNOP based on dual closed-loop control in distribution network[C]. 2017 IEEE International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials. IEEE, 2017: 389-395.
- [11] 郑焕坤, 石甜静. 基于智能软开关和无功补偿装置的配电网双层优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 117-123.
- [12] 彭元泉, 麦志远, 艾维, 等. 含柔性多状态开关的主动配电网有功-无功协调动态优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 54-61.

收稿日期: 2024-08-02.

作者简介:

梁栋(1990), 男, 讲师, 研究方向: 电力系统稳定与控制, E-mail: liangdong@henbut.edu.cn;

吴成奥(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电系统运行控制, E-mail: 670147541@163.com;



梁栋

文章编号:

中图分类号: TM 85

文献标志码: A

学科代码:

# 基于轻量化 YOLOv5 的电力绝缘子缺陷检测研究

宿雲龙<sup>1</sup>, 宁昊<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 青岛 266580

## Research on Defect Detection of Power Insulators Based on Lightweight YOLOv5

Yunlong Su<sup>1</sup>, Hao Ning<sup>1</sup>, Peng Li<sup>1</sup>

1.College of New Energy, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580

**ABSTRACT:** Aiming at the existing deep learning model for insulator defect detection with low accuracy and difficult to deploy on edge computing devices, a lightweight insulator defect detection algorithm based on YOLOv5 is proposed. First, the backbone feature extraction network is lightweighted using Ghost Net with lower computational cost to reduce the number of model parameters and floating-point operations while ensuring accuracy; Second, the traditional convolution in GhostNet is changed to depth-separable convolution to construct lightweight DWCBR convolution module and C3GDW module, which reduces the number of parameters and floating-point operations of the model; In addition, the SiLU activation function is replaced by the ReLU activation function with lower computational complexity and the spatial pyramid pooling SimSPPF is redesigned; Finally, the CBAM attention mechanism is introduced to enhance the model's ability to characterize features. The experimental results show that compared with YOLOv5 original model, the number of parameters and floating-point operations of the model proposed in this paper are only 2935593 and 6.4GFLOPs, but the insulator defect detection accuracy is as high as 98.5%, which is suitable to be deployed to edge computing devices with limited storage and computational resources for insulator defect detection.

**KEY WORDS:** YOLOv5; defect detection; lightweight; attention mechanism

**摘要:** 针对现有的深度学习模型进行绝缘子缺陷检测精度低与难以在边缘计算设备上部署的问题, 提出一种基于YOLOv5的轻量化绝缘子缺陷检测算法。首先, 将主干特征提取网络利用计算成本较低的Ghost Net进行轻量化处理, 在保证精度的前提下减少模型参数数量和浮点运算数; 其次, 将Ghost Net中传统卷积改为深度可分离卷积构建轻量化DWCBR卷积模块和C3GDW模块, 减少模型的参数数量和浮点运算数; 此外, 将SiLU激活函数替换为计算复杂度更低的ReLU激活函数, 重新设计空间金字塔池化SimSPPF; 最后, 引入CBAM注意力机制增强模型对特征的表征能力。实

验结果表明, 与YOLOv5原模型相比, 本文所提出模型参数量和浮点运算数仅为2935593和6.4GFLOPs, 且绝缘子缺陷检测精度高达98.5%, 适合部署至存储和计算资源有限的边缘计算设备上, 进行绝缘子缺陷检测。

**关键词:** YOLOv5; 缺陷检测; 轻量化; 注意力机制

## 0 引言

随着国家经济的快速增长, 电能成为社会发展的关键动力源已经变得不可或缺。因此, 对电能的需求量不断增加, 输电线路的建设也在不断扩张<sup>[1]</sup>。在输电线路中绝缘子作为至关重要的元件, 在电气隔离和机械支撑方面发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。由绝缘子故障引发的事故超过电力故障的一半, 给电力系统的稳定运行造成极大的安全隐患与经济损失。为了确保输电线路的安全运行, 及时巡检输电线路、排查绝缘子的缺陷故障变得至关重要。

传统的人工巡检方式效率低下、成本高昂且容易漏检或误检<sup>[3]</sup>。云计算模式巡检即将采集到的图像数据上传到后端的云计算中心进行处理的智能化巡检方式数据传输延迟、网络宽带要求大, 难以满足绝缘子缺陷检测的实时性。将深度学习算法与边缘计算设备相结合, 对实时采集的图像在边缘设备上进行处理与分析为绝缘子故障检测提供了新的解决方法。然而, 这种方法也面临着两大问题, 一是边缘设备的计算能力低, 在其部署常规目标检测算法运行时推理速度慢, 难以满足缺陷检测的实时性需求, 二是边缘设备的内存资源有限, 无法部署大型目标检测算法。因此, 亟需设计一种兼顾检测精度与检测速度的轻量化目标检测算法。

当前, 国内外学者对绝缘子缺陷目标检测方法的研究主要集中在提升检测精度和检测速度两方面。文献<sup>[4]</sup>提出的基于U-net网络绝缘子检测方法,



绝缘子定位精度准确率达到 88.9%。文献<sup>[5]</sup>将多向特征金字塔结构引入 SSD 目标检测算法,有效对底层信息和高层信息进行融合。文献<sup>[6]</sup>将 FasterNet-tiny 和 YOLOv5 相结合,并加入 DFC 长距离注意力机制,提出 BiFPN-F 特征融合模块,其模型的 mAP 达到了 93.3%。文献<sup>[7]</sup>提出融合坐标注意力机制和多尺度深度可分离卷积的 YOLOX-s 算法,在不增大模型参数数量和计算复杂度的前提下, mAP 值达到了 93.6%。文献<sup>[8]</sup>构建 YOLOv5-dense 检测模型并在主干网络尾部引入 SimAM 注意力模块,显著绝缘子区域的精准定位。文献<sup>[9]</sup>在 CenterNet 检测网络上增加了 CBNet 多融合阶梯级联结构,再通过模型剪枝压缩网络减少参数数量,该模型有效地做到速度与精度的均衡。为解决上述问题本文提出了一种基于轻量化 YOLOv5 的电力绝缘子缺陷检测模型。首先为解决原模型参数数量大,计算复杂的问题,提出在原模型网络中引用基于深度可分离卷积和 Ghost Net 网络改进的 DWGConv 模块和 C3DWG 模块替换原网络的 Conv 模块和 C3 模块,在保证算法整体框架基本不变的情况下,以大幅降低模型参数数量和浮点运算数。其次,为增大感受野的同时加快模型的推理速度,使用 ReLU 激活函数替换 SiLU 激活函数,重新设计空间金字塔池化层 SimSPPF。最后,为解决绝缘子缺陷在复杂环境下的特征难以提取问题,在网络中引入 CBAM 注意力机制,进一步加强模型特征提取能力,降低背景图像的干扰,提高绝缘子缺陷检测精度。

## 1 基于 YOLOv5 的算法改进

### 1.1 YOLOv5 目标检测算法

YOLOv5 网络结构由输入端 (Input)、主干网络 (Backbone)、颈部网络 (Neck) 和预测网络 (Prediction) 组成<sup>[10]</sup>。其算法计算流程如图 1 所示,图像输入后裁剪为 640×640 的尺寸并传入模型,通过主干特征提取网络对输入图像进行特征提取,利用 CSPDarknet 结构进行特征表达得到三种尺度的特征图,通过特征融合网络对主干网络提取的特征进行进一步的加强,以此提高特征的融合能力。预测部份利用锚框 (Anchor Boxes) 预测目标的位置和类别信息,并使用 IOU 加权计算重叠框的相似度。最后,通过非极大值抑制算法去除冗余框和低置信度框,得到最优的目标检测框。

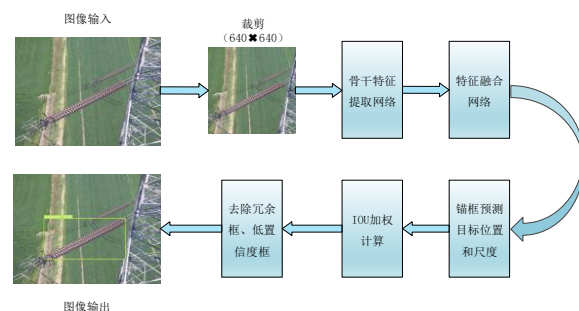


图1 YOLOv5算法计算流程图

Fig. 1 YOLOv5 algorithm calculation flowchart

### 1.2 激活函数改进

YOLOv5 原模型中使用的 SiLU (Sigmoid Linear Unit) 激活函数它结合了 Sigmoid 激活函数和 ReLU 激活函数的特点,在神经网络中的主要作用是引入非线性,使得神经网络能够学习更加复杂的模式和特征。三种激活函数的计算式和函数曲线图分别如式 (1)、式 (2)、式 (3) 和图 2 所示:

$$\text{Sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

$$\text{ReLU}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ x, & x > 0 \end{cases} = \max(0, x) \quad (2)$$

$$\text{SiLU}(x) = x \times \text{sigmoid}(x) = \frac{x}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

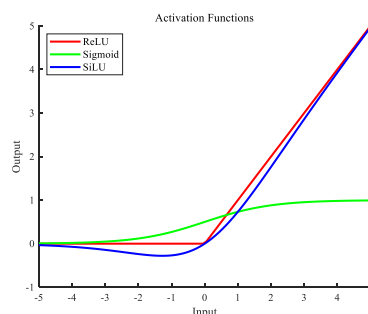


图2 激活函数曲线图

Fig. 2 activation function graph

SiLU 函数的优势在于它具有平滑的曲线和更好的梯度特性,有助于提升模型的表现。然而,因为需要计算 Sigmoid 函数, SiLU 的计算复杂度较高,模型的计算负担增加。ReLU 激活函数在输入值大于零时输出该值,小于或等于零时输出零。由于其简单性,ReLU 在计算上更加高效,同时也能有效地引入非线性,使得模型能够学习复杂的特征。因此,为了在资源受限的边缘设备中提高计算效率,将 SiLU 激活函数替换为 ReLU 激活函数。

### 1.3 空间金字塔池化层改进

SPP 空间金字塔池化广泛应用于深度学习网络

中的特征池化方法,通过对输入进行多次池化操作,每次使用不同的池化窗口大小和步幅,从而能够提取多尺度的特征。这种多尺度特征提取方法可以捕捉到更全面的信息,包括局部细节和全局上下文。其网络结构如图3所示:

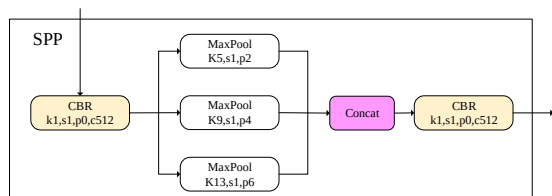


图3 SPP网络结构图

Fig. 3 SPP network structure diagram

由于SPP采用并行的最大池化操作,需要同时完成多个池化任务,计算量大导致处理速度慢。本文将SPP模块并行操作的最大池化改为串行操作的最大池化,通过串联操作进一步减小模型的计算量,然后将两个卷积层的SiLU激活函数改为ReLU激活函数构建SimSPPF模块,加快模型的计算速度。其SimSPPF模块结构如图4所示:

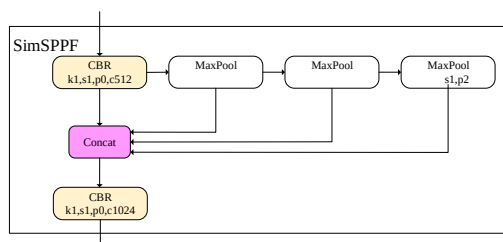


图4 SimSPPF网络结构图

Fig. 4 SimSPPF network structure diagram

#### 1.4 基于深度可分离卷积和 Ghost Net 的网络模型改进

##### 1.4.1 深度可分离卷积

在目标检测模型中,卷积层主要负责特征提取和信息融合。为了实现模型的轻量化卷积运算,在保证精度的前提下,使用深度可分离卷积代替模型中的普通卷积,减少模型参数数量和降低计算复杂度,同时还能降低过拟合风险,提高模型的泛化能力。结构如图5所示:

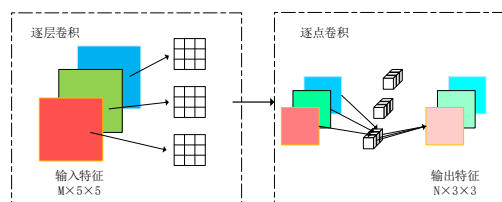


图5 深度可分离卷积结构图

Fig. 5 Depth separable convolutional structure diagram

首先,逐层卷积在每个输入通道上独立执行卷积操作,卷积核仅在单个通道的空间维度上滑动提取局部空间特征,不会在通道之间进行融合。然后,

逐点卷积通过 $1 \times 1$ 卷积核对逐层卷积的输出进行处理,该过程按元素对每个空间位置进行线性组合,实现通道间的信息融合。通过将这两个步骤分开执行,深度可分离卷积能够显著减少浮点运算数和参数量,同时保持对图像特征的有效提取能力

##### 1.4.2 Ghost Net

由于边缘计算设备的内存和计算资源有限,在其部署大型深度学习网络模型十分困难。文献<sup>[11]</sup>提出的即插即用 Ghost Net 能够使用更少的参数来生成更多的特征图,有效的利用特征图中的冗余信息,以及成本低廉的线性变换操作产生新的特征映射,在保证精度的同时也能降低模型体积。本文以深度可分离卷积与 Ghost Net 为基础构建 GDWCBR 卷积模块,其结构如图6所示:

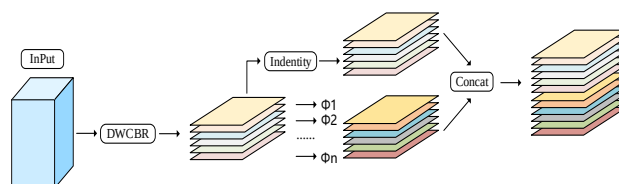


图6 GDWCBR 卷积模块

Fig. 6 GDWCBR convolution module

经过深度可分离卷积后,图像产生了多个特征图。其中,一部分特征图采用恒等映射以保留原始特征,另一部分采用计算量较低的线性变换来生成特征图。将两部分特征图拼接形成GDWCBR卷积轻量化模块的输出特征图。该模块采用了轻量化卷积和线性变换的组合替代原模型常规卷积操作,有效地减少了网络的计算资源消耗,同时保持了模型的性能水平。

C3GDW模块是用GDWBottleneck模块替换原始网络C3模块中的Bottleneck模块, GDWBottleneck模块是由GDWCBR卷积模块组成的瓶颈结构,其结构主要由两个GDWCBR卷积操作组成,结构图如图7所示:

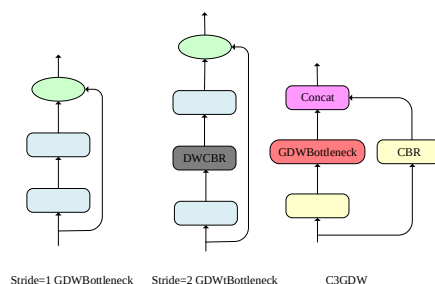


图7 C3GDW模块

Fig. 7 C3GDW module

根据卷积核的步长可以分为两类。当步长为1时,不进行下采样时,直接进行两个GDWCBR卷积操作来扩展输入特征图的通道数;当步长为2时,进行下采样时,多出一个步长为2的深度可分离卷积操作。将原始网络C3模块中的基本Bottleneck模块更改为GDWBottleneck,称为C3GDW模块,用于替换原始主干网络中的C3,使网络结构兼顾检测精度的同时减少网络的参数量与浮点运算数,实现模型的轻量化。

### 1.5 CBAM 注意力机制

在绝缘子缺陷检测中,图像往往会展现复杂的背景和高密度的目标,为了在这种复杂背景下更加准确的关注目标的特征而忽略其他无用的信息,提高故障检测的效率,本文在 YOLOv5 网络结构中加入一个轻量级的卷积注意力模块 CBAM,使模型在复杂的环境下更好的注重绝缘子缺陷部位特征的提取。该注意力模块是一种同时在通道和空间维度上进行应用注意力模块,在不显著增加浮点运算数和参数的前提下能够提升网络模型的特征提取能力。其结构如图 8 所示:

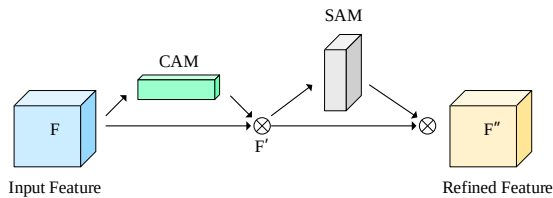


图 8 CBAM 注意力机制

Fig. 8 CBAM attention mechanism

通道和空间的特征提取过程表示如下:

$$F' = M_C(F) \otimes F \quad (4)$$

$$F'' = M_S(F') \otimes F' \quad (5)$$

式中,输入特征图为  $F \in R^{C \times H \times W}$ ;  $M_C \in R^{C \times 1 \times 1}$  为

通道注意力特征图;  $M_S \in R^{1 \times W \times H}$  为空间注意力特征图; C 为通道数; H 和 W 分别为特征图的高度和宽度;  $F''$  为输出特征图;  $\otimes$  表示逐个元素相乘。

### 1.6 改进 YOLOv5 模型

改进的 YOLOv5 模型如图 9 所示,经过数据预处理后的输入图像尺寸被调整为  $640 \times 640$ ,并包含 RGB 三通道的彩色图像。在网络结构中,Focus 通

过切片操作来扩展特征通道数,以提高特征表征能力。在特征提取阶段,一系列的 GDWConv 模块和 C3GDW 模块进行图像特征的有效提取。之后,通过 SimSPPF 模块进行空间金字塔池化,实现对不同大小感受野的特征提取,在 SPP 之前引入 CBAM 注意力机制以动态调整特征图的通道权重和空间信息,从而优化特征提取过程。进入颈部网络后,四组轻量化卷积 GDWConv 模块被用于 Upsample 和 concat 操作,以增加特征图的分辨率,进一步促进特征提取与融合。最终,在输出层生成  $80 \times 80$ 、 $40 \times 40$  和  $20 \times 20$  三个不同分辨率的特征图,这些特征图包含有助于目标检测任务的定位、分类和置信度信息。

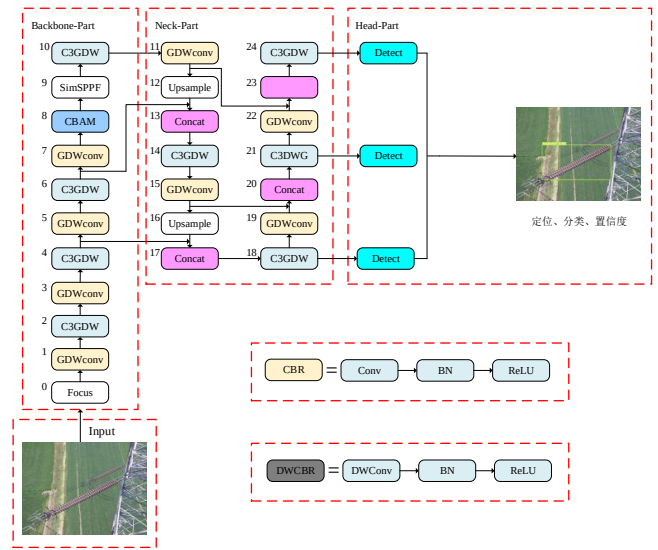


图 9 改进 YOLOv5 网络结构图

Fig. 9 Improvement of YOLOv5 network structure diagram

## 2 实验结果与分析

### 2.1 数据集创建

本文使用的数据集为开源的中国输电线路绝缘子数据集,共有 848 张绝缘子图像,其中正样本数量(无缺陷的绝缘子)为 600 张,负样本数量(有缺陷的绝缘子)为 248 张。通过 Labelimg 工具实现对数据集人工标注,正常绝缘子标注为“insulator”,缺陷绝缘子标注为“defect”。将数据集按照 8: 1: 1 的比例将其随机划分为训练集、验证集和测试集。

### 2.2 训练环境与参数配置

本实验是在 Windows 10 操作平台中,其内存 32GB,显卡型号为 NVIDIA GEFORCE RTX 3080 Ti,处理器为 Intel(R) Core(TM) i9-10850K 3.6GHz,编译语言为 Python3.10, cuda 版本为 11.1,基于 pytorch1.8.0+cu111 的深度学习框架下进行模型的

训练与测试工作。

本实验选用 YOLOv5 作为预训练权重,训练超参数设置如表 1 所示:

表1 超参数设置

Table 1 Hyper Parameter Setting

| 参数名    | 参数值     |
|--------|---------|
| 训练轮数   | 300     |
| 批次大小   | 16      |
| 图片尺寸   | 640×640 |
| Iou阈值  | 0.5     |
| 初始学习率  | 0.01    |
| 学习率动量  | 0.937   |
| 权重衰减系数 | 0.0005  |
| 优化器    | Adam    |

## 2.3 评估指标

本文利用精确率  $P$  (Precision)、召回率  $R$  (Recall)、多个类别平均精度  $mAP$  (mean average precision)、模型权重大小、参数量、浮点运算数六个参考指标对模型性能进行评估<sup>[12]</sup>。精确率是指模型识别出的真正正样本数占所有被识别为正样本的样本数的比例;召回率是指模型识别出的正样本数占真正正样本数的比例。 $PR$  曲线反应了精确率与召回率之间的关系,用来评估分类模型在不同阈值下得性能表现,平均准确率  $AP$  则表示  $PR$  曲线下的面积既单个类别的平均准确率,  $AP$  越大则表示分类器的性能越好,  $mAP$  是指所有类别  $AP$  值得平均值,以此来评价整个目标检测模型的性能。浮点运算数是指模型在执行一次前向传播时所需要

进行的浮点运算次数。参数量是指模型中的可学习参数的数量。模型权重大小是指模型在保存为文件时所占用的存储空间大小

准确率、召回率与  $mAP$  值的表达式如式(6)、式(7)和式(9)所示:

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

式中:  $TP$  表示模型正确地预测了正样本的数量;  $FP$  表示模型错误地预测了负样本为正样本的数量;  $FN$  表示模型错误地预测了正样本为负样本的数量;

$$AP = \int_0^1 P(R) dR \quad (8)$$

$$mAP = \frac{\sum_{n=0}^N AP^k}{N} \quad (9)$$

式中:  $N$ 代表类别数量。

## 2.4 轻量化 YOLOv5 消融实验

为了验证轻量化 YOLOv5 模型的性能提升,在本文数据集上通过消融实验验证其可行性。在 YOLOv5 基础上逐一加入 Ghost Net 网络、深度可分离卷积以及金字塔池化 SimSPPF 模块,以相同的训练策略和实验环境进行消融实验,实验结果如表 2 所示:

表 2 YOLOv5 消融实验对比

Table 2 Comparison of YOLOv5 ablation experiments

| 方案 | Ghost Net | DWConv | SimSPPF(ReLU) | 参数量/个   | 浮点运算数/G | 模型大小/MB | 精确度/% | 召回率/% | 平均精度均值/% |
|----|-----------|--------|---------------|---------|---------|---------|-------|-------|----------|
| 1  | ×         | ×      | ×             | 7015519 | 15.8    | 14.4    | 94.6  | 95.0  | 94.4     |
| 2  | √         | ×      | ×             | 3681767 | 8.1     | 7.8     | 95.6  | 97.1  | 94.9     |
| 3  | √         | √      | ×             | 2902727 | 6.2     | 6.3     | 94.0  | 94.3  | 92.9     |
| 4  | ×         | ×      | √             | 7016287 | 15.8    | 14.4    | 94.7  | 94.8  | 95.1     |
| 5  | √         | √      | √             | 2902727 | 6.2     | 6.3     | 95.1  | 96.0  | 95.1     |

方案 2 在原模型的基础上使用 Ghost 卷积模块和 C3Ghost 模块分别取代原网络中的普通卷积模块和 C3 模块,不但平均精度准值、精确度和召回率略微提升,而且模型的参数量和浮点运算数以及模型大幅降低。方案 3 在其方案 2 基础上引入深度可分离卷积,构建 GDWCBR 和 C3GDW,在损失较小平均精度准值、精确度和召回率的情况下进一步减少模型的计算量、参数量与模型。根据方案 1 和方案 4、方案 3 和方案 5 可知,引入构建 SimSPPF 对模型性能也有一定的提升。综上所述,在原模型在引入 Ghost Net、深度可分离卷积和 SimSPPF 之后其精确度、召回率和平均精度均值分别升高了 0.5、1.0 和 0.7 个百分点,且参数量减少了 58.6%、浮点

运算数 (FLOPs) 减少了 60.8%以及模型文件大小减少了 56.3%。实验结果验证了所提模型的有效性。

## 2.5 注意力机制对比实验

为提高轻量化模型的目标检测性能,在主干网络同一位置中嵌入注意力机制帮助模型聚焦目标信息,以提高特征提取能力。本文在上述轻量化 YOLOv5 模型的基础上分别嵌入 CBAM、CA、SE、SimAM 四种注意力机制,并采用相同的训练策略,以参数量和平均精度均值作为参考指标,对比不同注意力机制对本文轻量化模型性能的影响。其实验结果如表 3 所示:

表3 注意力机制对比实验结果

Table 3 Results of comparative experiments on attentional



mechanisms

| 轻量化<br>YOLOv5 | CBAM | CA | SE | SimAM | 参数量/<br>个 | 平均精度<br>均值/% |
|---------------|------|----|----|-------|-----------|--------------|
| ✓             |      |    |    |       | 2902727   | 95.1         |
| ✓             | ✓    |    |    |       | 2935593   | 98.5         |
| ✓             |      | ✓  |    |       | 2928375   | 95.8         |
| ✓             |      |    | ✓  |       | 2935495   | 94.8         |
| ✓             |      |    |    | ✓     | 2932798   | 97.2         |

从表可以看出,轻量化模型分别加入四种注意力模块对模型的整体参数量影响较小,但嵌入CBAM注意力机制的模型有更好的性能表现,在轻量化模型的基础上平均精度均值提高3.4%。因此本

文最终选用CBAM注意力机制嵌入到轻量化模型的主干特征提取网络中,使模型更好地捕获绝缘子缺陷的特征,提高模型检测精度。该模型参数量仅为2935593,浮点运算数仅为6.4GFLOPs,权重文件仅为6.4MB,但是平均精度均值高达98.5%。

## 2.6 检测结果

为了更加直观对比本文所提模型的性能较原模型的性能提升效果,本文选取测试集小目标、复杂背景、环境昏暗以及模糊4个特殊场景进行检测对比,检测结果如图10所示:

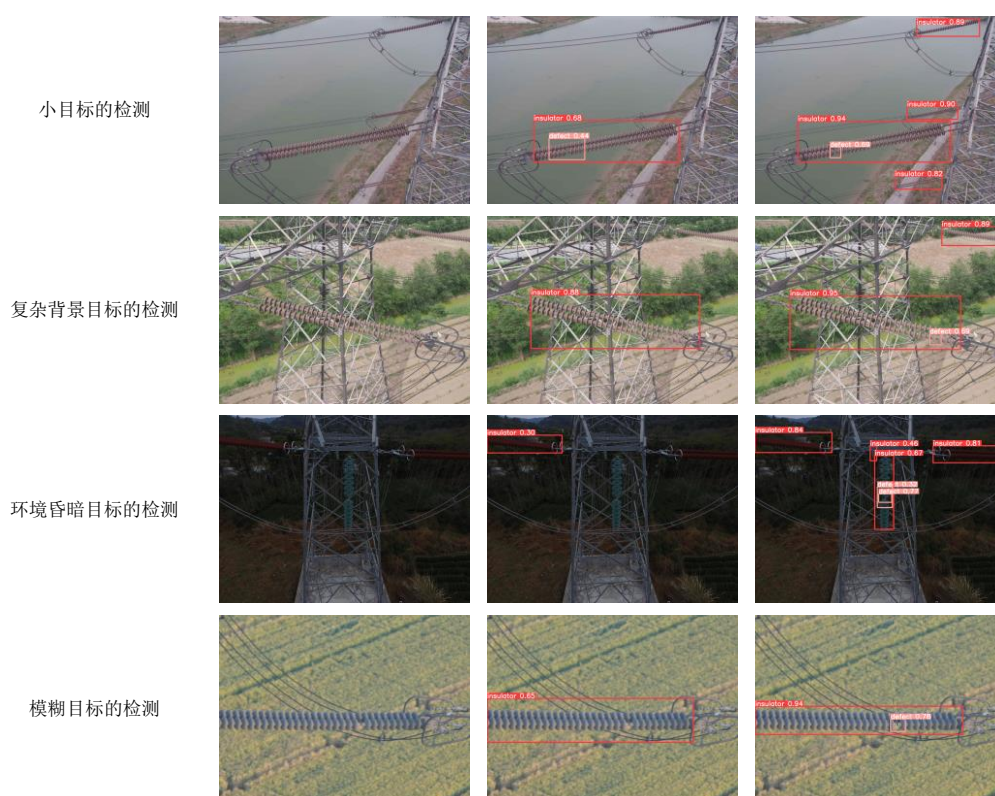


图10 特殊场景实验检测结果对比

Fig. 10 Comparison of experimental test results for special scenes

左边为数据集原图,中间为原模型的检测结果图,右边为轻量化模型的检测结果图。由上图可以看出,本文提出的改进模型较原模型而言,不但可以提高绝缘子检测的置信度,还能在有输电铁塔以及丛林树木的复杂背景下、天气昏暗背景下以及拍摄图像模糊的条件下精确识别原模型漏检的缺陷绝缘子,证实本文所提出的轻量化模型对于特殊场景拥有更好的鲁棒性能,不但能够改善特殊场景下缺陷绝缘子漏检的问题,还能提升绝缘子缺陷检测的置信度。

## 3 结论

本文提出了一种基于Ghost Net和深度可分离卷积的YOLOv5轻量化绝缘子缺失检测模型。为了

弥补主干网络轻量化所带来的精度损失,在Backbone部分融合了轻量级CBAM注意力模块。实验结果表明,本文所提模型很好地解决了现有绝缘子故障检测模型存在的计算量大、特殊背景下绝缘子漏检和误检的问题;在提高检测精度的情况下,极大降低了计算量和复杂度,使得该模型更适用于边缘计算设备的部署,后续将研究如何将模型部署至边缘计算设备上,实现实际工作场景的实时缺陷检测。

## 参考文献

- [1] 高春阳. 基于GA-PSO算法的电力平台无功优化研究[D]. 陕西理工大学, 2024.
- [2] WANG J F, LIANG X D, GAO Y F. Failure analysis of decay-like fracture of composite insulator[J]. IEEE Transactions on Dielectrics

and Electrical Insulation, 2014, 21(6): 2503-2511.

- [3] 王芷诺. 基于深度学习技术的电力线路故障预测与诊断研究[J]. 电气技术与经济, 2023(09):322-324.
- [4] 陈景文, 周鑫, 张蓉, 等. 基于U-net网络的航拍绝缘子检测[J]. 陕西科技大学学报, 2018, 36(04):153-157.
- [5] 张青华, 李彩林, 孙延坤, 等. 基于深度学习的绝缘子精确识别[J]. 电瓷避雷器, 2022(01):143-150.
- [6] 邬开俊, 徐泽浩, 单宏全. 基于FasterNet和YOLOv5改进的玻璃绝缘子自爆缺陷快速检测方法[J/OL]. 高电压技术:1-11[2024-05-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231022>.
- [7] 王韵琳, 冯天波, 孙宁, 等. 融合注意力与多尺度特征的电力绝缘子缺陷检测方法[J/OL]. 高电压技术:1-11[2024-05-21].
- [8] 王道累, 张正刚, 张世恒, 等. 基于密集连接网络的航拍绝缘子旋转目标精准定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(01):35-43. 2.
- [9] 邱博, 刘翔, 石蕴玉, 等. 一种轻量化的多目标实时检测模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(09):1778-1785.
- [10] 陈禹, 吴雪梅, 张珍等. 基于改进YOLOv5的自然环境下茶叶病害识别方法[J/OL]. 农业工程学报, 1-10[2024-01-22].
- [11] HAN K, WANG Y, TIAN Q, et al. Ghostnet: more features from cheap operations[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle, WA, USA: IEEE, 2020:1580-1589.
- [12] 郭晓静, 隋昊达. 改进YOLOv3在机场跑道异物目标检测中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(8): 249-255.



宿雲龙

收稿日期:

作者简介:

宿雲龙(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备智能图像检测研究, E-mail: [1834925732@qq.com](mailto:1834925732@qq.com)

李鹏(1987), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为模式识别和计算机视觉, 智能信息处理算法及应用等, E-mail: [lipeng@upc.edu.cn](mailto:lipeng@upc.edu.cn)



文章编号: 中图分类号: 文献标志码: 学科代码:

# 特高压直流系统变压器空载合闸引发换相失败评估方法

陈宇翔<sup>1</sup>

(1., 安徽 合肥 230009)

## Evaluation method for commutation failure caused by no-load closing of transformer in UHVDC system

CHEN Yuxiang<sup>1</sup>

(1. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** In the ultra-high voltage direct current (UHVDC) system, improper closing of the converter valve can result in a high amplitude excitation surge flow injected into the AC system, which can easily lead to continuous phase-shift failures. In response to this problem, this paper combines the characteristics of excitation surge flow, analyzes its impact on the phase-shifting process, and studies the evaluation method of excitation surge flow on phase-shifting failure. Firstly, based on the principle of phase-shifting area, the impact of excitation surge flow on the phase-shifting process is analyzed, and the corresponding impact indicators are provided. Secondly, the change characteristics of various indicators under different degrees of excitation surge flow severity are quantitatively analyzed, pointing out the dominant factors causing the first phase-shifting failure due to excitation surge flow. Finally, based on the critical value of phase-shifting area margin, the effectiveness of the proposed evaluation indicators is verified.

**KEY WORDS:** UHVDC; phase-shifting failure; excitation surge flow; evaluation method

**摘要:** 特高压直流系统中, 换流变合闸不当造成的高幅值励磁涌流注入交流系统后, 易导致连续换相失败的发生。针对这一问题, 本文结合励磁涌流特性, 分析励磁涌流对换相过程的影响, 研究励磁涌流对换相失败的评估方法。首先, 基于换相面积原理, 分析了励磁涌流对换相过程的影响, 给出了相应的影响指标; 其次, 定量分析了不同励磁涌流严重程度下各指标的变化特性, 指出了励磁涌流造成首次换相失败的主导因素; 最后, 基于换相面积裕度临界值, 验证了所提评估指标的有效性。

**关键词:** 特高压直流输电; 换相失败; 励磁涌流; 评估方法

**DOI:**

0 引言

为增强西北等地区新能源电力消纳能力、调节我国能源与负荷分配不均等问题, 基于电网换相换流器的高压直流输电系统已成为现阶段研究热点。该系统均采用无自关断能力的晶闸管作为换流元件, 会受电网电压等因素影响发生换相失败, 增加了华东和华南电网的多馈入直流输电系统级联换相失败的风险。

而换流变合闸励磁涌流中含有高幅值多次谐波, 冲击换流母线后会影响到换相电压波形质量, 进而影响在运换流器的运行状态。若励磁涌流过高, 会导致受端电压下降、直流电流短时骤增、交直流系统不稳定运行等后果。换流器换相失败的根本原因在于关断角过小, 不足以恢复正向阻断能力<sup>[1]</sup>。众多学者纷纷从换相失败机理、判别方式、预防抑制等角度展开研究, 而绝大多数换相失败研究成果是以交流系统故障造成换相电压幅值降低为切入点, 关于换相电压畸变引发换相失败的研究较少<sup>[2]</sup>。

引起换流母线电压畸变的工况包括交流系统故障、换流变合闸励磁涌流、直流偏磁等, 直流偏磁的作用机理是直流分量造成铁芯饱和, 本质上与换流变合闸不当引发的励磁涌流一致<sup>[3]</sup>。文献<sup>[4]</sup>分析了华东电网练塘站主变合闸励磁涌流导致林枫直流双极闭锁事故原因, 给出了优化直流系统控保建议。文献<sup>[5]</sup>通过研究锡泰直流工程单阀组充电造成的同极换流器换相失败, 提出一种结合谐波次数、相角和幅值的计算方法, 抑制谐波引起的换相失败。文献<sup>[6]</sup>并未详细分析励磁涌流对换相过程的影响机理。文献<sup>[7]</sup>基于换相面积判定换相失败原

理,分析了各次谐波电压对换相过程的影响。文献[8]认为谐波引起的基波电压幅值降低和过零点偏移是引起换相失败的主导因素。文献[9]通过连续仿真分析发现过零点偏移对换相失败的影响不大,其根本原因在于谐波含量和直流分量。文献[10]认为故障较弱时,低次谐波造成的换相电压畸变会显著增加换相失败的风险。

由以上畸变对于换相过程的影响分析可知,在不同工况下,电压幅值、过零点偏移、谐波电压含量、谐波次数等因素对换相过程的影响各不相同。目前研究认为导致换相失败的换流母线电压畸变主要由交流系统故障引起,部分针对励磁涌流的分析,其谐波电压含量还是直接已知,并不来源于换流变合闸不当,相关研究文献较少。因此,详细分析换流变合闸励磁涌流引发的换相失败,结合主要影响因素提出励磁涌流对换相失败的评估方法,对指导换相失败抑制措施的使用和提高换流站运维水平具有重要价值。

基于此,本文结合励磁涌流特性,分析励磁涌流对换相过程的影响,研究励磁涌流对换相失败的评估方法。首先,基于换相面积原理,分析了励磁涌流对换相过程的影响,给出了相应影响指标;其次,定量分析了不同励磁涌流严重程度下各指标的变化特性,指出了励磁涌流造成首次换相失败的主导因素;最后,基于换相面积裕度临界值,验证了所提评估指标的有效性。

## 1 换相失败基本原理

### 1.1 分层接入特高压直流系统

直流输电工程中广泛使用晶闸管作为换流元件,其导通条件为:阳极电压高于阴极电压且对门极施加瞬时或持续的触发脉冲;关断条件为:阴极电压高于阳极电压一段时间使得载流子复位,阀电流降为零。在直流输电系统中,换流器的基本组成单元是三相全波桥式电路,其等效电路如图1所示。

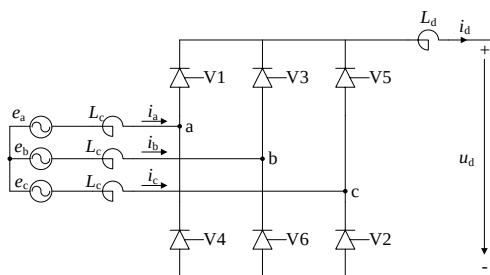


图1 合闸等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of the closing operation

受端分层接入系统是在两端直流输电系统基

础之上,受端换流器经过换流变后分别接入不同的等级电压得到的,具体结构如图2所示。在受端换流站一般将经过换流变压器与500kV系统相联的换流装置,称为高端换流器;将经过换流变压器与1000kV系统相联系的换流装置,称为低端换流器。在这种分层接入下,受端交流电网两个之间存在一个耦合阻抗,导致受端1000kV与500kV之间存在一定的耦合关系。

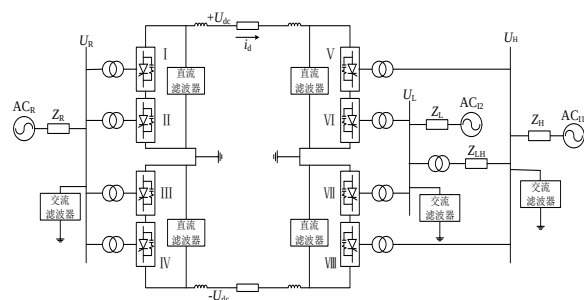


图2 特高压直流输电系统拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of ultra-high voltage direct current transmission system

### 1.2 换相失败机理

在换相过程中,由于系统等效电感存在,导致电流不能发生突变,换相存在一个过程。考虑逆变侧的相关情况,电流转移过程可以看成是电流转移时间和熄弧时间的叠加。电流转移的时间对应角度称为转移角,具体物理意义为电流从一个换流阀转换到另一个换流阀的时间。熄弧时间对应角度为熄弧角,具体物理意义为关断晶闸管上载流子发生复合过程,换流阀在反压作用下关断时间。两个桥臂之间换相结束后,刚退出导通的阀在反向电压作用的时间内如果未能恢复阻断能力,或者在反向电压期间换相过程未能进行完毕,这两种情况在阀电压转变正向时被换相的阀都将向原来预定退出导通的阀倒换相,称为换相失败。当熄弧角小于  $60^\circ$  时,如果发生  $VT1$  向  $VT3$  换相,此时  $VT1, VT2$  和  $VT3$  同时处于导通运行的状态,具体等效电路图如图3所示:

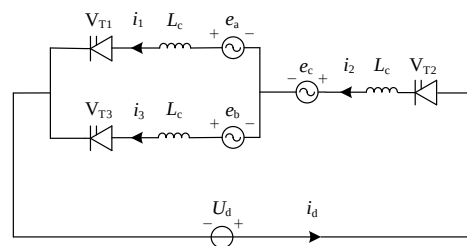


图3 换相过程等值电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of the commutation process

对于阀 VT1 和 VT3 的回路, 由基尔霍夫电压定律可以得到公式 1 和 2:

$$L_c \frac{di_1}{dt} - e_a + e_c + L_c \frac{di_2}{dt} = U_d \quad (1)$$

$$L_c \frac{di_2}{dt} - e_b + e_c + L_c \frac{di_3}{dt} = U_d \quad (2)$$

将式 1, 2 进行联立, 可以得到公式 3:

$$\int_{\frac{\pi}{3}-\beta}^{\frac{\pi}{3}-\gamma} \left( \frac{di_3}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) dt = \frac{\sqrt{2}U}{L_c} \int_{\frac{\pi}{3}-\beta}^{\frac{\pi}{3}-\gamma} \sin(\omega t) dt \quad (3)$$

VT3 完全导通时, 流过的电流为  $I_d$ , 计算积分, 可以得到关断角表达式如下:

$$\gamma = \arccos \left( \frac{\sqrt{2}I_d \omega L_c}{U} + \cos \beta \right) \quad (4)$$

在上式中,  $U$  代表物理含义为受端的交流系统电压线电压有效值。通过式子我们可以看出关断角与直流电流、交流侧线电压、触发角、换相电感有关。当  $U$  发生故障减小, 就会导致关断角减小。在工程实际中, 为了保证换流阀正常换相的关断时间为  $400 \mu s$  左右, 相应地在工程之中定义极限关断角为  $7^\circ$ 。如果关断角小于  $7^\circ$ , 就可以将换流阀视为发生换相失败, 这就是通过最小关断角判断系统发生换相失败的理论依据。

### 1.3 最小关断面积

交流系统与等效电容电压差值如公式 (5) 所示。换相过程的物理本质是电感中储存的能量从一个阀臂电感转移到另外一个阀臂电感的过程。叠弧面积需求量物理本质为换相电压在电感中建立起磁链, 叠弧面积提供量物理本质为建立起磁链的换相电压累积量。由此, 可以将换相面积分为两部分: 叠弧面积和关断面积。叠弧面积物理意义为等效电感建立起磁链, 促使电流发生转移; 关断面积物理意义为当晶闸管上的电流过零之后, 晶闸管在反向电压的作用下, 发生去游离过程, 使得晶闸管重新恢复关断状态过程。由于换相过程受到交流电压和直流控制系统的提前触发量限制, 我们可以认为叠弧面积与关断面积的和是一个固定的值。在叠弧过程中,  $i_1$  逐渐减小至 0,  $i_3$  逐渐增大至  $i_d$ , 可得:

$$\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\delta}{\omega}} \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) dt = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\delta}{\omega}} (2L_c \frac{di_3}{dt} - L_c \frac{di_1}{dt}) dt \quad (5)$$

受端换流器发生换相失败时, 不能理想化认为直流电流 保持不变, 则式(5)化简为

$$\frac{\sqrt{2}U_L}{\omega} (\cos \alpha - \cos \delta) = L_c \left[ i_d \left( \frac{\delta}{\omega} \right) + i_d \left( \frac{\alpha}{\omega} \right) \right] \quad (6)$$

式(6)左边为换相电压提供的换相电压-时间积分面积, 用  $S_\mu$  表示, 与换相电压和阀运行角度有关。式(6)右边为正常换相需求量, 用  $S_{\mu\text{-need}}$  表示, 与换相电感  $L_c$  和直流电流  $i_d$  有关。

换相积分面积  $S_\mu$  与关断积分面积  $S_\gamma$  之和称为换相总面积  $S_{\mu+\gamma}$ , 假设换相总面积保持一定, 则关断面积  $S_\gamma$  为:

$$S_\gamma = \int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\delta}{\omega}} \sqrt{2}U_L \sin(\omega t) dt - L_c \left[ i_d \left( \frac{\delta}{\omega} \right) + i_d \left( \frac{\alpha}{\omega} \right) \right] \quad (7)$$

由式(6)可知, 换相电压、触发延迟角、换相电感和直流电流都能影响换流阀的正常关断。

换相电压幅值因交流侧故障而下降, 为保证换流阀正常换相, 换相积分面积  $S_\mu$  向右推移, 即叠弧角  $\mu$  增大, 关断积分面积  $S_\gamma$  减小, 即关断角  $\gamma$  减小, 易小于阀组恢复正向阻断能力所需的临界关断角  $\gamma_{\min}$ , 从而发生换相失败。因此, 为保证换相成功, 应使阀组的实际关断面积  $S_\gamma$  不小于最小关断面积。

## 2 励磁涌流换相失败评估方法

HVDC 系统三阀组在运单阀组充电试验过程中易发生换相失败, 故障具体表述如下: 如图 2.1 所示,  $\pm 1100kV$  分层接入 UHVDC 系统换流器 V 所连换流变合闸充电后, 与之相对应的极 II 高端换流器 VIII 发生换相失败。

由换相失败机理分析可知, 受端电网故障引起的基波电压幅值下降和波形畸变会诱发换流器换相失败。而换流变合闸产生的励磁涌流中含有很大的谐波分量 (主要是低次谐波), 会导致相连的换相电压发生严重畸变, 必然对相关换流器正常换相过程产生影响。励磁涌流对换流器换相失败的影响分析如下:

换相电压受励磁涌流影响后的线电压可表示为:

$$U_{ab} = E_1 \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^N E_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (8)$$

$S_{\mu 1}$  为基波电压时间积分面积。换相电压畸变越严重, 换流器叠弧过程越长, 关断角裕度越小, 因此为避免换相失败, 谐波换相面积之和应尽可能小, 降低对基波电压的影响程度。第  $n$  次谐波换相面积为:

$$S_{\mu n} = \frac{E_n (\cos(n\alpha + \varphi_n) - \cos(n\pi - n\gamma + \varphi_n))}{n\omega} \quad (9)$$

式(9)可化简为:

$$S_{\mu n} = A_n \sin(\theta_n - \varphi_n) = \frac{2E_n}{n\omega} \sin\left(\frac{n\mu}{2}\right) \sin(\theta_n - \varphi_n) \quad (10)$$

为量化第  $n$  次谐波电压对换流器换相过程的影响, 设置谐波影响因子  $F_n$ , 即:

$$F_n = \frac{S_{\mu n}}{S_{\mu 1}} = \frac{A_n}{A_1} = \left| \frac{E_n \sin(\frac{n\mu}{2})}{nE_1 \sin(\frac{\mu}{2})} \right| \times 100\% \quad (11)$$

式中, 谐波电压与基波电压幅值的比值通常可用有效值之比代替。 $F_n$  越大, 表示第  $n$  次谐波对基波电压换相面积影响越大, 越容易发生换相失败。综上所述, 可用  $n$  次谐波影响因子之和表征励磁涌流产生的谐波对换相过程的影响, 令  $n$  次谐波影响因子之和为励磁涌流总谐波畸变影响指标 ICTHD, 即:

$$ICTHD = \sum_{n=2}^N \frac{A_n}{A_1} \quad (12)$$

## 2.1 励磁涌流谐波分析

逆变侧极 I 高端换流变正常运行时, 无励磁涌流产生, 对 500kV 换流母线电压进行傅里叶分析, 各次谐波电压有效值如图 5.2(a)所示。逆变侧高端换流变合闸充电时, Y 桥换流变 A、B、C 三相励磁涌流分别对应为 -8.547kA、-9.222kA、4.834kA, D 桥换流变 A、B、C 三相励磁涌流分别对应为 -9.064kA、-4.365kA、10.925kA, 500kV 换相电压经傅里叶分析后的各次谐波电压有效值如图 5.2(b)所示。由图 5.2(a)可知, 正常运行时, 前 15 次谐波中 11、13 次谐波电压相较于其他次较高, 分别为 0.779kV 和 0.914kV, 但相较于基波电压 535kV, 正常运行时各次谐波电压含量明显偏低。由图 5.2(b)可知, 高峰值的励磁涌流注入交流系统后, 各次谐波电压与正常运行相比明显升高, 低次谐波电压较高次谐波涨幅明显, 其中, 2、3、4、5、6 次谐波电压已跃至 95.733kV、44.689kV、56.580kV、21.495kV、11.990kV, 7 次以上谐波电压大致相同。极 I 高端换流变正常运行和产生励磁涌流时, 与其连接至同一 500kV 换流母线的换流器 VIII 关断角如图 5.3 所示, 大量谐波注入交流系统, 造成换相电压畸变, 在运换流器发生换相失败。考虑到低次谐波电压对换相过程影响更大, 本文主要统计 2-7 次谐波对换相过程的影响。

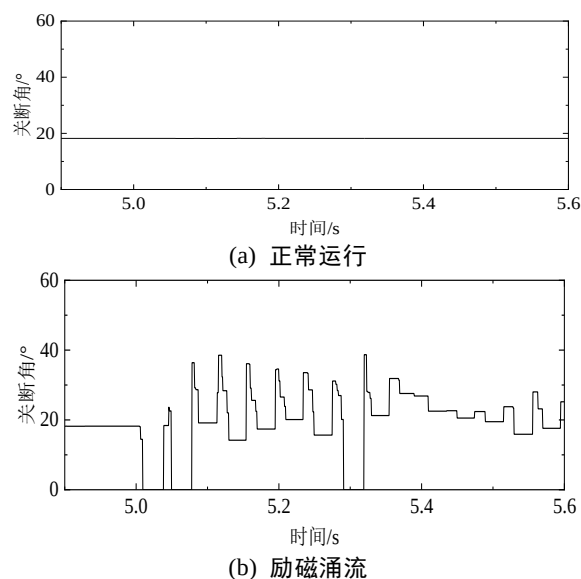


图 4 高端换流器 VIII 关断角

Fig. 4 Extinction angle of high-end converter VIII

## 2.2 励磁涌流引发换相失败的主导因素分析

为充分研究励磁涌流对换相失败的影响, 分析励磁涌流造成换相失败的主导因素, 进行了极 I 高端换流变不同励磁涌流严重程度下的仿真, 极 I 高端换流变不同程度励磁涌流如表 5.2 所示, 励磁涌流严重程度依次增加, 所得相关指标结果如表 5.3 所示。图 5.4 给出了不同励磁涌流严重程度下换流母线电压实时 ICTHD 和极 II 高端换流器关断角, ICTHD 的纵坐标为小数形式。励磁涌流总谐波畸变影响指标 ICTHD 为 2-7 次谐波影响因子之和, ICTHD 和  $\Delta U$  取实时变化最大值。计算过程中,  $\alpha$  取  $143^\circ$ ,  $\gamma$  取满足换流阀成功换相所需的最小关断角  $7^\circ$ 。

表 1 不同励磁涌流严重程度下相关指标

Tab 1 Relevant indexes under different inrush current severities

| 组号 | ICTHD/% | $\Delta U$ /% | 换相失败 |
|----|---------|---------------|------|
| 1  | 0.9205  | 0.0859        | 否    |
| 2  | 1.6268  | 0.3007        | 否    |
| 3  | 11.7034 | 2.6299        | 否    |
| 4  | 32.2839 | 6.7527        | 是    |
| 5  | 33.6348 | 8.3796        | 是    |
| 6  | 32.8932 | 10.4400       | 是    |
| 7  | 30.8826 | 11.5888       | 是    |

由表可知, 换流变合闸励磁涌流峰值越大, 越容易引发换流器换相失败。电压下降率随励磁涌流的增加而增加, 而对于总谐波畸变影响指标, 随着励磁涌流的增加, ICTHD 先增大, 后保持波动稳定。由仿真组号 3、4 可知, 一旦发生首次换相失败, ICTHD 和  $\Delta U$  都提高, 但 ICTHD 增幅明显,  $\Delta U$  变化不明显。因此, 对于换流变合闸励磁涌流引发的首次换相失败, 低次谐波电压含量骤增是换相失败

发生的主要原因。对于换流器首次换相失败后,  $ICTHD$  变化不大,  $\Delta U$  持续增大, 换流器关断角震荡加剧, 换相情况更加恶劣, 以至于发生后续换相失败。

换流器恢复正向阻断能力所需的最小关断角  $\gamma_{\min}=7^\circ$ , 正常运行时,  $\gamma=17^\circ$ , 换流器完成叠弧过程所需的换相积分面积为:

$$S_{\mu 1}=\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi-\gamma}{\omega}} E_1 \sin (\omega t) d t=\frac{0.1577 E_1}{\omega} \quad (13)$$

励磁涌流造成换流母线电压畸变时, 换流器换相成功的极限情况下的换相面积为:

$$S_{\mu 1 \max }=\int_{\frac{\alpha}{\omega}}^{\frac{\pi-\gamma_{\min }}{\omega}} E_1 \sin (\omega t) d t=\frac{0.1939 E_1}{\omega} \quad (14)$$

因此, 在励磁涌流导致的换相电压畸变影响下, 换流器换相成功时的换相电压积分面积裕度为:

$$M=\left|\frac{S_{\mu 1 \max }-S_{\mu 1}}{S_{\mu 1}}\right| \times 100 \%=22.9550 \% \quad (15)$$

由于谐波电压含量是励磁涌流导致首次换相失败的主要原因, 由式 9 可知, 当  $ICTHD$  大于换相面积裕度时, 换流器存在发生换相失败的可能。

## 2.4 评估指标有效性验证

为充分验证励磁涌流对换相失败评估指标有效性, 给出了不同励磁涌流严重程度下各次谐波电压影响因子, 如表 2 所示。

表 2 不同励磁涌流严重程度下各次谐波电压影响因子  
Tab 2 Influence factors of harmonic voltage under different inrush current severities

| 组号 | F2/%    | F3/%    | F4/%    | F5/%   | F6/%   | F7/%    |
|----|---------|---------|---------|--------|--------|---------|
| 1  | 0.4438  | 0.2089  | 0.1112  | 0.1002 | 0.0291 | 0.0273  |
| 2  | 0.5293  | 0.2817  | 0.4880  | 0.2770 | 0.0280 | 0.00228 |
| 3  | 2.7227  | 2.6300  | 3.8878  | 1.6683 | 0.4485 | 0.3461  |
| 4  | 8.6131  | 8.9963  | 10.8369 | 2.5093 | 0.8541 | 0.4742  |
| 5  | 11.6956 | 9.5149  | 10.3998 | 1.1585 | 0.5686 | 0.2974  |
| 6  | 12.9001 | 10.7093 | 6.7912  | 1.3494 | 0.6292 | 0.5140  |
| 7  | 11.5245 | 9.7315  | 5.3595  | 1.9476 | 1.4399 | 0.8796  |

由表 2 可知, 随着励磁涌流严重程度增长, 各次谐波电压影响因子升高, 谐波电压对换流器换相过程的影响愈发恶劣。换相失败发生后, 2、3、4 次谐波电压影响因子较 5、6、7 次谐波涨幅明显, 7 组仿真实验中, 2、3、4 次谐波电压影响因子之和占  $ICTHD$  的比例分别为 83.0%、79.9%、79.0%、88.1%、94.0%、92.4%、86.2%, 是励磁涌流注入换流母线中的主要谐波, 也与换相失败故障发生密切相关。仿真组号 1、2、3 的  $ICTHD$  均小于换相成功时的换相面积裕度 22.9550%, 与实际未发生换相

失败的结果相符, 仿真组号 4、5、6、7 的  $ICTHD$  均大于换相成功时的换相面积裕度 22.9550%, 与实际发生换相失败的结果相符, 验证了所提励磁涌流总谐波畸变影响指标  $ICTHD$  评估换相失败的有效性。

## 3 结论

本文以励磁涌流换相失败为评估标准, 提出了一种基于谐波畸变的励磁涌流换相失败评估方法, 对于励磁涌流诱发的换相失败评估的快速判定有知道意义, 文章结论如下:

(1) 换流变合闸励磁涌流峰值越大, 更容易引发换流器换相失败。电压下降率  $\Delta U$  随励磁涌流的增加而增加, 而对于励磁涌流总谐波畸变影响指标, 随着励磁涌流的增加,  $ICTHD$  先增大, 后保持波动稳定。

(2) 对于换流变合闸励磁涌流引发的换相失败, 低次谐波电压含量骤增是首次换相失败发生的主要原因; 换流母线电压持续下降易造成换流器关断角震荡, 换相情况愈发恶劣, 是引发后续换相失败的主要原因。

## 参考文献

- [1] 陈忠, 张冬怡, 李晓华, 等. 双断口断路器均压电容对换流变励磁涌流的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3412-3418.
- [2] 李春艳, 周念成, 王强钢, 等. 基于软启动的变压器励磁涌流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3640-3651.
- [3] 王泽忠, 刘恪, 李明洋, 等. 特高压变压器直流偏磁“三变”联合仿真分析[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4097-4105.
- [4] YAHIOU A, BAYADI A, BABES B. Modified method for transformer magnetizing characteristic computation and point-on-wave control switching for inrush current mitigation[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2019, 47(10): 1664-1679.
- [5] 方春恩, 曾俊龙, 陈川江, 等. 基于三相联动断路器的空载变压器选相关合[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 898-905.
- [6] FANG S H, NI H M, LIN H Y, et al. A novel strategy for reducing inrush current of three-phase transformer considering residual flux[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4442-4451.
- [7] 于姜赞, 张美霞, 杨秀, 等. 合空变涌流谐波对直流系统换相失败的影响及分析方法[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 181-184+180.
- [8] 沃建栋, 郑涛, 万磊, 等. 基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 32-36.
- [9] 刘涛, 颜廷武, 卜新良, 等. 基于合闸电阻的变压器励磁涌流相控技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 109-114.
- [10] NI H M, FANG S H, LIN H Y. A simplified phase-controlled switching strategy for inrush current reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 215-222.



陈宇翔

收稿日期:

作者简介:

陈宇翔(2000 年), 男, 硕士研究生, 研究方向为特高压直流输电建模, E-mail: cyxfut326@163.com;



# 一起换流变阀侧套管异常原因分析及提升建议

张国栋

(国网青海省电力公司超高压公司, 青海西宁 810008)

**摘要:** 换流变压器是超高压直流输电工程中至关重要的关键设备, 是交、直流输电系统中的整流、逆变两端接口的核心设备, 它的投入和安全运行是工程取得发电效益的关键和重要保证。换流变阀侧套管在正常运行时, 绝缘系统内积累的空间电荷影响了套管内部电场, 使套管内部电场分布不均匀, 随着电压等级的提高和运行时间的增长, 局部电场由于空间电荷的影响越来越集中, 可能会发生击穿放电和闪络, 造成套管绝缘系统的损坏, 严重时可能发生套管自燃甚至爆炸, 还有可能使换流变其他设备发生爆炸造成系统瘫痪, 最终导致停电。

**关键词:** 换流变压器; 阀侧套管; 原因分析; 提升建议

## 0 前言

某换流站运行人员日比对发现极 I 低 Y/D-A 相换流变阀侧首端套管电压从 86.7kV 升高至 91.0kV, 停电测试套管电容量与出厂值相比偏大 4.32%, 通过阀侧电压和电容量变化率初步判断套管一层电容屏发生击穿。为进一步查明异常原因, 通过 X 射线成像、相控阵超声、CT 成像技术定位异常在末屏极板端部距离套管阀厅侧汇流环上部约 60mm 处。解体检查发现末屏端部铝箔搭接部位存在约 18mm 错位, 错位处与次外屏间存在放电引起的黑色孔洞, 位置、尺寸、形貌与成像检测结果一致。分析认为该套管整体绝缘裕度较小, 且生产工艺控制不到位, 末屏电容屏搭接错位导致电场畸变, 进一步在换相失败等工况导致的过电压作用下, 末屏端部位置发生放电并导致与次外屏击穿。

## 1 设备基本机构

异常套管为胶浸纸干式绝缘结构, 主要由导电杆、电容芯子、末屏分压器、复合绝缘子、均压环、汇流环等组成, 芯体为环氧树脂浸渍绝缘纸材质, 电容芯子与复合绝缘子之间填充发泡聚氨酯。套管结构如图 1 所示。

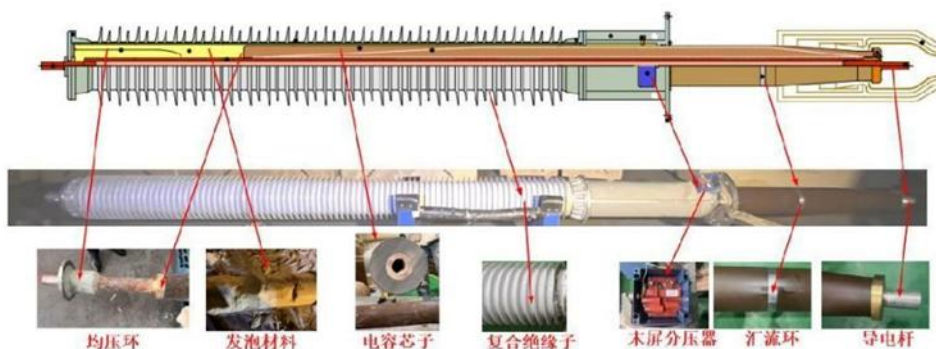


图 1 套管外形及结构图

电容芯子是由多层铝箔、绝缘纸卷制而成, 如图 2 所示。电容芯子共有 27 层铝箔, 最内层铝箔与导电管等电位连接, 铝箔为电容的极板即电容屏, 绝缘纸为电容的绝缘介质, 电容芯子内有 26 只电容串联。电容芯子是两端为锥形、中间为圆柱的橄榄形结构, 电容屏从内至外, 直径依次增大, 长度依次减小, 以保证各电容单元电容量及电压分布的一致性。导电管处电位最高, 最外层铝箔片(末屏)接地。每只电容电容量约为 36140pF, 套管整体电容量为 1390pF。



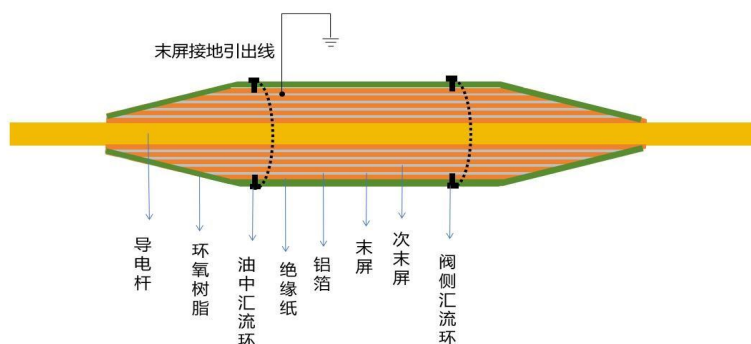
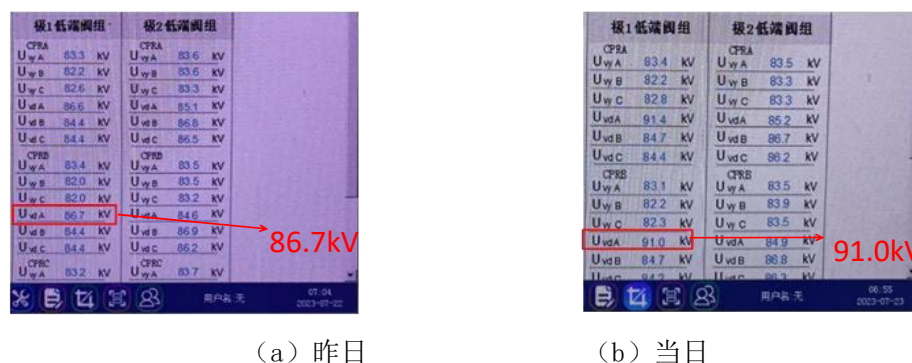


图2 电容芯子结构图

在电容芯子的阀厅侧和油中侧分别设置一处汇流环，汇流环铜带裸露在电容芯子外，汇流环在电容芯子内部通过镀锡铜带与末屏连接，起到泄放电荷和钳制电位的作用。

## 2 套管检查原因分析

运行人员发现极 I 低 Y/D-A 相换流变首端阀侧套管电压升高至 91.0kV，较前日 86.7kV 升高了 4.3kV，其他阀侧套管电压无明显增长，如图 3 所示。



(a) 昨日

(b) 当日

图3 阀侧套管电压截屏

### 2.1 介损电容量测试分析

停电检修测量套管介质损耗因数及电容量，电容量为 1450pC，与出厂值相比偏大 4.32%。同时，测量末屏分压器电容值、套管测量回路电缆绝缘无异常，排除末屏接线板和二次回路异常，通过电容量变化率初步判断有一层电容屏发生了击穿。

表2 现场开展套管介损电容量测试数据

| 套管 | tan δ (%) |       |       |           | Cx (pF) |      |      |           |
|----|-----------|-------|-------|-----------|---------|------|------|-----------|
|    | 出厂值       | 前次值   | 本次值   | 与出厂值偏差(%) | 出厂值     | 前次值  | 本次值  | 与出厂值偏差(%) |
| 首端 | 0.310     | 0.311 | 0.267 | -0.14     | 1390    | 1373 | 1450 | 4.32      |
| 末端 | 0.310     | 0.306 | 0.332 | 0.07      | 1410    | 1392 | 1397 | -0.92     |

### 2.2 频域介电谱测试分析

现场对更换下来的套管及备品套管开展频域介电谱测试，测试仪器为 MeggerIDAX300 和慧宁普测 FDS-1000，在 0.01Hz~1kHz 频率范围内套管电容量均较备品套管电容量偏大，介损未有明显差异，表明套管受潮可能性小。如图 5、图 6 所示。

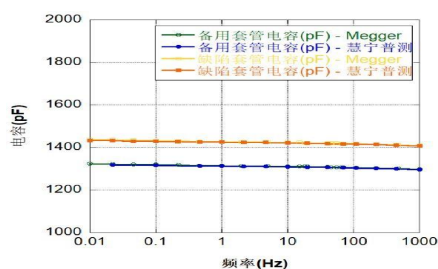


图5 电容量随频率变化曲线

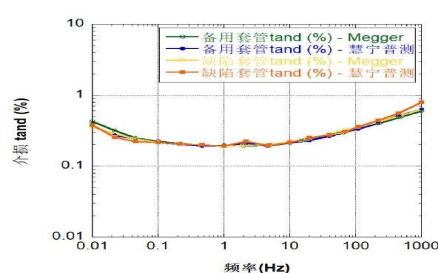


图6 介损随频率变化曲线

## 2.3 返厂试验情况分析

2.3.1 环境温度下介质损耗因数 ( $\tan \delta$ ) 及电容量测量环境温度下介质损耗因数 ( $\tan \delta$ ) 及电容量测量, 在升压、降压过程中介损 ( $\tan \delta$ ) 无明显变化, 电容量无变化, 较出厂值偏大 5.40%。

表3 厂内开展套管介损电容量测试数据

| 阶段 | 测试项目              | 施加电压 (kV) |       |       |       |       |       | 与出厂值比较误差 |
|----|-------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
|    |                   | 10        | 65    | 104   | 137   | 157   | 180   |          |
| 升压 | $\tan \delta$ (%) | 0.310     | 0.311 | 0.311 | 0.311 | 0.311 | 0.311 | /        |
|    | Cx (pF)           | 1465      | 1465  | 1465  | 1465  | 1465  | 1465  | 5.40%    |
| 降压 | $\tan \delta$ (%) | 0.311     | 0.311 | 0.311 | 0.311 | 0.311 | 0.311 | /        |
|    | Cx (pF)           | 1465      | 1465  | 1465  | 1465  | 1465  | 1465  | 5.40%    |

## 2.3.2 局部放电测量

套管局部放电测量, 在  $U_m$  和  $1.5U_m/\sqrt{3}$  电压下, 局放量超过标准要求的 10pC, 且在长时耐压带局部放电测量试验过程中频繁出现大于 300pC 的放电脉冲, 如图 7 所示。

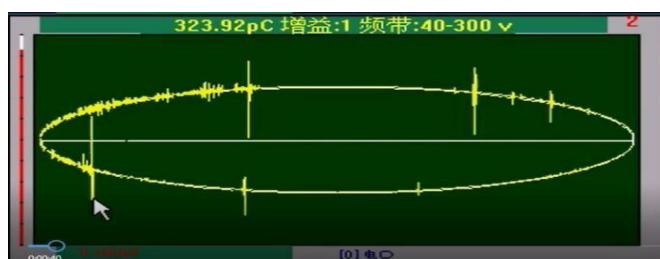


图7 局部放电测量图谱

## 2.4 解体检查分析

### 2.4.1 分段电容屏检测

对套管电容芯子进行切割, 分段测量电容屏间的通断性和电容量, 测量发现第 1 层铝箔 (末屏) 与第 2 层铝箔 (次外屏) 之间电阻值为  $15.2\Omega$  (测量显示值见图 8)、电容量为  $0.05nF$  (测试显示值见图 9), 存在导通情况, 其他屏间无异常。通过分段电容屏间通断和电容量测量, 判断异常点位于第 2 节的第 1 层与第 2 层铝箔之间。

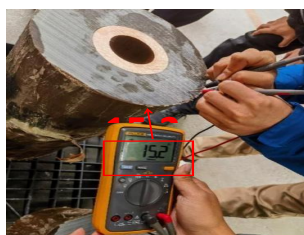


图8 通断测试情况



图9 电容测试情况

### 2.4.2 成像检测分析

为更准确地定位击穿点以及表征缺陷形貌，同时避免传统解体方法破坏缺陷原貌的问题，本次解体采用数字射线成像检测、相控阵全聚焦检测、CT 三维成像检测等无损成像检测技术，首次立体呈现异常点的三维形态并精确测量了尺寸。X 射线成像检测发现异常点在阀侧汇流环上端 60mm 处，5 点钟方向（定义末屏抽头方向为 12 点钟方向），如图 10 所示；且处于第 1 层与第 2 层铝箔之间、末屏铝箔端部位置，如图 11 所示。



图 10 缺陷点位置图

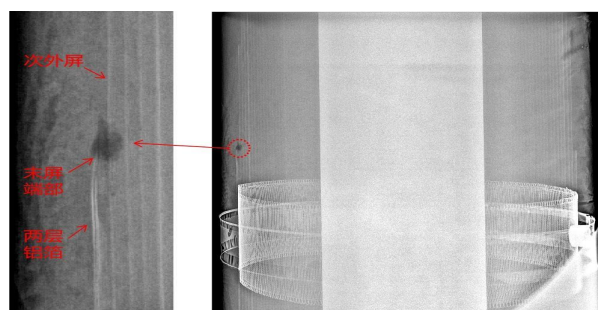


图 11 套管 X 光测量图

通过相控阵超声检测确认异常点距离芯子表面约 10mm，与第 1、2 层铝箔所处深度基本一致，如图 12 所示。

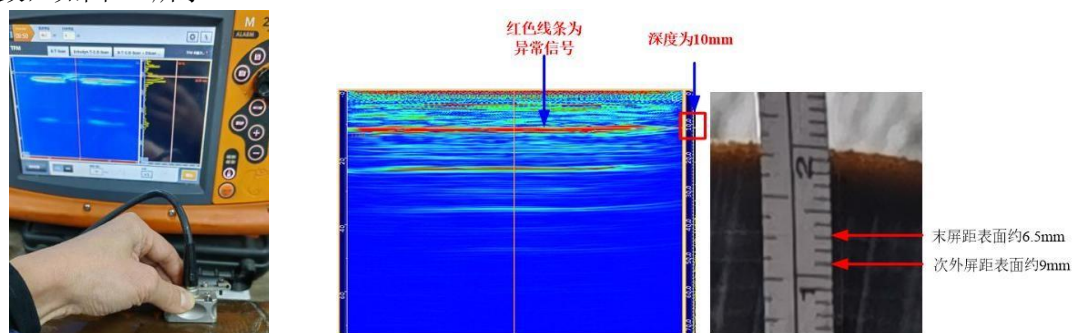


图 12 相控阵超声检测结果示意图

进一步通过 CT 三维成像检测和全聚焦相控阵超声检测准确表征击穿点形貌、精确测量缺陷点位置和尺寸。CT 三维成像检测发现末屏末端存在间隙，间隙环向长度约 47.18mm，纵向长度约 36.32mm；击穿点呈球状，部分纵向截面呈蝌蚪状，从末屏末端的间隙处延伸，径向直径约 4.16mm（深度方向），环向直径约 9.82mm，纵向长度约 10.80mm。



图 14 套管横截面图

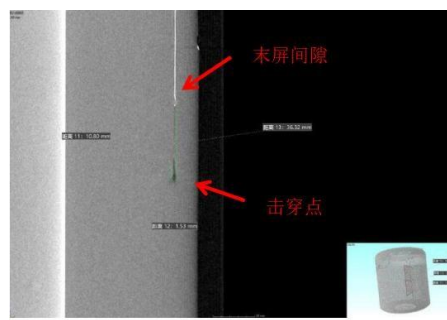


图 15 套管纵向图

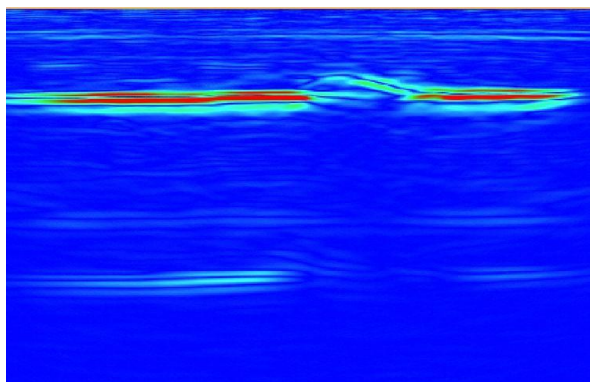


图 16 套管相控阵图

#### 2.4.3 缺陷点形貌

通过 X 射线、工业 CT 和相控阵超声检测定位到具体点位：阀侧汇流环下端 6cm 处、5 点钟方向及深度 10mm，为不破坏放电点形态，切割前标记出缺陷点位置，沿缺陷点边缘切割，再从侧面进行精细打磨，如图 17、图 18 所示。

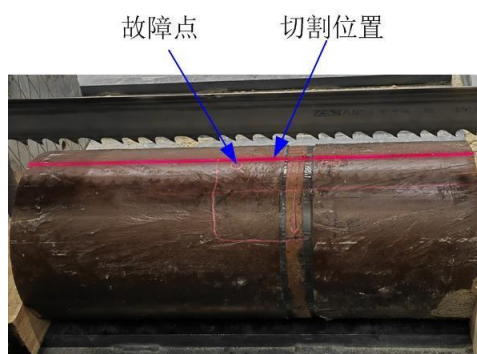


图 17 套管切割操作



图 18 套管研磨操作

从切割面向缺陷点打磨约 8mm，缺陷点全貌呈现，缺陷点为烧蚀的孔洞，距离芯体表面（深度）约 9.5mm，孔洞轴向尺寸约 10mm，与工业 CT 和相控阵超声检测结果一致。缺陷点位于末屏铝箔卷制搭接处，搭接处铝箔有 18mm 的错位。末屏铝箔搭接处的另一末端错位大致相同，其他屏的搭接处未见明显错位。铝箔卷制正常工艺如图 22 所示，搭接处应无明显错位，错位易产生尖端，引起电场畸变



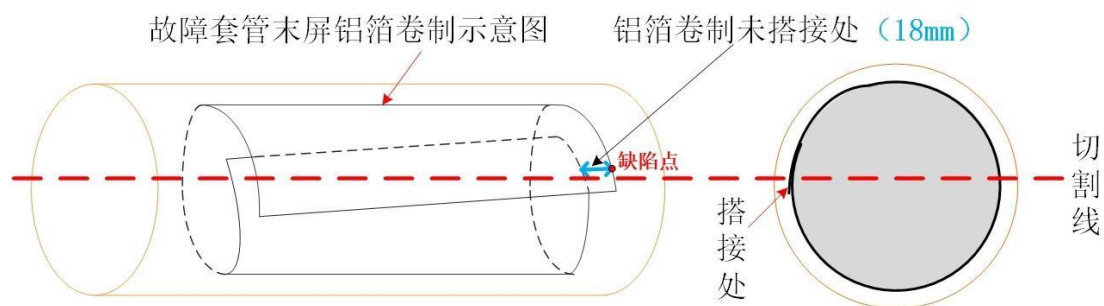


图 23 缺陷点位置四、异常原因分析

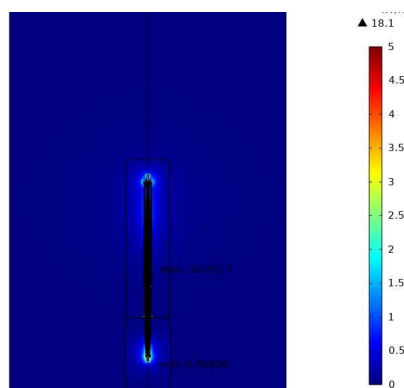
## 2.5 过电压情况分析

自投运以来因换相失败和直流线路故障,极 I 低端阀组角侧共出现 19 次过电压,对近两年共发生 7 次过电压情况统计见表 5。在正常运行期间,极 I 低端角接换流变三相阀侧电压最大峰值约 160kV,有效值约为 85kV。当直流系统发生换相失败或直流线路故障时,会引起换流变阀侧电压异常波动,电压峰值增大,最大可达正常峰值的 370%。2023 年 7 月 10 日,极 I 直流线路靠近绍兴换流站侧发生直流线路故障,故障点距离某换流站 5.9km,极 I 低端 Y/D-A 相换流变阀侧首端套管末屏电压达到正向电压峰值达到 554kV。

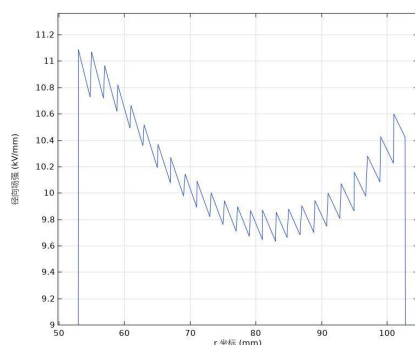
按照套管设计标准,极 I 低 YD 侧套管绝缘水平分别为 AC/SI/LI:588kV/1315kV/1550kV。套管过电压峰值虽未超过设计值,但过电压频率与工频、雷电、操作电压不同,对电容屏电场分布的影响有待进一步仿真计算分析。

## 2.6 电场仿真计算分析

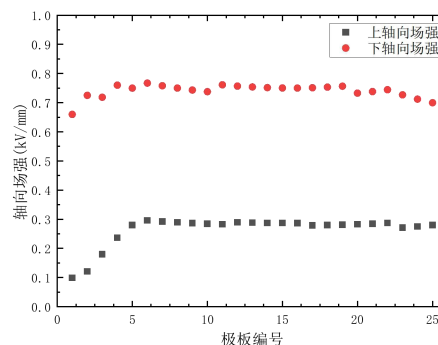
为研究外部过电压工况对电容屏端部电场的影响,建立缺陷套管电场仿真模型,计算套管在换相失败尖峰过电压下的电场分布如图 24 所示,在 5 种常见过电压工况下的电场强度数据见表 6。



(a) 套管整体电场强度分布云图

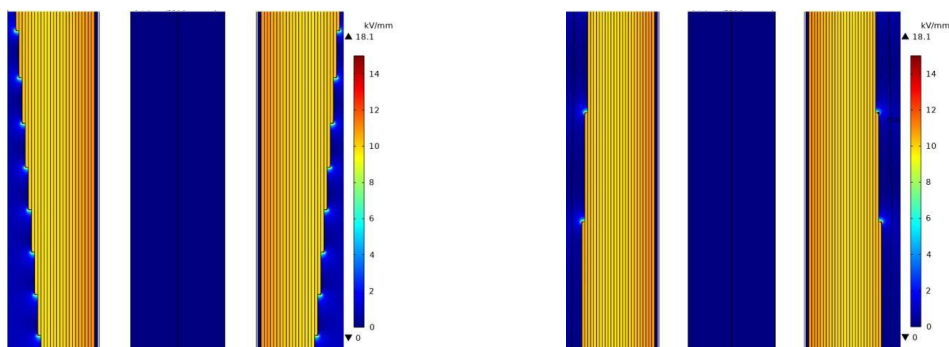


(b) 电容芯子径向电场分布

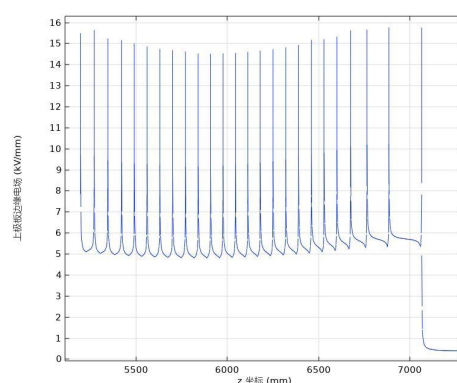
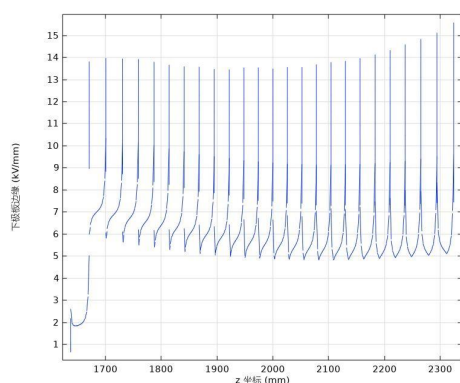


(c) 电容芯子轴向电场分布





(d) 电容芯子下端部电场分布 (e) 电容芯子上端部电场分布



(f) 下台阶边缘电场分布

(g) 上台阶边缘电场分布

图 24 套管于换相失败尖峰过电压下的电场分布

表 6

套管在 5 种工况下电场仿真计算数据

单位: kV/mm

| 工况类型        | 1.2min 工频<br>耐受电压<br>588kV | 2h 工频耐受<br>直流电压<br>392kV | 运行电压<br>峰值<br>233.07kV | 换相失败尖<br>峰过电压<br>507kV | 雷电冲击<br>电压<br>1297kV |
|-------------|----------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|
| 芯子径向电场最大场强  | 12.86                      | 10.89                    | 5.69                   | 11.09                  | 28.36                |
| 芯子上轴向电场最大场强 | 0.34                       | 0.25                     | 0.14                   | 0.30                   | 0.74                 |
| 芯子下轴向电场最大场强 | 0.89                       | 0.69                     | 0.37                   | 0.76                   | 1.96                 |
| 上极板边缘最      | 18.29                      | 11.17                    | 6.75                   | 15.77                  | 40.34                |
| 下极板边缘最大场强   | 18.07                      | 10.95                    | 6.73                   | 15.58                  | 39.85                |

由仿真结果可知,换相失败尖峰过电压峰值下的场强最大屏位于末屏和次末屏空气端上极板边缘处,此处为电场最为集中部位(电场畸变值有待进一步仿真计算),对于承受直流电压套管,运行负荷增大时电场会进一步畸变。在套管末屏极板边缘这一电场集中处,当极板边缘存在工艺制造偏差,导致电场进一步畸变时,此处容易发生局部放电,进而套管内绝缘逐渐发生劣化,直至发生击穿。实际解体套管击穿点位于末屏空气端极板边缘处,且为铝箔搭接部位。

## 2.7 套管结构对比分析

对比分析 HSP、沈阳传奇、西电西套、沈阳和新生产的 200kV 套管，HSP 套管的电容屏数、绝缘厚度均最小，分析认为套管绝缘裕度相对较小，进一步造成击穿隐患。

铝箔搭接错位标准一般为不超过 5mm，该异常套管的末屏铝箔搭接错位 18mm，且另一端也有相同程度的错位，已经远超了主流厂家的内控标准值。

**表 6 主要套管结构参数与工艺标准**

| 序号 | 电压等级/kV | 生产厂家 | 电容屏层数 | 绝缘厚度/mm | 铝箔搭接错位控制标准/mm |
|----|---------|------|-------|---------|---------------|
| 1  | ±200    | HSP  | 26    | 52      | 未提供           |
| 2  | ±200    | 沈阳传奇 | 40    | 80      | 未提供           |
| 3  | ±200    | 西电西套 | 35    | 87      | ≤1            |
| 4  | ±200    | 沈阳和新 | 43    | 110     | 5             |

## 2.8 电容量异常原因分析

综合各项试验和解体检查情况，分析套管电容屏击穿的原因为：套管整体绝缘裕度较小，且生产工艺控制不到位，末屏端部铝箔搭接错位形成尖端，引起电场畸变。在换相失败等工况产生的过电压作用下，末屏端部与次外屏间发生放电，逐步烧蚀层间绝缘，造成两屏击穿后导通，导致套管整体电容量增大、监测电压升高。

## 3. 检（监）测技术有效性分析

### 3.1 在线监测技术

换流变阀侧套管末屏二次电压值送至控保系统，控保系统换算成阀侧套管电压，此次异常中，通过末屏分压器监测到电压增大，并且通过电压变化率推算出电容屏击穿的层数，表明电压监测可有效反映出干式套管电容屏击穿缺陷。

### 3.2 检修试验技术

通过介损和电容量试验确认极 I 低端 YD-A 相换流变阀侧首端套管电容量偏大 4.32%，与电容屏一层击穿的电容量变化率 3.85%接近，证明其对芯体屏间击穿缺陷的有效性。

通过频域介电谱试验测量出极 I 低端 YD-A 相换流变阀侧首端套管电容量较出厂值偏大 4.03%，与电容屏 1 层击穿的电容变化率 3.85%基本一致，证明该试验对芯体屏间击穿缺陷的有效性。

针对套管芯体屏间缺陷，现场可开展频域介电谱试验、介损和电容量试验，提升套管屏间缺陷判断的准确性。

### 3.3 成像检测技术

针对本次套管异常分析，综合利用 X 射线成像、相控阵超声和工业 CT 成像技术，取得以下成果：

- (1) 通过 X 射线成像技术准确定位缺陷点位于末屏和次外屏之间。
- (2) 通过相控阵超声技术准确测量出缺陷点距离套管外表面约 10mm。
- (3) 通过工业 CT 成像技术准确测量出击穿点的尺寸：径向直径约 4.16mm，环向直径约 9.82mm，纵向长度约 10.80mm。

因此通过 X 射线、相控阵超声和工业 CT 成像技术能够准确定位缺陷位置，清晰展示缺陷点形貌，实现缺陷点位精细化解剖，保留缺陷点位原始形貌，支撑异常原因分析，尤其对芯体内微小异常点的诊断优越性更加突出。但是三类技术也存在一定局限性，由于受到套管护套、试品体积影响，三种成像技术无法在换流站现场支撑缺陷诊断或故障分析。

## 4. 后续措施建议

4.1 加强阀侧套管电压监视。OWS 后台增加阀侧套管基波电压有效值监视功能, 增加电压历史曲线、电压变化量、电压差值告警等功能, 根据套管结构特点制定差异化监视策略, 实时监视阀侧套管电压并及时预警电压异常。在过电压工况发生后, 根据过电压幅值、频率特征, 在过电压工况后的 15 日内对监测电压进行重点分析。

4.2 提升阀侧套管设计制造质量。阀侧套管生产厂家应完善制造工艺标准, 针对电容屏卷制错位引起电场畸变问题制定专项改进措施, 防止套管芯体运行中放电缺陷。

4.3 建议新工程采用绝缘裕度更大的套管。通过提升绝缘裕度, 降低铝箔层间承压水平, 避免快速暂态过电压下套管层间放电击穿。同时, 做好现有绝缘裕度小的套管监视和管控。

4.4 做好无损检测技术应用总结。全面总结 X 射线成像、相控阵超声和工业 CT 成像等无损检测技术对套管芯体缺陷检测方法, 提炼经验、剖析不足, 固化套管芯体缺陷检查标准。

4.5 做好套管在线监测新技术试点应用总结。收集试点阀侧套管本体电容量、介损在线监测数据, 研究发挥在线监测新技术优势, 提升阀侧套管运行状态管控水平。

4.6 开展阀侧套管电场仿真计算。对比分析电容屏搭接错位、电容屏层数、套管芯体绝缘厚度对电场强度的影响, 进一步明确电容芯子、电容屏的设计和工艺要求。

#### 参考文献:

[1] 《极性反转下特高压换流变阀侧套管电场分析》

[2] 《换流变介质损耗角正切值测量与分析》

作者简介: 张国栋 1981 年 6 月男副高级工程师从事换流站运检管理, 研究换流站运检技术。

# 环氧浸渍纸多层复合材料的空间电荷特性仿真研究

张梓瑜<sup>1</sup>, 张宏亮<sup>1</sup>, 金世雨<sup>1</sup>, 黄宁<sup>1</sup>, 王国伟<sup>1</sup>, 金海<sup>1</sup>

1. 兰州理工大学、甘肃省兰州市

## Simulation Study of Space Charge Characteristics of Epoxy Impregnated Paper Multilayer Composites

Zhang Ziyu<sup>1</sup>, Zhang Hongliang<sup>1</sup>, Jin Shiyu<sup>1</sup>, Huang Ning<sup>1</sup>, Wang Guowei<sup>1</sup>, Jin Hai<sup>1</sup>

1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu

**ABSTRACT:** Epoxy impregnated paper has been gradually used as the main insulating material for power equipment since the early 1970s, and has been widely used in power systems. However, epoxy impregnated paper belongs to multilayer dielectric materials, in which epoxy resin and insulating crumpled paper exist alternately, the microstructure is complex, the interface effect is prominent, and the numerical simulation study of space charge under multilayer dielectric is still scarce, so it is necessary to carry out a study on the space charge characteristics under multilayer dielectric. To this end, this paper establishes the corresponding finite element models based on the M-W interface polarization theory and the bipolar charge transport model, respectively, to study the space charge characteristics of epoxy composites at different temperatures, and compares the two models according to the results. It is concluded from the comparison that both models are generally more accurate in the simulation of interfacial charge polarity, but because the M-W model ignores the interface effect, surface state and other factors, the results obtained can only explain the charge distribution under certain conditions; while the multilayer dielectric model integrally takes into account the interfacial barriers and the mobility difference, so it is more universal in explaining the space charge distribution characteristics.

**KEY WORDS:** Epoxy impregnated paper, M-W interface polarization theory, bipolar charge transport model, space charge properties

**摘要:** 环氧浸渍纸从 20 世纪 70 年代初开始逐渐作为电力设备的主绝缘材料, 在电力系统中得到了广泛的应用。但环氧浸渍纸属于多层介质材料, 其中环氧树脂与绝缘皱纹纸交替存在, 微观结构复杂, 界面效应突出, 而且目前对于多层介质下的空间电荷数值模拟研究尚少, 因此有必要开展多层介质下的空间电荷特性研究。为此, 本文分别基

于 M-W 界面极化理论与双极性电荷输运模型建立相应的有限元模型, 对环氧复合材料在不同温度下的空间电荷特性进行研究, 并根据结果对两种模型进行了比较。通过比较得出, 两种模型总体上对界面电荷极性的模拟都比较准确, 但由于 M-W 模型忽略了界面效应、表面态等因素, 所以得到的结果仅能解释某些条件下的电荷分布; 而多层介质模型综合考虑了界面势垒与迁移率差异, 因此在解释空间电荷分布特性上更具普适性。

**关键词:** 环氧浸渍纸、M-W 界面极化理论、双极性电荷输运模型、空间电荷特性

## 1 引言

特高压直流设备是建设特高压直流输电工程的关键, 其中换流变压器是核心设备。所以如何保证换流变压器在同时承受交、直流和暂态电磁场的作用下仍具有高可靠性和高技术性, 这一技术决定了我国直流工程建设和设备国产化能否突破瓶颈。

我国特高压阀厅采用的换流变套管均为干式结构, 套管本体采用气体和固体绝缘材料构成的复合绝缘, 其中固体内绝缘材料为环氧浸渍纸。特高压直流套管在运行时载流量大并且承受极高电压, 导致环氧浸渍纸同时受到电、热、机械应力的作用。在高温高场下, 环氧/浸渍纸界面效应显著, 电荷输运特性发生变化, 影响套管电场分布, 进而对套管的长期可靠运行产生重要影响。

但目前国内在对多层复合介质的空间电荷特性研究方面仍不明晰, 所以我们建立适用于环氧复合材料的三层介质模型并修正相关参数, 通过数值模拟的方式为绝缘介质中的空间电荷特性提供理论支撑。

## 2 基于 M-W 界面极化模型对空间电荷的数值模拟

### 2.1 M-W 模型下的空间电荷特性

根据环氧浸渍纸的物理结构, 构建了环氧-纸-环氧复合材料的二维有限元模型, 如图 2.1 所示。其中, 左右两侧的环氧树脂层边界分别接正电极和地。

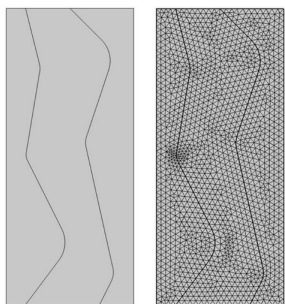


图 2.1 基于界面极化的环氧复合材料有限元模型及网格剖分

对模型外加 10KV/mm 电场, 进行界面极化理论下的数值模拟, 得到了在 20℃、40℃、60℃、80℃下环氧复合材料的稳态界面空间电荷分布云图。

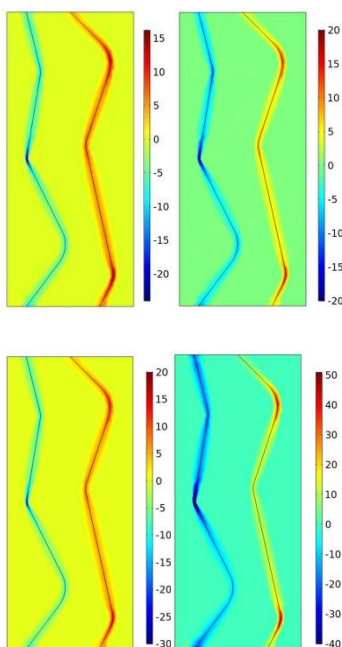


图 2.2 20℃、40℃、60℃和 80℃下环氧复合材料的稳态界面空间电荷分布云图

可以看出, 整个模型除界面附近区域, 电荷密度均为 0, 仅在界面附近有电荷积聚。在界面 2-1 处呈负极性, 在界面 3-2 处呈正极性, 与各自相邻电极极性相反, 证明了仿真结果与 M-W 理

论的推论一致。同时, 可以直观地看到界面凹凸处的空间电荷密度更大, 并且两界面电荷密度随着温度的升高而增大。

在模型中下部任取一横向截线, 绘出该二维截线上的电荷分布并以此来表征介质整体电荷分布, 如图 2.3 所示。

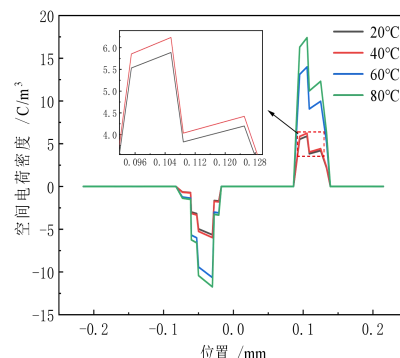


图 2.3 M-W 模型下, 不同温度的空间电荷分布线图

根据图 2.3, 可以观察到 20℃和 40℃时界面附近空间电荷分布相对一致, 60℃和 80℃界面附近电荷积聚相对明显, 这说明温度升高导致电导率增大, 而电导率的增大又加剧了界面极化过程。观察发现两界面处电荷并非完全对称, 并且其不对称程度随着温度升高而增大, 80℃时, 近阳极侧电荷密度大致为  $-12\text{C/m}^3$ , 近接地侧电荷密度在  $20\text{C/m}^3$  左右。造成这种差异的原因是 M-W 模型的理论推导忽略了实际微观界面的凹凸性。

在 3-2 界面上任取一点, 以该点处电荷密度表征两个界面的电荷动态特性, 如图 2.4 所示。

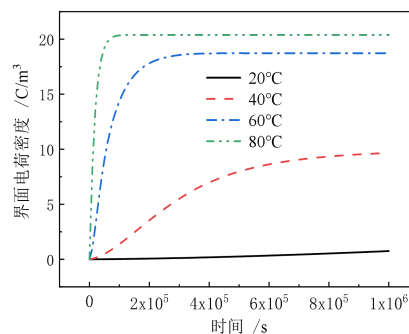


图 2.4 不同温度下, 界面空间电荷随时间的变化

由图 2.4 可知, 20℃时电荷密度缓慢增长。相比 20℃, 在 40℃时的界面积聚电荷量在  $6 \times 10^6\text{s}$  前增速较快, 之后增长速度趋于平缓, 这是因为 40℃和 80℃的时间常数远小于 20℃。60℃和 80℃时, 界面电荷达到稳态的速度显著加快, 60℃时大约在  $2.2 \times 10^5\text{s}$  后达到稳态, 80℃时仅需  $7 \times 10^4\text{s}$  便可达到稳态, 这进一步说明了材料在不同温度下在的极化速度明显不同。



## 2.2 M-W 模型下的电场分布

下面对界面极化电荷对环氧复合材料内部场强造成的影响进行分析, 图 2.5 给出了不同温度下的电场分布云图。

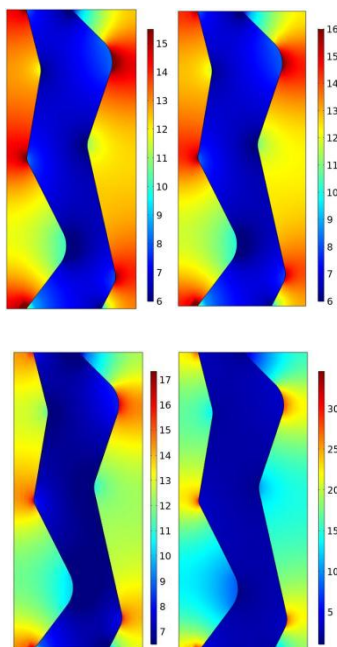


图 2.5 M-W 模型下, 20℃、40℃、60℃和 80℃时电场分布云图 (kV/mm)

由图 2.5 可明显看出, 温度越高, 两侧环氧层的电场强度与皱纹纸层的电场强度差值越大, 且界面转折处的场强明显高于其他区域。60℃时, 其界面转折处的平均场强已经超过 15kV/mm, 最大场强畸变率为 73%; 80℃时, 介质内最大场强远超其他温度下的最大场强, 最大值高达 34.6kV/mm, 同时, 最小场强仅 1.3kV/mm。

为分析造成场强差异的具体原因, 在环氧复合材料模型的水平方向上在任取一个二维截线, 并绘出其电场分布线图如图 2.6 所示。

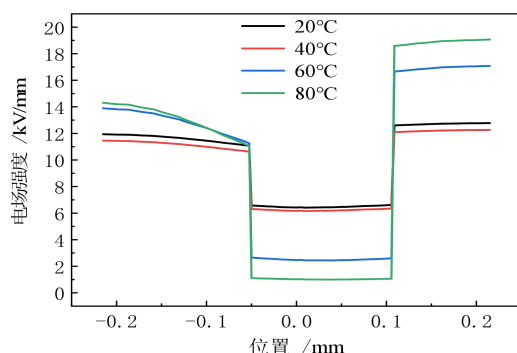


图 2.6 M-W 模型下, 不同温度时电场分布线图 (kV/mm)

由图 2.6 可知, 介质内场强分布出现了明显

断层, 两环氧层场强较高, 且同温度下右侧场强高于左侧; 皱纹纸部分场强最低, 其值远小于其他部分。结合图 2.3 分析可知, 在温度 $\leq 40^{\circ}\text{C}$ 时, 两界面处积聚少量与各自相邻环氧层极性相反的界面电荷, 两界面处空间电荷形成一个与外加电场方向相反的附加电场, 对皱纹纸层的场强起到削弱作用、对两环氧层起到增强作用, 此时电场畸变程度尚小。温度 $\geq 60^{\circ}\text{C}$ 时, 界面不连续性愈加明显, 逐渐增多的电荷对各层电场的增强、削弱作用持续, 同时近接地侧环氧层电荷密度更大, 电场增强作用也更显著, 最终呈现出两环氧层场强左低右高现象。

上述分析印证了介质的不连续性是空间电荷产生的来源, 温度升高导致的介质电导率变大是界面电荷密度变化的主要因素。但仿真结果并未出现与理论值大小相等、极性相反的结果。结合以往诸多研究, M-W 界面极化理论对低温低场下的空间电荷积聚解释具备一定的合理性, 而高温高场下的界面电荷数值将与 M-W 理论值相差较大<sup>[1,2]</sup>。下面将从双极性电荷输运模型的角度出发, 对环氧/纸/环氧界面电荷的积聚特性进行研究。

## 3 基于多层介质模型对空间电荷的数值模拟

### 3.1 多层介质模型下的空间电荷特性

图 3.1 绘制出了在外加 10kV/mm 电场下, 不同温度下基于多层介质模型的空间电荷分布云图。

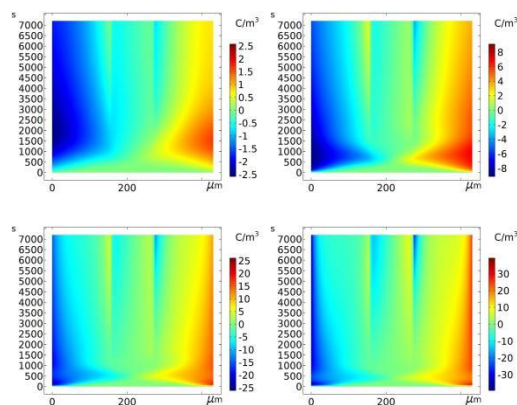


图 3.1 多层介质模型下, 20℃、40℃、60℃和 80℃时的空间电荷分布云图

图 3.1 中, 温度为 20℃时, 近阴极的环氧层负电荷分布范围要明显大于近阳极的环氧层正电荷, 界面处电荷积聚并不明显; 40℃和 60℃时, 两界近阳极环氧/纸界面出现了负电荷积聚, 且负电荷开始积聚时间要早于正电荷。温度为 80℃时,

至加压结束, 界面电荷密度达到最大, 最大正负电荷密度分别为  $19.2\text{C/m}^3$ 、 $25\text{C/m}^3$ 。总体来看, 伴随温度升高, 界面电荷密度在逐渐增大, 其极性与临近电极极性一致, 但绝大部分区域的体电荷密度不为 0, 且在皱纹纸中负电荷分布范围更广。

为进一步研究界面处电荷积聚过程, 图 3.2 给出了不同时刻下的空间电荷分布。

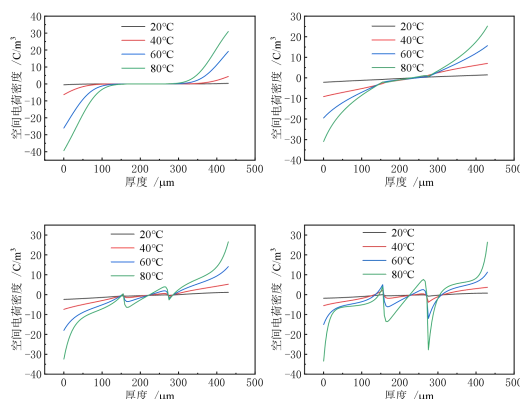


图 3.2 多层介质模型下, 0s、100s、3000s 和 7200s 时的空间电荷分布

从三个时间段对空间电荷分布进行分析: 在 0-100s 的初期阶段, 随温度升高, 两极注入的电荷量持续增加, 其中负电荷的累积显著超过正电荷, 而皱纹纸层的电荷密度维持在接近 0 的状态。在 100s-1000s 的中期过渡阶段, 皱纹纸层的电荷不再为 0, 此时两界面的电荷密度均随温度升高而下降, 但各界面电荷的极性依然与其邻近电极的环氧层极性保持一致。在 1000s-3000s 的显著积聚期, 两个界面处均观察到明显的电荷积聚现象。特别是在界面 2-1 和 3-2 处正电荷和负电荷的积聚现象显著, 80°C 时两处最大电荷密度分别达到  $0.42\text{C/m}^3$  和  $2.65\text{C/m}^3$ 。7200s 时, 两界面处积聚电荷密度差距随温度升高进一步变大, 同时, 由于皱纹纸层中电子迁移速率更大使得负电荷的积聚密度与扩散深度也要明显大于正电荷。

造成这种电荷积聚的原因, 一方面是从环氧层到皱纹纸层, 由于界面势垒的存在, 使得接地一极的环氧层中出现了电子的积聚, 近阳极环氧层中出现了空穴的积聚, 且负电荷积聚密度要小于正电荷密度。这体现在界面电流量中, 电子势垒系数要大于空穴势垒系数, 即电子更容易在界面处通过; 另一方面, 从皱纹纸层到环氧层, 由于皱纹纸层的载流子输运速率要大于环氧层中载流子输运速率, 使皱纹纸中电荷来不及抽出而在界面处积聚。这体现在皱纹纸中电子、空穴

迁移速率要大于环氧中电子、空穴迁移速率, 高温条件加大了载流子的迁移率差距, 导致近阴极纸层中出现空穴的积聚, 近阳极纸层中出现电子的积聚; 而皱纹纸中电子迁移速率又大于空穴, 使得负电荷积聚要多于正电荷的积聚。势垒的存在与迁移速率 (主导因素) 的叠加使界面电荷极性最终呈现与临近电极加压极性相反, 而温度因素加剧了负电荷先于正电荷电荷积聚且积聚程度大于正电荷的动态变化过程。

### 3.2 多层介质模型下的电场分布

为进一步说明多层介质模型下的电场分布情况, 图 3.3 绘出了不同温度下的电场分布云图。

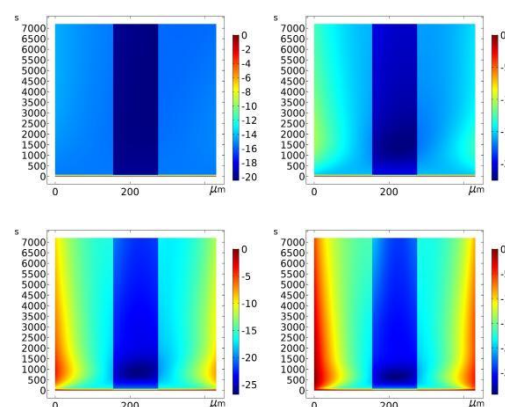


图 3.3 多层介质模型下, 20°C、40°C、60°C 和 80°C 时的电场分布云图 (kV/mm)

由图 3.3 可看出, 20°C 时, 两环氧层电场分布基本均匀, 从 40°C 开始, 两侧环氧层畸变程度逐渐变大, 且阴极侧要更明显, 电场畸变最严重的时间段在前 1500s, 以 80°C 为例, 阴极侧与阳极侧最小场强绝对值分别为  $0.56\text{kV/mm}$ 、 $4.38\text{kV/mm}$ , 而中部最大场强绝对值为  $29.36\text{kV/mm}$ 。总体来看, 不同温度下, 两侧环氧层电场较小, 高场区域主要集中在皱纹纸层且该处电场分布相对均匀。

为与 M-W 模型下的电场作对比, 图 3.4 绘出了加压 7200s 时, 不同温度下的电场分布线图。

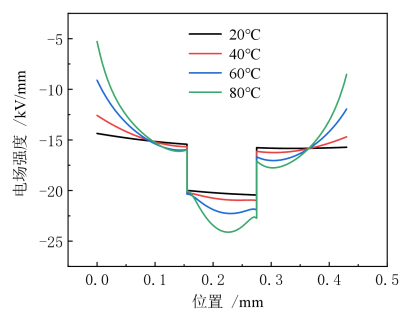


图 3.4 多层介质模型下, 不同温度时的电场分布线图  
从图 3.4 可看到, 整体电场由于相对介电常

数的不连续的被分为3段,且左侧电场略大于右侧,温度 $\leq 40^{\circ}\text{C}$ 时的电场分布趋势与MW模型较为相似,不同的是多层介质模型下的中部场强值更大,以 $40^{\circ}\text{C}$ 为例,多层介质模型的中部平均场强为 $20.69\text{kV/mm}$ ,而MW模型中部平均场强仅为 $6.18\text{kV/mm}$ ;当温度 $\geq 60^{\circ}\text{C}$ 时,环氧与皱纹纸层的电场不均匀度大幅增加,中部场强持续增大而两侧场强则不断减小。

由以上仿真对比不难看出,MW模型下的3段电场分布相对均匀,而多层介质模型下电场,尤其是在高温时畸变明显。两种模型下场强分布不一致的原因是:多层介质模型下的电荷分布介质内是连续的,除界面处有空间电荷积聚外,两环氧层内同样分布着大量同极性电荷,两者叠加后,介质内整体仍以同极性电荷分布为主,导致其与高温、高场下的电场分布机理类似。

#### 4 M-W模型与多层介质模型的比较

在探讨环氧复合材料的空间电荷特性时,我们采用了M-W模型与多层介质模型这两种模型进行分析,这两种模型在描述空间电荷分布时各有侧重。

其共性在于两模型均揭示了界面电荷的极性分布规律:近接地侧环氧层界面以正极性电荷积聚为主,而近阳极侧则呈现负极性电荷积聚。此外,随着温度的升高,两种模型下的界面电荷均表现出积聚增强的趋势,且阳极侧环氧层的电荷积聚量普遍高于阴极侧。

然而,两者在描述空间电荷分布的细节上存在一些差异。M-W模型基于宏观介质电导率,简化了载流子传导过程,将介质界面视为理想平行的欧姆接触,忽略了微观界面效应、表面态等因素对载流子迁移的复杂影响。因此,该模型下的空间电荷仅局限于界面附近,且电荷极性变化单一,无法全面反映实际空间电荷分布的复杂性。

相比之下,多层介质模型则更加深入地考虑了电极电荷的注入过程、不同载流子间的相互作用以及界面对载流子的阻挡积聚作用。通过定义界面电流通量,该模型赋予了载流子多样化的输运特性,并成功模拟了界面电荷随时间变化的复杂动态过程。这些特性使得多层介质模型在解释环氧复合材料中空间电荷分布时更具普适性和准确性。

#### 5 结论

本文以环氧-纸-环氧复合材料为研究对象,构建环氧复合材料的有限元仿真模型,通过仿真计算得到了环氧复合材料在不同温度下的空间电荷和电场特性。

根据M-W理论与环氧复合材料微观结构,建立相应的有限元模型,仿真结果表明:在电荷极性方面,仿真结果与理论一致,但在界面处空间电荷密度分布并不均匀,这是因为温度升高促进了界面极化速度、增加了界面电荷积聚量,并且界面电荷的分布对皱纹纸层的场强起到了削弱作用、对两环氧层起到了增强作用。

对多层介质模型的仿真发现:势垒的存在与迁移速率的叠加使界面电荷极性最终呈现出与邻近电极相反的分佈趋势,而温度因素导致了负电荷先于正电荷积聚,且积聚程度大于正电荷。

从结果与原理上对比发现,相较于M-W模型,多层介质模型在解释空间电荷分布特性上更具普适性。

基金项目:极性反转电压下胶浸纸套管界面电荷输运与低频极化机理研究

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(52367017).

#### 6 参考文献

- [1] 兰莉. 温度对聚合物绝缘中空间电荷行为的影响[D]. 上海交通大学, 2015.
- [2] Wu K, Zhu Q, Tu Y, et al. Simulation study on the effect of interface charge between oil and paper[C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. IEEE, 2014: 366-369.
- [3] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理(中册)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [4] Zhang S, Peng Z, Liu P. Inner insulation structure optimization of UHV RIP oil-SF6 bushing using electro-thermal simulation and advanced equal margin design method[J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2014, 21 (4): 1768-1777.



收稿日期 2024-07-24

作者简介:

张梓瑜(1998),男,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术, E-mail: 670291197@qq.com

张宏亮(1983),男,副教授,硕士生导师,研究方向为高电压与绝缘技术, E-mail: 55833005@qq.com



文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于参数识别的地铁杂散电流泄漏区域识别方法研究

王爱民\*, 李宇, 杨雯暄

(西华大学电气与电子信息工程学院, 四川省 成都市 610039)

## Location Method of Metro Stray Current Leakage Area based on Parameter Identification Methods

WANG Aimin\*, LI Yu, YANG Wenxuan

(School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** Since the metro rail insulation to the ground is reduced, resulting in DC leakage and the formation of stray current, accelerating the metal structure corrosion. Therefore, it is necessary to study the underground stray current leakage area positioning method. Based on the station and train monitoring information, an identification method of stray current leakage area based on the transmission line theory is proposed. The method solves the rail-to-ground conductance under dynamic train conditions by establishing the transmission line equation for the metro power supply section and using the station node potentials as the constraints. The stray current leakage section is identified by comparing it with the threshold required by the standard. The method compares with the existing engineering methods to identify stray current leakage sections online.

**KEY WORDS:** Metro stray current, transmission line theory, section location

**摘要:** 由于地铁钢轨对地绝缘降低, 导致钢轨中直流泄漏并形成杂散电流, 加速周围金属结构腐蚀。因此有必要研究地铁杂散电流泄漏区域定位方法。本文基于车站及列车电气量及位置在线监测信息, 提出了一种基于参数识别的杂散电流泄漏区域识别方法, 通过建立地铁供电区间的传输线方程, 以模型车站节点电位作为方程求解的约束条件, 利用最小二乘及遗传算法等参数识别方法, 求解列车动态运行条件下钢轨对地过渡电导参数; 并通过与标准要求的阈值进行比较, 实现杂散电流泄漏区间识别, 该方法与现有工程方法比较, 实现了杂散电流泄漏区间的在线识别。

**关键词:** 地铁杂散电流, 泄漏区域定位, 参数识别

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号

## 0 引言

地铁采用直流供电, 钢轨回流, 由于钢轨不能

做到对地的完全绝缘, 导致一部分电流泄漏到地下, 成为地铁杂散电流<sup>[1]</sup>。依据地铁设计规范, 新建线路钢轨对地过渡电阻不小于  $15\Omega\cdot\text{km}$ , 已开通运行的线路钢轨对地过渡电阻不应小于  $3\Omega\cdot\text{km}$ <sup>[1]</sup>。依据规范要求, 线路产生的杂散电流几乎可以忽略, 结构钢筋使用寿命可达 100 年<sup>[2]</sup>。然而, 实际工程中, 由于钢轨铁屑、隧道积水、轨道灰尘、绝缘扣件老化、钢轨直接接地等原因<sup>[3,4]</sup>, 导致杂散电流不明泄漏点增多, 杂散电流泄漏水平骤增, 危害地铁、管道及城市电网安全。因此有必要开展地铁杂散电流泄漏区域识别方法研究。

依据杂散电流泄漏定义, 研究普遍认为钢轨对地过渡电阻降低是杂散电流泄漏主要原因。因此, 杂散电流泄漏点定位主要依据大量的钢轨对地过渡电阻测量结果, 通过测量判断沿线钢轨过渡电阻较小值, 实现杂散电流泄漏点定位<sup>[5-8]</sup>。除此之外, 基于绝缘扣件绝缘破损后, 扣件上下表面电压降低特征, 文献<sup>[9]</sup>搭建了绝缘扣件表面电压检测平台, 提出基于破损扣件电压降突变特征提取的泄漏点定位方法。同时, 基于绝缘扣件破损后, 钢轨电位向零值趋近的变化特征, 文献<sup>[10]</sup>提出钢轨电位与钢轨对地过渡电阻融合的绝缘扣件破损位置定位方法。此外, 通过借鉴电力系统线路故障定位方法, 基于直流电流注入法的钢轨绝缘损坏定位方法被提出并得到理论验证<sup>[5,11]</sup>。除对钢轨注入电流外, 通过在牵引所于接地系统之间施加直流电压, 基于钢轨直流响应特征的单个接地点定位方法也得到了理论验证<sup>[12]</sup>。综上, 现有地铁杂散电流泄漏点定位方法主要依据钢轨对地过渡电阻离线测量结果, 难以满足实时性及准确性要求。

因此,本文基于车站及列车电气量及位置在线监测信息,提出了一种基于传输线理论的杂散电流泄漏区域识别方法。基于在线监测数据建立地铁供电区间模型,利用最小二乘方法对区间外参数进行识别;在此基础上,基于传输线理论推导地铁供电区间的传输线方程,以模型车站节点电位作为方程求解的约束条件,利用遗传算法求解列车动态运行条件下钢轨对地过渡电导参数;并通过与标准要求的阈值进行比较,实现杂散电流泄漏区间识别。

## 1 地铁供电区间模型

### 1.1 地铁站-车监测数据分析

地铁通常采用接触网供电,钢轨回流。钢轨通过焊接等方式连接,各供电区间接触网在牵引变电所位置经馈线与整流器母线连接,因此地铁牵引供电系统及回流系统具有全线贯通的结构特征。基于该贯通结构特征,地铁全线牵引变电所均可为列车进行供电。

为实时监测地铁设备、线路、列车及人员安全,大量监测传感器及监测设备被广泛应用,并对地铁车站及列车的电气及位置信息进行在线监测。地铁车站-车监测数据分布如图1所示。

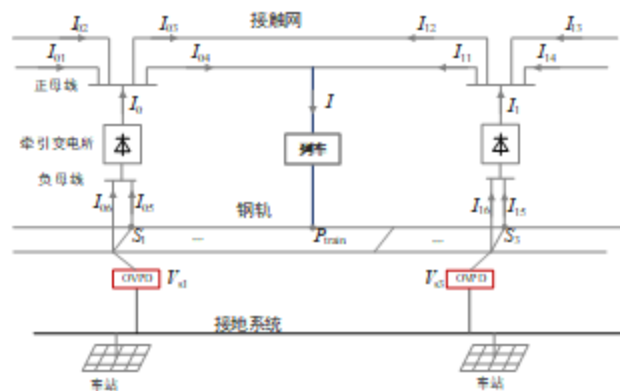


图1 地铁站-车监测数据分布

Fig. 1 Monitored information in the metro station and train

如图1所示,地铁车站安装有钢轨限位装置(over-voltage potential device, OVPD),该装置连接钢轨和接地系统,可以对钢轨对地电位进行实时监测;同时,当钢轨电位超过安全阈值后,OVPD通过闭合内部限位开关,实现钢轨与接地系统的直接连接,降低钢轨电位,保障乘客人身安全。同时,对于含有牵引变电所的车站,变电所内安装有整流柜、馈线柜、回流柜等装置,不仅能为地铁提供电力,还可以实时监测所内牵引电流、馈线电流、回流电流等电气量。于此同时,列车配置有自动驾驶

系统,不仅可以实时采集列车电流、功率、接触网电压等信息,还可以对车速、位置等信息进行实时监测。因此基于列车自动驾驶系统,可以获得任一时刻下,列车牵引电流及位置信息。图1中, $S_1$ 和 $S_2$ 为两相邻车站位置, $V_{s1}$ 和 $V_{s2}$ 为车站钢轨对地电位,由OVPD实时测量;此外,两车站均含有牵引变电所;其中, $I_0$ 和 $I_1$ 分别为两牵引变电所整流器输出电流,即牵引电流; $I_{01}$ 、 $I_{02}$ 、 $I_{03}$ 、 $I_{04}$ 和 $I_{11}$ 、 $I_{12}$ 、 $I_{13}$ 、 $I_{14}$ 分别为两牵引变电所馈线电流;当线路中仅有一辆地铁列车运行时,馈线电流 $I_{01}$ 、 $I_{02}$ 和 $I_{11}$ 、 $I_{12}$ 均为该供电区间之外的牵引变电所提供; $I_{05}$ 、 $I_{06}$ 和 $I_{15}$ 、 $I_{16}$ 分别为上下行线路回流电流;根据电路原理,同一牵引变电所内,回流电流之和与牵引电流相等; $I$ 为列车牵引电流, $P_{train}$ 为列车运行位置。

基于上述监测信息,可以获得列车动态运行条件下地铁车站位置钢轨电流、牵引所回流电流及列车位置、电流等信息。进而,利用直流电阻网络建模方法,可以进一步建立地铁相邻牵引变电所供电区间模型。

### 1.2 地铁供电区间模型构建

由于地铁采用直流供电,因此可以将地铁回流系统金属结构等效为直流电阻结构。基于相邻两牵引变电所监测数据,建立地铁供电区间模型结构如图2所示。

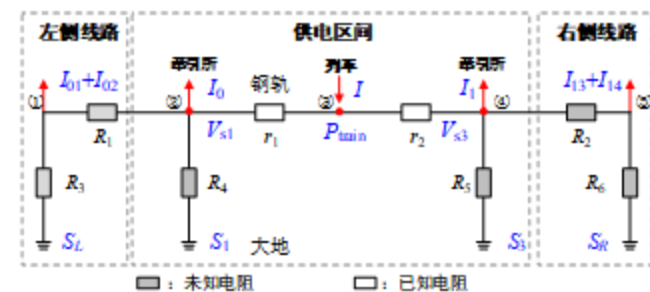


图2 地铁供电区间模型结构

Fig. 2 Metro traction supply section model

如图2所示,当一辆列车运行在该供电区间内时,模型共包含5个电路节点。其中,节点②、④为供电区间两侧牵引变电所节点;节点①、⑤为供电区间两侧其余牵引变电所的等效节点,等效由其他牵引变电所提供的全部电力。节点③为列车节点。根据电牵引变电所馈线电流,牵引电流、回流电流及列车牵引电流信息,可计算得到模型全部节点的节点电流。同时,节点②、④电压为牵引变电所车站钢轨对地电位,其数值可通过车站OVPD监测得到,因此模型②、④节点电压为已知量。此外,根据车站位置及列车位置信息,结合单位长度钢轨纵



向电阻,可计算得到供电区间内电阻  $r_1$  和  $r_2$ ; 其余电路之路电阻均为未知参数,  $R_1$  和  $R_2$  为供电区间两侧钢轨等效电阻;  $R_3$  和  $R_6$  为供电区间两侧钢轨对地等效电阻;  $R_4$  和  $R_5$  为供电区间对地等效电阻。

基于上述模型结构,利用基尔霍夫定理,得到模型节点电压与节点电流之间的数学表达:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} = \mathbf{G}^{-1} \begin{bmatrix} -I_{01} - I_{02} \\ -I_0 \\ I_f \\ -I_1 \\ -I_{13} - I_{14} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为节点电压矩阵;  $\mathbf{G}$  为模型导纳矩阵,矩阵中仅区间钢轨支路导纳可根据钢轨电阻  $r_1$ ,  $r_2$  计算得到,其余支路导纳均为未知数。 $\mathbf{I}$  为节点电流矩阵。由于公式(1)中节点电压仅有部分已知,导致未知数数量超过方程组数量,导纳矩阵不能直接计算得到,因此需要使用数值计算方法通过迭代计算模型未知参数电阻分布。

### 1.3 模型未知参数求解方法

本文采用最小二乘方法,求解模型参数。基于模型节点电压已知信息,构建最小二乘残差模型:

$$f = \|U_2 - V_{s1}\|_2^2 + \|U_4 - V_{s3}\|_2^2 \quad (2)$$

式中:  $U_2$  和  $U_4$  为模型节点电压计算结果,  $V_{s1}$  和  $V_{s3}$  为车站钢轨对地电位测试结果。在地铁列车动态运行过程中,模型求解流程如图3所示。

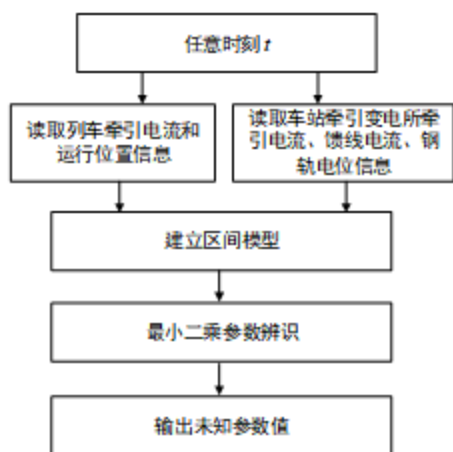


图3 模型参数求解流程

Fig. 3 Flow chart of calculation process of unknown parameters

随着列车动态运行,计算连续时刻下未知参数,统计获得未知电阻参数的计算数据集。为了减少计算误差,利用 Z-score 方法识别并删除参数计算结果中的异常值,并通过计算参数平均值作为未知电阻参数的最终识别结果。

基于上述区间模型参数识别方法,求解得到模型未知电阻参数。根据地铁杂散电流防护规范,对于新建线路钢轨过渡电阻应不小于  $15\Omega \cdot \text{km}$ ,对于已经开通运行的地铁线路钢轨过渡电阻应不小于  $3\Omega \cdot \text{km}$ ,因此,基于地铁供电区间距离,近似计算得到在没有钢轨过渡电阻降低的情况下,电阻  $R_4$  和  $R_5$  的阈值为:

$$R_{TH} = r_{th} / L \quad (3)$$

式中:  $R_{TH}$  为判断阈值;  $r_{th}$  为标准要求的钢轨过渡电阻率;  $L$  为供电区间长度。若  $R_4$  或  $R_5$  小于该阈值,则表明该区间可能为杂散电流泄漏区间,区间内可能含有杂散电流泄漏区域;且泄漏区域靠近电阻值较小的牵引变电所位置;如电阻  $R_4$  小于  $R_5$ ,则泄漏区域更靠近牵引变电所  $S_1$ 。

通过上述方法,分别建立地铁沿线各个供电区间的电阻模型,并分别判断各区间是否含杂散电流泄漏区域。进一步,基于传输线理论对可能含有杂散电流泄漏区域的供电区间建立诊断模型,识别杂散电流泄漏区域位置。

## 2 地铁杂散电流泄漏区域诊断方法

### 2.1 基于传输线理论的泄漏区域模型构建

基于上述参数辨识及初步诊断结果,基于传输线理论,对可能含有杂散电流泄漏区域的供电区间进行重新建模。模型结构如图4所示。

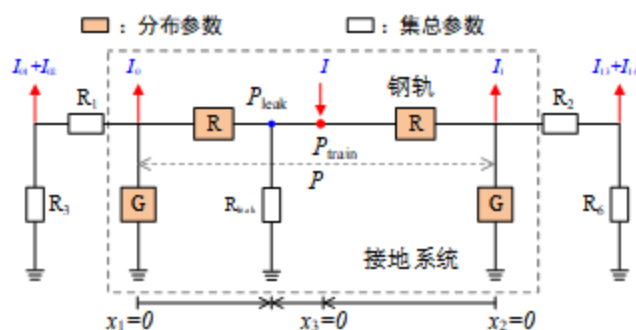


图4 基于传输线理论的泄漏区域模型

Fig. 4 Metro stray current leakage area model

如图1所示,模型包含集总参数和分布式参数,其中电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_6$  均为集总参数,供电区间内钢轨等效为II型结构,钢轨电阻与过渡电导为分布式参数。泄漏点位置为  $P_{leak}$ ,泄漏位置钢轨对地电阻为  $R_{leak}$ ,其位置及电阻均为未知参数。

根据牵引变电所、列车、泄漏点分布,对供电区间模型进行分段。对于长度为  $P$  的供电区间,模型设置供电区间两牵引变电所及列车位置为0。对

于任意位置,模型结构如图5所示。图5(a)为非节点位置,钢轨及过渡电阻模型结构。图5(b)为列车所在位置,钢轨及过渡电阻模型结构。图5(c)为泄漏位置,钢轨及过渡电阻模型结构。图5(d)为列车运行在泄漏位置时,模型结构。

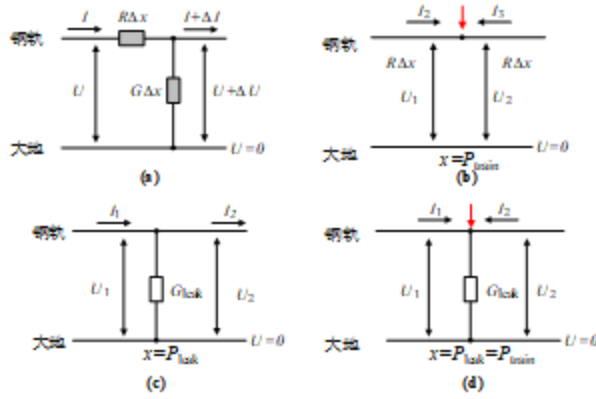


图5 供电区间任意位置钢轨等效模型结构

Fig. 5 Rail model along the power supply section

根据图4和图5所示模型结构,基于传输线理论,模型中各个区域电流电压满足如下关系:

$$x_1 \text{ 区域: } \begin{cases} u_1(x) = A_1 e^{-\gamma_1 x} + A_2 e^{\gamma_1 x} \\ i_1(x) = k_1 (A_1 e^{-\gamma_1 x} - A_2 e^{\gamma_1 x}) \end{cases} \quad (4)$$

$$x_2 \text{ 区域: } \begin{cases} u_2(x) = A_3 e^{-\gamma_2 x} + A_4 e^{\gamma_2 x} \\ i_2(x) = k_2 (A_3 e^{-\gamma_2 x} - A_4 e^{\gamma_2 x}) \end{cases} \quad (5)$$

$$x_3 \text{ 区域: } \begin{cases} u_3(x) = A_5 e^{-\gamma_3 x} + A_6 e^{\gamma_3 x} \\ i_3(x) = k_3 (A_5 e^{-\gamma_3 x} - A_6 e^{\gamma_3 x}) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $k_1=(G_1/R)^{-1/2}$ ,  $k_2=(G_2/R)^{-1/2}$ ,  $k_3=(G_3/R)^{-1/2}$ ,  $\gamma_1=(G_1 R)^{-1/2}$ ,  $\gamma_2=(G_2 R)^{-1/2}$ ,  $\gamma_3=(G_3 R)^{-1/2}$ , 其中  $R$  为单位长度钢轨纵向电阻;  $G_1, G_2, G_3$  为各个区域单位长度钢轨对地过渡电导, 为待确定数值;  $A_1 \sim A_6$  为未知参数。根据车站钢轨电位及回流电流, 上述方程未知参数满足如下关系:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = V_{S1} \\ k_1(A_1 - A_2) = -I_0 - \frac{R_3(I_{01} + I_{02})}{R_3 + R_1} \\ A_3 + A_4 = V_{S3} \\ k_2(A_3 - A_4) = -I_1 - \frac{R_6(I_{13} + I_{14})}{R_6 + R_2} \\ A_3 e^{-\gamma_2 P_{train}} + A_4 e^{\gamma_2 P_{train}} = A_5 + A_6 \\ A_1 e^{-\gamma_1 P_{train}} + A_2 e^{\gamma_1 P_{train}} = A_3 e^{-\gamma_2 P_{train}} + A_4 e^{\gamma_2 P_{train}} \\ k_3(A_5 - A_6) - k_2(A_3 e^{-\gamma_2 P_{train}} - A_4 e^{\gamma_2 P_{train}}) = I_T \\ k_1(A_1 e^{-\gamma_1 P_{train}} - A_2 e^{\gamma_1 P_{train}}) + k_3(A_5 e^{-\gamma_3 P_{train}} - A_6 e^{\gamma_3 P_{train}}) \\ = \frac{A_3 e^{-\gamma_2 P_{train}} + A_4 e^{\gamma_2 P_{train}}}{R_{leak}} \end{cases} \quad (7)$$

公式(7)包含8个方程, 11个未知参数, 分别为:  $A_1 \sim A_6, G_1, G_2, G_3, P_{leak}, R_{leak}$ 。因此无法直接求解得到未知参数分布。对此, 本文提出使用遗传算法计算未知参数。求解目标为公式(7)残差平方和最小。遗传算法每个种群基因数量为11, 基于测试经验, 电导参数取值大于0, 小于1 S/m。基于遗传算法的计算流程如图6所示。

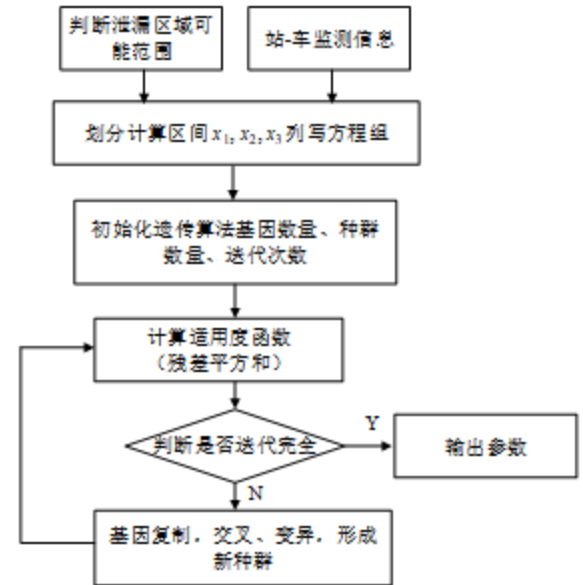


图6 基于遗传算法的参数辨识过程

Fig. 6 Flow chart of parameter identification with Genetic algorithm

利用图6所示参数辨识过程, 分别计算列车在区间内移动过程中  $P_{leak}, R_{leak}$  结果, 并利用 Z-score 方法识别并删除结果中的异常值; 并依据钢轨绝缘扣件电阻, 去除  $R_{leak}$  大于  $1000\Omega$  对应的  $P_{leak}$  计算结果; 通过计算泄漏区域的并集作为泄漏区域的最终诊断结果。

通过上述方法, 实现了供电区间内杂散电流泄漏区域的识别。分别对可能存在杂散电流泄漏风险的区域进行诊断, 进而可以得到地铁沿线各个供电

区间内杂散电流泄漏区域。

### 3 算例分析

#### 3.1 杂散电流泄漏区域模拟

基于 CDEGS 软件, 建立地铁杂散电流模型, 地铁线路结构如图 7 所示。模型包含 6 个牵引变电所, 单位长度钢轨电阻为  $0.01\Omega/\text{km}$ , 钢轨过渡电阻等效为模型钢轨绝缘涂层, 电阻率为  $1000\Omega\cdot\text{km}$ 。

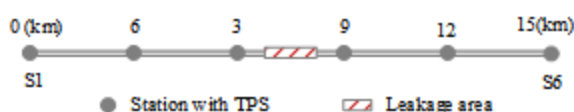


图 7 地铁线路结构

Fig. 7 Structure of metro line

模型中泄漏区域  $3500\text{m}-4000\text{m}$ , 泄漏区域钢轨电阻率为  $10\Omega\cdot\text{km}$ 。基于牵引变电所回流电流及车站钢轨电位仿真结果, 分别建立地铁区间模型, 识别可能存在的杂散电流泄漏区间。通过阈值比较, 确定泄漏区间位置, S3-S4 区间模型未知参数计算结果如表 1 所示。

表 1 S3-S4 区间模型未知参数计算结果  
Tab. 1 Unknown parameter of the S3-S4 section model

| 位置参数  | 计算结果 (欧姆) |
|-------|-----------|
| $R_1$ | 0.34      |
| $R_2$ | 0.34      |
| $R_3$ | 1.25      |
| $R_4$ | 0.2       |
| $R_5$ | 1.1       |
| $R_6$ | 1.25      |

区间长度为  $3\text{km}$ , 依据标准阈值  $3\Omega\cdot\text{km}$ , 钢轨过渡电阻阈值为  $1\Omega$ 。  $R_4$  小于阈值, 因此诊断区间 S3-S4 存在疑似杂散电流泄漏区域, 需要进一步建立该区间传输线模型, 进一步诊断区间内杂散电流泄漏区域。诊断结果统计情况如表 2 所示。

表 2 杂散电流泄漏区域统计结果  
Tab. 2 Location of the stray current leakage area

| 预设泄漏位置 (m)   | 结果泄漏位置 (m)   |
|--------------|--------------|
| [3500, 4000] | [3000, 4500] |

依据泄漏点位置统计结果, 本文所提方法识别杂散电流泄漏区域为  $3000-4500\text{m}$  位置。所提方法识别区域范围包含实际预测范围, 认为该方法可以用于识别杂散电流泄漏区域。

然而, 识别结果大于预设的杂散电流泄漏区域, 本文猜测可能是收到参数识别方法的影响。因此, 下一步将继续开展参数识别方法及非线性欠定方程组求解方法的研究, 提高杂散电流泄漏区域识别精度。

### 4 结论

为提高地铁杂散电流防护效率, 本文提出了一种基于传输线理论的杂散电流泄漏区域定位方法, 该方法通过建立地铁供电区间模型, 利用最小二乘参数识别方法, 识别供电区间钢轨过渡电阻, 并通过与阈值比较定位可能存在杂散电流泄漏区域的供电区间; 进而利用传输理论建立供电区间分布式参数模型, 推导关于泄漏点位置与已知电气量信息的表达式, 并利用遗传算法识别杂散电流泄漏区域位置; 利用预设的杂散电流泄漏区域, 验证了分发发发的有效性, 分析结果表明: 所提方法可以识别到杂散电流泄漏区间, 并近似定位杂散电流泄漏区域; 所提方法与现有工程测量方法相比, 克服了离线测量时效性差的缺点, 可以为工程中杂散电流进一步的防护工作提供参考依据。此外, 所提方法在泄漏区域定位精度方面还存在进一步提高的空间, 将进一步开展更高精度的杂散电流泄漏区域定位方法。

### 参考文献

- [1] Lin Sheng, Wang Aimin, Liu Mingjie, et al. A Multiple Section Model of Stray Current of DC Metro Systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(3): 1582-1593.
- [2] F.C.Robles, Hernandez, G.Plascencia, Kevin Koch. Rail Base Corrosion Problem for North American Transit Systems[J]. Engineering Failure Analysis. 2009(16): 281-294 郭泽, 吴文传, 张伯明, 等. 节点类型扩展潮流计算的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 81-87.
- [3] 李超, 曹晓斌, 沈豪, 等. 环境因素对地铁钢轨扣件绝缘性能影响的试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(03):48-52.
- [4] PAGE C L. Initiation of chloride-induced corrosion of steel in concrete: role of the inter facial zone [J]. Mater Corros, 2009, 60(8): 586 - 592.
- [5] 张栋梁. 城市轨道交通直流牵引回流系统防护技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [6] 李国欣, 吴培林, 裴文龙. 钢轨电位与杂散电流综合抑制研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(04): 56-62.
- [7] 黄俊, 李军, 周航, 陈昌邦. 兼顾杂散电流防护的新型钢轨电位限制装置应用实施[J]. 电工技术, 2022(10): 84-86.
- [8] 韩旭红, 刘伟, 解绍峰. 地铁杂散电流收集网横截面积计算[J]. 城市轨道交通研究, 2015(10): 98-101.
- [9] 薛定宇. 基于光纤光栅的地铁走行轨绝缘破损定位关键技术研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- [10] 苏宁宁. 地铁轨道对地局部绝缘损坏点定位方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [11] 郭庆. 城轨回流系统参数影响下故障定位有效性仿真技术[J]. 中国科技信息, 2022(03): 76-78.
- [12] Park JaaDo. Ground Fault Detection and Location for Ungrounded DC Traction Power Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(12): 5667-5676.



王爱民

收稿日期：2024-07-04。

作者简介：

王爱民(2021)，女，博士研究生，研究方向为  
地铁杂散电流泄漏点定位及抑制方法研究，E-mail:  
wam501382@163.com;

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 端羟基聚醚砜增韧环氧树脂的性能研究

王闯<sup>1\*</sup>, 杨新发<sup>1</sup>, 张浩林<sup>1</sup>, 陈驰<sup>1</sup>, 张在秦<sup>1</sup>, 吴昊<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710048;

2. 陕西泰普瑞电工技术有限公司, 陕西省 西安市 710021)

## Study on the properties of toughened epoxy resins with hydroxyl-terminated polyethersulfone

WANG Chuang, YANG Xin Fa, CHEN Chi, ZHANG Zai Qin, WU Hao

(1. School of Electrical Engineering, Xian University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China;

2. Shaanxi Taporel Electrical Insulation Technology Co, Xi'an 710021, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** High-temperature anhydride-cured epoxy resin formulations are widely used in power equipment, however, their curing products are brittle and prone to cause cracking accidents in insulating parts. In this paper, hydroxyl-terminated polyethersulfone (PES) was used to toughen the epoxy resin, and its micro-morphology, mechanical, thermal and electrical properties were analyzed. The DSC results showed that the introduction of PES could effectively improve the thermal stability of the composites. Mechanical and electrical tests showed that the PES content at 15% exhibited the best performance, with an increase of 41.2% and 36.6% in impact and tensile strengths, respectively, and an increase of 10.6% in breakdown strengths compared to the epoxy matrix. In addition, the dielectric properties of the composites were measured using a broadband dielectric spectrometer, and it was found that the introduction of PES reduced the dielectric constant and dielectric loss of the epoxy resin. Overall, the study in this paper provides ideas for the development of new epoxy resin insulating materials.

**KEY WORDS:** Epoxy resin; hydroxyl-terminated polyethersulfone; Toughening; Electrical properties

**摘要:** 高温酸酐固化环氧树脂配方被广泛应用于电力设备中, 然而其固化产物脆性大, 易引发绝缘件开裂事故。本文采用端羟基聚醚砜(PES)对环氧树脂进行增韧, 并对其微观形貌、力学、热学和电学性能进行分析。DSC 结果表明, PES 的引入可以有效地提高复合材料的热稳定性。力学和电学测试表明 PES 含量在 15% 时表现出最佳的性能, 相较于环氧基体, 其冲击强度和拉伸强度分别提高了 41.2% 和 36.6%, 击穿强度提高了 10.6%。另外, 采用宽频介电谱仪对复合材料的介电特性进行了测量, 发现 PES 的引入降低了环氧树脂的介电

常数和介电损耗。总体而言, 本文的研究为开发新型环氧树脂绝缘材料提供了思路。

**关键词:** 环氧树脂; 端羟基聚醚砜; 增韧; 电学性能

## 0 引言

环氧树脂因其优越的机械性能、热稳定性和电学性能被广泛的应用到高压绝缘领域, 如气体封闭式管道线路(GIL)/气体封闭式组合开关(GIS)中的盆式绝缘子和支柱绝缘子、干式变压器等<sup>[1]</sup>。然而其固化产物往往展现出高脆性和低韧性。因此选择一种高性能的增韧填料去提高环氧树脂的韧性是许多研究人员所感兴趣的。

聚醚砜因其优异的增韧效果, 并且不会影响环氧树脂的模量和耐热性被许多学者所研究<sup>[2-4]</sup>。然而将环氧树脂和聚醚砜混合时需要加入有机溶剂, 这会影响到实际的生产效率。而采用端羟基聚醚砜(PES)有效的提高了与环氧基体之间的相容性, 很大程度上简化了制备的工艺流程<sup>[5]</sup>。Velthem<sup>[6]</sup>等人采用羟基封端的聚醚砜对环氧树脂进行增韧, 发现热塑性增韧剂相比于橡胶增韧剂可显著改善复合材料的机械性能, 尤其是层间断裂韧性。然而这些研究主要集中在引入 PES 后的增韧机理、力学性能和热学性能方面, 没有对其电学性能进行分析。电力设备在实际运行中, 介电性能关乎其是否能够长期运行, 因此很有必要研究 PES 增韧环氧树脂的介电性能。

本文通过熔融共混法制备了不同比例的端羟基聚醚砜/环氧树脂复合材料。讨论了不同含量的 PES 对环氧树脂力学、热学和电学性能的影响, 同时深入分析了 PES 对复合材料的介电性能的影响, 为新型环氧树脂绝缘材料的开发提供理论依据。

**基金项目:** 国家自然科学基金 (52207174); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2023-JC-YB-398)。

National Natural Science Foundation of China (52207174); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi (2023-JC-YB-398).



## 1 试样制备和性能测试

### 1.1 材料

双酚 A 类环氧树脂 E51 由南通星辰合成材料有限公司提供。固化剂甲基六氢苯酐由嘉兴精化化工有限公司提供。促进剂 2-乙基-4 甲基咪唑由上海阿拉丁生化科技有限公司提供。端羟基聚醚砜由德国巴斯夫生产,其分子结构式如图 1 所示。

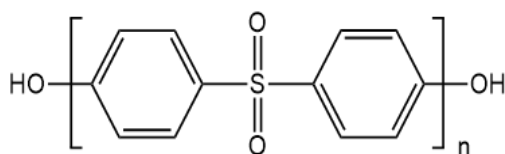


图 1 端羟基聚醚砜的分子结构式

Fig.1 Molecular structure formula of hydroxyl-terminated polyethersulfone

### 1.2 制备工艺

本文采用熔融共混的方式制备复合材料。首先将环氧树脂和不同含量的端羟基聚醚砜在 120℃ 的油浴下加热搅拌 1h,然后在 60℃ 下加入固化剂、促进剂搅拌 1h,搅拌得到的共混物在 60℃ 下进行脱气处理,脱气完成后浇注到模具里并同时放入烘箱中进行 80℃/2h+120℃/200min+160℃/200min 的固化流程,最后冷却到室温后将模具取出得到端羟基聚醚砜/环氧树脂复合材料的样品,具体样品命名如表一所示。

表 1 环氧树脂复合材料样品

Tab. 1 Samples of epoxy composites

| 样品     | EP+5%PES | EP+15%PES | EP+25%PES |
|--------|----------|-----------|-----------|
| EP:PES | 100:5    | 100:15    | 100:25    |

### 1.2 表征

采用 Hitachi Regulus SU8230 场放射电子显微镜观察复合材料的微观形貌。采用南京大展 DZ-DSC-300 型差式扫描量热仪对复合材料玻璃化转变温度进行测量。依据《GB/T 2567-2008》中的要求,采用美特斯电子式万能试验机和美特斯 ZBC1251-A 式摆锤冲击试验机测量拉伸强度和冲击强度。采用 YDQ15kVA/150kV 击穿测试平台测量复合材料击穿电压。采用 Novocontrol Concept 80 宽带介电光谱仪测量复合材料的介电性能。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观形貌

不同 PES 含量下环氧树脂复合材料的微观形貌如图 2 所示,在没加任何填料的情况下,100:0 复合材料的裂纹走向较为单一且没有发生明显的

偏转,表现出脆性断裂的特征。而引入 PES 后,PES 和环氧树脂会形成两相结构,表现为韧性断裂的特征。如图 2 所示,PES 含量为 5% 和 15% 时,在环氧树脂中形成了“海岛”的相结构,在 PES 含量为 25% 时形成了局部相反转的形貌。不同相结构形成的主要原因是 PES 发生的反应诱导相分离和环氧树脂交联反应相互竞争所导致的<sup>[7-8]</sup>。另外 PES 的引入阻碍和终止了裂纹的发展,使得三种复合材料的裂纹偏转路径变得更加复杂,起到了很好的增韧效果。

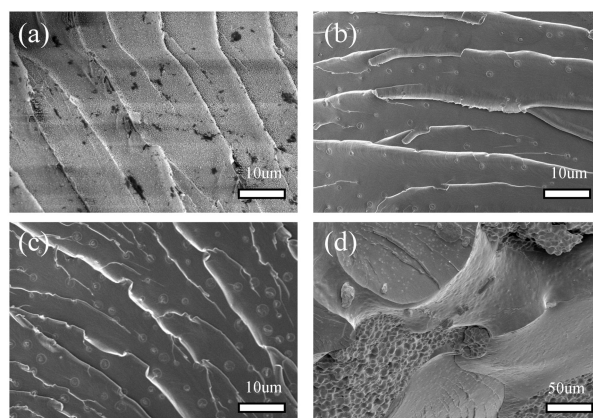


图 2 环氧树脂复合材料微观形貌图 (a) 100:0; (b) 100:5; (c)100:15; (d)100:25.

Fig. 2 Microscopic morphology of epoxy composites (a) 100:0; (b) 100:5; (c) 100:15; (d) 100:25.

### 2.2 玻璃化转变温度

玻璃化转变温度是聚合物重要的参数之一,它决定了材料用作塑料时的温度上限和用作橡胶时的温度下限<sup>[9]</sup>。在玻璃化转变温度附近,材料的各项性能会发生了很大的变化。如图 3 所示,掺杂 5% 的 PES 后,玻璃化转变温度较纯环氧略微下降,然而 PES 掺杂量大于 5% 时,玻璃化转变温度会上升。

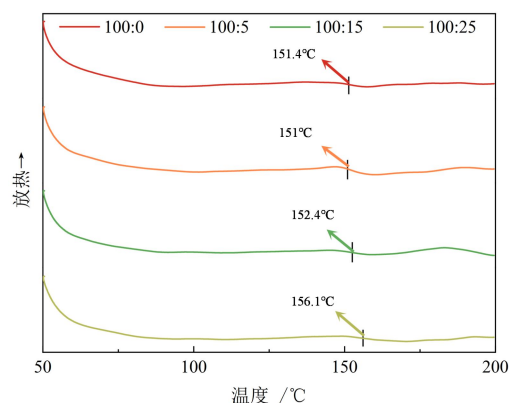


图 3 不同 PES 含量的环氧树脂复合材料 DSC 曲线

Fig. 3 DSC curves of epoxy composites with different PES contents

在低掺杂量下的玻璃化转变温度降低主要是相结

构造成交联度下降的影响较大,而高掺杂量下 PES 自身高  $T_g$  的优势使这种负面影响不够明显。

### 2.3 力学性能

如图 4 所示,相较于纯环氧树脂,引入 PES 后表现出更高的拉伸强度和冲击强度,这主要是 PES 颗粒使裂纹偏转路径更为复杂,起到了很好的应力耗散作用。添加 PES 使复合材料的机械性能得到提升,且 15%PES 表现出最高的机械性能,这时的冲击强度和拉伸强度分别提高了 41.2%和 36.6%。然而随着 PES 含量继续增加,表现出机械性能的降低,这可能是在相反转形貌下不利于应力的耗散。

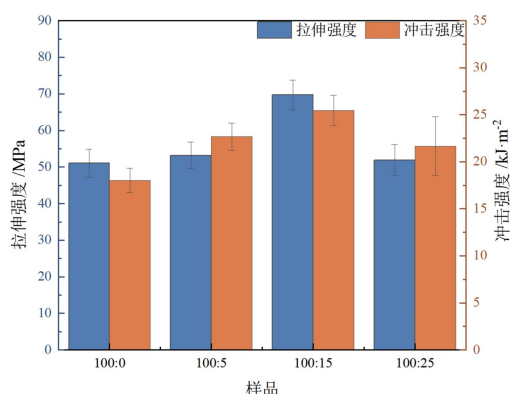


图 4 环氧树脂复合材料力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of epoxy composites

### 2.4 电学性能

对复合材料进行交流击穿实验,结果如图 5 所示。相比于纯环氧树脂,加入 5%和 15%的 PES 交流击穿强度呈上升趋势,交流击穿强度在 15%PES 含量下最高,这时的击穿强度提高了 10.6%。然而 PES 含量从 15%增加到 25%时将导致击穿强度降低,有趣的是,击穿强度表现出的变化趋势和力学性能的变化趋势相似。因此推测 25%PES 含量下击穿强度的降低和相反转的形貌有关。

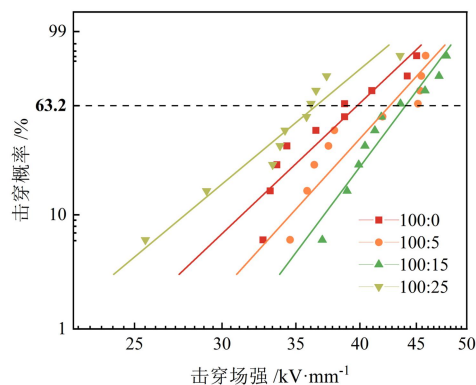


图 5 环氧树脂复合材料击穿场强的 Weibull 分布

Fig. 5 Weibull distribution of breakdown field strength of epoxy composites

利用宽频介电谱仪对复合材料的介电特性进

行测量。材料的相对介电常数和介电损耗决定了电力设备的电压分布和损耗特性。图 6 和图 7 分别显示了不同 PES 含量下复合材料在室温下的相对介电常数和介电损耗。相对于纯环氧树脂,在引入 PES 后没有带来新的弛豫过程,表明环氧树脂与 PES 的界面结合能力较强,没有带来明显的界面极化过程,使得复合材料的介电损耗减小。在 PES 引入后,复合材料的相对介电常数和介电损耗都表现出减小的趋势,这可能是 PES 的空间位阻效应使得分子链段的运动受到限制所导致的。

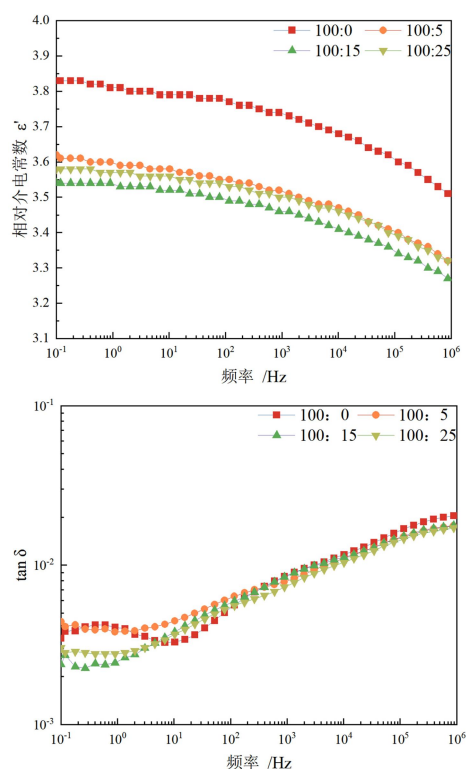


图 6 环氧树脂复合材料的相对介电常数和介电损耗

Fig. 6 Relative dielectric constant and dielectric loss of epoxy composites

## 3 结论

(1) PES 的引入有利于复合材料力学性能的提升,主要是由于 PES 的主链具有较高的刚性,且 PES 的酚羟基和环氧树脂反应提高了复合材料的交联密度。

(2) PES 的引入提高了复合材料的交流击穿强度,但在高掺杂比例下,击穿强度和机械强度都表现出降低的趋势,这可能和 25%含量下复合材料的相反转的相结构有关。

(3) 宽频介电谱结果表明, PES 的空间位阻效应有利于相对介电常数和介电损耗的下降,且 PES 良好的界面结合能力没有带来界面极化。

## 参考文献

- 
- [1] Mu M, Vaughan A. Dielectric behaviours of bio-derived epoxy resins from cashew nutshell liquid[J]. High Voltage, 2021, 6(2): 255-263.
- [2] Yang J P, Chen Z K, Feng Q P, et al. Cryogenic mechanical behaviors of carbon nanotube reinforced composites based on modified epoxy by poly (ethersulfone)[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(1): 22-26.
- [3] Zhou J, Zhang C, Cheng C, et al. Synergetic improvement of interlaminar fracture toughness in carbon fiber/epoxy composites interleaved with PES/PEK-C hybrid nanofiber veils[J]. Advanced Fiber Materials, 2022, 4(5): 1081-1093.
- [4] Jiang M, Liu Y, Cheng C, et al. Enhanced mechanical and thermal properties of monocomponent high performance epoxy resin by blending with hydroxyl terminated polyethersulfone[J]. Polymer Testing, 2018, 69: 302-309.
- [5] Kim B S, Chiba T, Inoue T. Morphology development via reaction-induced phase separation in epoxy/poly (ether sulfone) blends: morphology control using poly (ether sulfone) with functional end-groups[J]. Polymer, 1995, 36(1): 43-47.
- [6] Van Velthem P, Ballout W, Horion J, et al. Morphology and fracture properties of toughened highly crosslinked epoxy composites: A comparative study between high and low T<sub>g</sub> tougheners[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 101: 14-20.
- [7] Luo J, Yang X, Xue Y, et al. Simultaneous optimization of the thermal conductivity and mechanical properties of epoxy resin composites through PES and AgNP functionalized BNs[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 248: 110373.
- [8] Deng H, Yuan L, Gu A, et al. Facile strategy and mechanism of greatly toughening epoxy resin using polyethersulfone through controlling phase separation with microwave-assisted thermal curing technique[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(8): 48394.
- [9] Liu J, Cui X, Qin J, et al. Ultra-high cross-linked active ester-cured epoxy resins: Side group cross-linking for performance enhancement[J]. Polymer, 2024, 301: 127063.
- 



王闯

收稿日期: 2024-08-06。

作者简介:

王闯(1985), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力绝缘结构优化、电工新材料等, E-mail: wangchuang@xaut.edu.cn;

杨新发(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电工新材料、环氧树脂介电弛豫分析等, E-mail: 15129806342@163.com。

---

(编辑 五号楷体, 居右, 段前空 6pt)

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于注意力机制的 CNN-WaveNet-GRU 短期风电功率预测

佟雨航<sup>1</sup>, 田卫华<sup>2</sup>

(1. 沈阳工程学院 研究生部, 沈阳 110136)

(2. 沈阳工程学院 自动化学院, 沈阳 110136)

## Short-term Wind Power Prediction With CNN-WaveNet-GRU Based On Attention Mechanism

Yuhang Tong<sup>1</sup>, Weihua Tian<sup>2</sup>

(1. Shenyang Institute of Engineering, Graduate School, Shenyang 110000)

(2. Shenyang Institute of Engineering, School of Automation, Shenyang 110000)

**ABSTRACT:** With the increase of renewable energy sources in energy production, wind power prediction becomes crucial. This study proposes an innovative deep learning model. First, spatio-temporal information of meteorological features, such as wind speed and air temperature, is extracted by a CNN module to comprehensively capture the environmental changes of wind farms. Second, considering the temporal characteristics of wind power, the WaveNet module is introduced to model the complex structure of the power sequence, while the attention mechanism is used to dynamically adjust the weights of each time step to utilize the key information in the sequence more effectively. Finally, the GRU module is used for secondary feature extraction to effectively capture the timing information in the sequence. The experimental results show that the innovative model performs well in wind power prediction with significantly improved accuracy.

**KEY WORDS:** convolutional neural network, gated recurrent unit, wavenet, attention mechanism, wind power prediction

基金项目: 2021 年度辽宁省教育厅科技项目 (LJKZ1099)

2021 Science and Technology Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJKZ1099).

**摘要:** 随着能源生产中可再生能源的发展, 风力发电预测变得至关重要。本文提出了一种创新的深度学习模型。首先, 通过 CNN 模块提取风速、气温等气象特征的时空信息, 全面捕捉风电场的环境变化。其次, 考虑到风力发电的时间特性, 引入 WaveNet 模块对复杂结构的发电序列进行建模, 同时利用注意力机制动态调整每个时间步的权重, 以更有效地利用序列中的关键信息。最后, GRU 模块用于二次特征提取, 以有效捕捉序列中的时序信息。实验结果表明, 该创新模型在风力发电预测方面表现良好, 准确率显著提高。

**关键词:** 卷积神经网络, 门控循环单元, 波网, 注意力机制, 风电功率预测

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.P40010

## 0 引言

在“双碳”目标的推动下, 构建以新能源为主体的新型电力系统已成为必然趋势。近年来, 风能在全中国发电量中的比重不断增加, 但风能的不稳定性给电网的安全稳定运行带来了巨大挑战<sup>[1]</sup>。2006 年, 随着深度学习理论的突破, 深度学习在各个领域取得了许多成功应用, 这也标志着深度学习开始在实践中产生重大影响。基于深度学习的风电预测已逐步成为预测领域的重要课题, 且本文所用方法的核心就是利用深度神经网络进行预测。

为了进一步提高短期风电功率预测的精度, 本文提出了一种基于 CNN-WaveNet-GRU 多模型组合注意力机制的短期风电功率预测方法, 同时构建了 CNN-WaveNet 网络与 GRU 网络的组合预测模型。<sup>[2]</sup>为了更好地利用卷积神经网络对不连续数据的特征提取, 本文利用 CNN 和 WaveNet 提取数据的局部特征, 然后利用 GRU 进行二次特征提取, 并引入了注意力机制<sup>[3]</sup>, 使模型更加稳定, 进一步挖掘了数据的潜在特征关系。通过与相同条件下的其他模型比较, 本文提出的模型在风电预测中表现非常出色。预测曲线与原始曲线的拟合效果、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE) 和判定系数 ( $R^2$ ) 均优于其他预测模型。

## 1 理论方法

### 1.1 CNN-GRU 神经网络

### 1.1.1 CNN 神经网络

卷积神经网络 (CNN) 是一种深度学习模型, 常用于图像识别、语音识别等领域。CNN 的基本结构由卷积层、池化层和全连接层组成, 它们相互作用, 构成 CNN 模型的主要组成部分。<sup>[4]</sup>其中, 卷积层是 CNN 的核心, 它通过滑动卷积核来提取数据的局部特征, 从而对输入数据进行卷积运算。池化层用于缩减卷积层输出的特征图, 以减少模型参数和计算量。常用的池化方式有最大池化和平均池化两种。最大池化取窗口中的最大值作为输出, 而平均池化取平均值作为输出。全连接层用于将汇集层输出的特征向量映射到输出类别中, 以实现输入数据的分类或识别。该层通过连接所有节点, 使特征的组合更加灵活, 能够更好地处理复杂数据。

在卷积层中, 卷积核对卷积层的输入矩阵进行卷积运算, 通过激活函数运算得到卷积层的输出矩阵, 其计算公式为:

$$y(i, j, z) = f(x \times \omega_z + b_z) = f\left[\sum_{h=1}^{h_0} \sum_{s=1}^{s_0} \sum_{l=1}^{l_0} x(si + \omega, sj + l, h) \omega_z(\omega, l, h) + b_z\right] \quad (1)$$

其中:  $x, y$  表示当前卷积层的输入和输出;  $y(i, j, z)$  表示输出层的第  $(i, j, z)$  元素;  $\omega_z, b_z$  为第  $z$  个卷积核的权重和偏置;  $h_0, s_0, l_0$  表示卷积核的长宽高;  $s, p$  表示卷积核的步长和填充参数;  $f(x)$  表示用到的激活函数。

### 1.1.2 GRU 神经网络

GRU 是一种可处理序列数据的模型, 属于循环神经网络的一种变体, 它能够解决 RNN 中无法长期记忆和反向传播中梯度消失等问题。虽然与 LSTM 的功能相似, 但 GRU 相对更为简单, 训练起来更加容易。总的来说, GRU 将 LSTM 中的遗忘门、输入门和输出门转换为重置门和更新门。<sup>[5]</sup>遗忘门根据前一时刻的隐藏状态决定有多少信息需要遗忘, 而更新门则根据上一时刻和当前时刻的隐藏单元决定当前时刻有多少有用的信息需要向下传递。GRU 运算过程为:

$$z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t]) \quad (2)$$

$$r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t]) \quad (3)$$

$$\tilde{h}_t = \tanh(W \cdot [r_t * h_{t-1}, x_t]) \quad (4)$$

$$h_t = (1 - z_t) * h_{t-1} + z_t * \tilde{h}_t \quad (5)$$

其中:  $x_t$  为当前时刻输入信息,  $h_{t-1}$  为上一时刻的隐藏状态, 隐藏状态充当了神经网络记忆, 它包含之前节点所见过的数据信息;  $h_t$  为传递到下一时刻的

隐藏状态;  $r_t$  为重置门;  $z_t$  为更新门;  $\sigma$  为 sigmoid 函数, 通过函数可以将数据变成  $[0, 1]$  范围的数值;  $\tanh$  为 tanh 函数, 通过函数可以将数据变成  $[-1, 1]$  范围的数值。

### 1.2 WaveNet 神经网络

WaveNet 由伦敦人工智能公司 DeepMind 的研究人员于 2016 年 9 月提出, 它是一个完全的概率自回归模型, WaveNet 为一维 CNN 的改进结构, 通过引入空洞因果卷积, 该模型不仅弥补了传统 CNN 在处理时间序列长期依赖性方面存在的不足<sup>[6]</sup>, 同时有效抑制了 LSTM 网络等 RNN 以递归方式处理长序列存在的过拟合、梯度消失等问题。

(1) 普通卷积: 时刻的输出需要  $t-1, t+1$  三个时刻的输入, 对于生成任务来说, 这种方式并不适用, 因为  $t+1$  正是需要生成的点。

(2) 因果卷积:  $t$  时刻的输出只由  $t$  和  $t-1$  时刻或  $t-i$  时刻的输入决定。

(3) 空洞卷积: 不再是相邻的神经元, 而是跳跃几个, 比如膨胀系数=3, 意味着  $t$  时刻的输出由  $t$  和  $t-3$  的输入决定。这样的操作大大增加了感受野。

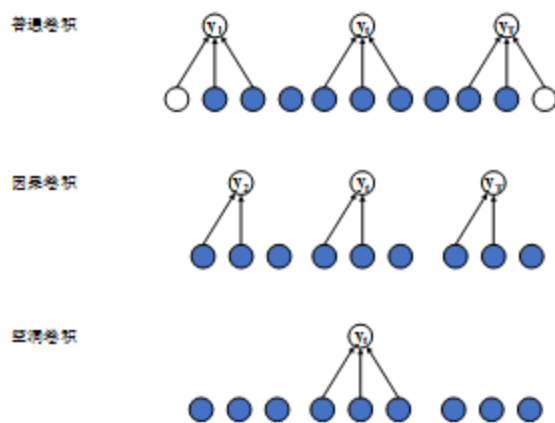


图 1 卷积结构简图

#### 1.2.1 因果卷积

因果卷积是指在卷积运算中, 只考虑当前时刻及之前的输入信号, 而不考虑未来时刻的输入信号<sup>[7]</sup>。这种卷积操作常用于时间序列数据的处理, 如语音识别、自然语言处理等领域。

#### 1.2.2 空洞卷积

空洞卷积是一种卷积神经网络中的操作, 它能够增加卷积层的感受野, 而不会增加参数数量和计算量。空洞卷积通过在卷积核中插入一些间隔固定的空洞来实现这一目的。具体来说, 空洞卷积在卷积核中插入一些间隔固定的空洞, 使得卷积核在进行卷积操作时, 不仅会考虑到当前像素点的信息,



还会考虑到距离当前像素点一定距离的像素点的信息。这种方式能够增加卷积层的感受野,进而提高模型的性能。

### 1.2.3 残差模块

传统的卷积神经网络在信息传递过程中,可能会出现信息丢失、损耗等问题,并且可能导致梯度消失或梯度爆炸,从而使得深度学习网络难以训练。残差模块的引入在一定程度上解决了这个问题。通过将输入信息以不同的方式输出,极大地保护了信息的完整性。整个网络只需学习输入、输出和残差部分这简化了学习任务的目标和难度。残差模块可表示为:

$$F(x)=H(x)+X \quad (6)$$

其中:  $H(x)$ 表示网络层的非线性变换;  $x$ 表示网络层的输入;  $F(x)$ 表示网络层的输出。

### 1.3 特征注意力

特征注意力是一种注意力机制中的方法,旨在增强模型对输入中特定特征的关注。<sup>[8]</sup>在自然语言处理任务中,特征可以包括单词、字母、音素等。引入特征注意力机制使模型能够动态地为不同的特征分配不同的注意权重,从而更好地捕捉输入中的相关信息。在不影响模型效果的前提下,该方法引入 Attention 向量,用于赋予特征及网络中的隐层特征不同的权重。在训练过程中,模型会学习这些权重,以获取各个特征对于模型学习的重要性程度,从而解释模型的效果。

本文使用注意力机制对输入特征进行加权处理。首先,将特征时间序列前一时刻网络输出的数据矩阵  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $\dots$ 、 $X_M$ 作为特征注意力机制的输入。然后,通过计算当前时刻各个特征的权重  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $\dots$ 、 $e_M$ ,并进行归一化处理。接着,根据注意力权重增强或削弱相关输入信息的表达。最后,将当前时刻得到的权重与对应特征相乘,输出为  $b_1X_1$ 、 $b_2X_2$ 、 $\dots$ 、 $b_MX_M$ 。特征注意力机制的示意图如下。

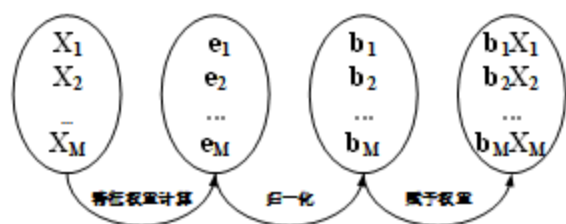


图2 注意力机制原理

## 2 预测模型

### 2.1 模型基本原理

本文利用历史风电场数据进行短期风电功率

预测,数据包括时间、天气和涡轮机内部状态等动态背景,这些信息中蕴含了丰富的潜在信息,对于未来风电功率的准确预测至关重要。考虑到不同预测方法的差异以及实际效果,本研究提出了一种深度学习方法,将 CNN、GRU 和 WaveNet 结合起来,并引入了注意力机制,以提高风电功率的预测精度。

本文将 CNN 模块和 WaveNet 模块通过注意力模块结合,使模型能够自适应地调整对每个特征的注意力。在此之后,我们没有使用传统的  $1 \times 1$  卷积的降维结构,而是采用 GRU 进行二次特征提取。同时,我们对跳跃连接结构进行了改进,以提高模型的稳定性。<sup>[9]</sup>这一创新性的结构提升了模型的性能,使其在风电功率预测任务中更具适用性。

### 2.2 网络结构

#### 2.2.1 基于 WaveNet 改进的卷积神经网络

与风电预测的信号不同,音频信号具有更强的周期性和细节集中程度,因此原始的 WaveNet 网络中的残差模块需要多层扩张卷积层、批量归一化层以及随机失活层来增强网络的特征提取能力和捕捉音频信号复杂细节的能力。然而,这种多层扩张卷积的堆叠会导致网络的深度和复杂度增加,从而降低网络的训练效率。为了避免复杂网络结构导致的过拟合问题,在处理风电预测数据时,我们采用 CNN 进行初步的局部特征提取,同时利用 WaveNet 进行长期的时序建模。这种方法有效地减少了多次批量归一化和随机失活的结构。

WaveNet 的完整架构建立在扩张卷积网络和卷积后的门控激活的基础之上。考虑到在基于随机梯度下降方法的深度网络训练中,参数通常更接近 0 进行初始化。误差信号的多层反向传播很容易导致梯度消失。这导致了随着网络学习深度的持续增加,学习效果不升反降的现象。本文在 WaveNet 中引入残差连接以加速模型的收敛速度,并使得梯度下降能够在更深的模型中传播,从而确保网络最终输出最优结果。

#### 2.2.2 注意力模块

考虑到组合模型预测中的适配问题,本文提出了一种注意力机制的模型,并设计了与该模型相协调的注意力模块。<sup>[10]</sup>通过学习权重参数和激活函数的组合,模型在训练阶段能够自适应地调整对每个特征的注意力。

在全面考虑影响风电功率的环境条件和设备状态的基础上,将风速计记录的风速、环境温度、涡轮机舱内的温度以及风机发出的有功功率等作为组合预测模型的输入。风电功率可能受到多个

因素的影响,包括风速、环境温度、机舱温度等,这些因素共同构成了一个多维特征空间。引入特征注意力机制可以让模型在学习过程中动态地为不同特征分配不同的注意权重。

### 2.2.3 GRU 的二次特征提取

考虑到卷积神经网络在处理一维时序数据时对于局部特征具有强大的鲁棒性,对于特征的轻微平移、缩放和扭曲具有一定的不敏感性。此外,虽然卷积神经网络能够有效提取相邻的局部特征,但对于特征位置的变化不敏感。<sup>[5]</sup>因此在如何充分挖掘原始风电数据的深层特征的问题中,我们对基于 WaveNet 特征提取的后续部分进行了一些调整,放弃了 1\*1 卷积的降维结构,而是采用了 GRU 层进行二次特征提取。

在深度神经网络中,通常通过梯度反向传播来更新权重,鉴于在使用 CNN、GRU 和 WaveNet 等层后,模型可能已经包含了复杂的特征提取和时序建模机制。为了更好地帮助模型适应数据的复杂性,我们选取了 ReLU 激活函数作为 GRU 层的激活函数,ReLU 激活函数的表达式为:

$$f(x) = \max(0, x) \quad (7)$$

鉴于风电原始数据具有较高的冗余性和噪声,一次特征提取后可能会导致部分数据丢失。本文在二次特征提取阶段引入了两个门控循环单元(GRU)层来处理序列数据。在第一层中,我们使用了 32 个 GRU 单元,这些单元专注于捕捉输入序列中的局部和低级别特征。为了提高网络的表达能力,并在不同层次上捕捉不同级别的抽象特征,我们引入了第二个 GRU 层。针对风电数据足够丰富的特点,我们可以逐渐增加层次和单元数量来提高模型的性能。因此,我们在第二层引入了 64 个 GRU 单元,以捕捉更抽象和全局的序列模式。

## 3 预测模型

本文使用了中国北方某风电场实际采集到的监控和数据采集(SCADA)系统的风力涡轮机数据。SCADA 系统每隔 10 分钟从该风电场的每台涡轮机中进行一次采样。模型的输入包括风电数据的动态背景因素,例如时间、天气和涡轮机内部状态等。模型的输出为待预测日的风电功率。

### 3.1 模型训练

模型训练使用均方误差作为网络的损失函数:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

其中  $y_i$  为实际值,  $\hat{y}_i$  为预测值,  $n$  为样本数量。

模型训练的优化方法选用了 Adam 优化器。Adam 优化器是一种自适应调整学习率的优化算法,它根据参数梯度的一阶矩估计和二阶矩估计自适应地调整每个参数的学习率。<sup>[11]</sup>图中展示了两种常用优化器在训练过程中的损失值下降曲线。

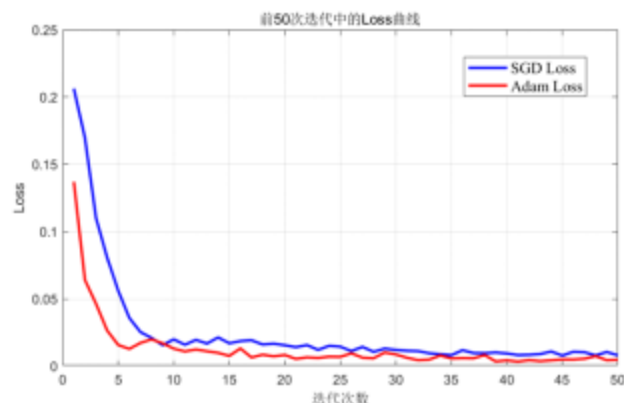


图4 两种优化器在训练过程中的 loss 值下降曲线

### 3.2 评价指标

在评估模型的预测效果时,本文使用了三个重要的指标:平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)和决定系数(R-Square)。MAE 度量了模型的平均绝对误差,其值越小表示模型对观测值的拟合越准确。RMSE 考虑了误差的平方项,因此对于大误差更为敏感,其值越低表示模型对实际观测值的拟合较好。决定系数 R-Square 衡量了模型解释目标变量方差的能力,其值越接近 1 表示模型解释能力越强。通过综合考虑这三个指标,我们能够全面评价模型的预测性能。计算公式分别如下:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (11)$$

式中  $n$  是样本数量,  $y_i$  为第  $i$  个采样点的实际功率值,  $\hat{y}_i$  为第  $i$  个采样点的预测功率值,  $\bar{y}$  为所有采样点的平均功率值。

### 3.3 预测结果分析

为了验证基于注意力机制的 CNN-WaveNet-GRU 短期风电功率预测模型的可行性,将创新模型与 LSTM 模型, Bilstm 模型, GRU 模型, WaveNet 模型, CNN-WaveNet 模型, CNN-GRU 模型, WaveNet-GRU 模型的预测结果进行对比。为了确保实验结果的可信性和权威性,并避免因偶然性而引起的误差,本研究在相同条件下对测试集进行 10 次实验,最终数据取了十次的平

均值。结果如表 1 所示,其中 Bilstm 预测效果最差,而创新组合模型性能最佳。

表 1 各模型预测结果对比

| 模型          | 时间/s | RMSE/MW | MAE/MW  | R2    |
|-------------|------|---------|---------|-------|
| LSTM        | 19   | 157.356 | 97.516  | 0.865 |
| Bilstm      | 23   | 167.971 | 101.907 | 0.858 |
| GRU         | 18   | 151.728 | 98.132  | 0.891 |
| WaveNet     | 38   | 148.686 | 91.592  | 0.901 |
| CNN-WaveNet | 120  | 133.992 | 88.466  | 0.907 |
| CNN-GRU     | 102  | 132.627 | 84.066  | 0.909 |
| WaveNet-GRU | 147  | 134.715 | 81.517  | 0.906 |
| C-G-WaveNet | 205  | 129.801 | 77.776  | 0.921 |

其中所有模型的训练和预测均在 GPU 上完成,可以看出 GRU 模型所需时间最短,但是效果不太理想。尽管创新模型在训练过程中所需时间较长,但与其他深度神经网络模型相比,所增加的时间并不多,同时其预测精度也最高。

图 5 为本文模型与单一预测模型的风电功率预测曲线。由图中可以看出在样本点 10~30,单一模型对于风电功率突然增大的预测表现出较大的误差,而本文模型表现出良好的实时性,能够迅速响应并跟上实际风电功率的变动。在样本点 43~80,即在风电功率维持相对稳定的情况下,本文模型仍然表现优异,相较于单一模型,更加贴合真实值曲线。由整体得出 GRU 模型与 WaveNet 模型表现较好,因此本文利用注意力机制为 CNN 模块和 WaveNet 模块进行加权输出,最后通过 GRU 模块进行二次特征提取,拟合效果最佳。

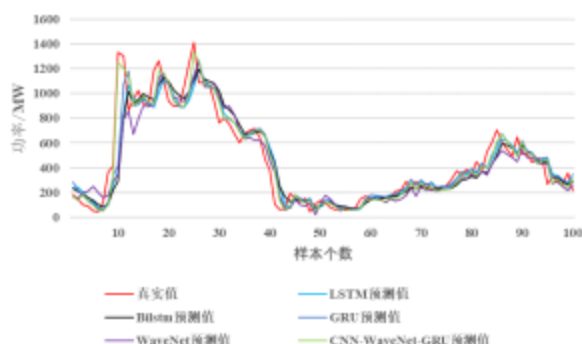


图 5 单一模型、创新模型预测曲线与真实曲线对比

图 6 为本文模型与组合模型的风电功率预测曲线。可以看出虽然各个模型都能基本预测出风电功率的变化趋势,但是 CNN-WaveNet-GRU 模型的预测值更接近真实值,拟合程度最好。在样本点 80~90, WaveNet-GRU 模型拟合效果很差,但经过 CNN 模块挖掘数据的局部特征、WaveNet 网络进行时序建模后的 CNN-WaveNet 组合预测模型,相较于单一的 WaveNet 网络和 WaveNet-GRU 模型拟合程度明显提升。在样本点 40~50, CNN-WaveNet 组合预测模型拟合程度较差时,通过二次特征提取的 CNN-WaveNet-GRU 组合预测模型拟合程度明显更

好,基本符合真实值。



图 6 组合模型、创新模型预测曲线与真实曲线对比

## 4 结语

本研究提出了一种用于短期风电功率预测的深度学习模型,即基于注意力机制的 CNN-WaveNet-GRU 组合模型。该模型整合了卷积神经网络(CNN)、WaveNet 网络和门控循环单元(GRU)等深度学习结构,以更全面地捕捉风电预测任务中的时空信息和序列依赖关系。模型首先利用 CNN 层进行多尺度的特征提取,以捕捉风速、温度等气象信息的空间局部性,并且引入 WaveNet 结构,专注于捕捉时序数据中的长时依赖关系,以更好地建模风电功率的序列特性,通过注意力机制将二者结合加权,使得模型能够在不同时间和不同特征之间动态地调整权重,更灵活地适应复杂的预测任务,最后利用 GRU 模块进行二次特征提取,提升了模型整体的性能。

## 参考文献

- [1] 李俊卿,李秋佳.基于Kriging和长短期记忆网络的风电功率预测方法[J].太阳能学报,2020,41(11):241-244.
- [2] KISVARIA, LIN Z, LIU X L. Wind power forecasting-A datadriven method along with gated recurrent neural network[J].Renewable Energy, 2021, 163:1895-1909.
- [3] 牛哲文,余泽远,李锐,曹文虎.基于深度门控循环单元神经网络的短期风电功率预测模型[J].电力自动化设备,2018,38(05):36-42.
- [4] 王瑞,徐新超,潘静.基于特征选择及ISSA-CNN-BiGRU的短期风电功率预测[J].工程科学与技术,2023,05:113-117.
- [5] 赵金明,李珂,王奕欣,杨天意.基于SSA-GRU神经网络的风电功率预测[J].传感器与微系统,2023,42(11):151-155.
- [6] 金航,张强,邵彦羽,李天林,杨新宇.基于CNN-WaveNet的滚动轴承剩余寿命预测[J].计算机应用研究,2021,38(10):3098-3103.
- [7] 马泽冠,李进,陈艳丽,陈晨.融合WaveNet和BiGRU的网络入侵检测方法[J].系统工程与电子技术,2022,44(08):2652-2660.
- [8] 赵福林,庄继辉,程晓峰,李学红,郭永平.基于特征注意力机制的RNN-Bi-LSTM船舶轨迹预测[J].广东海洋大学学报,2022,42(05):102-109.
- [9] 李青,张新强,张俊俊,马强,王衡,张正.基于MQ-WaveNet的风电集群发电功率多步预测[J].电力系统自动化,2023,47(08):156-168.
- [10] 贾睿,魏国华,郑豪丰,张润峰,邢重都.基于自适应权重的CNN-LSTM&GRU组合风电功率预测方法[J].中国电力,2022,55(05):47-56+110.
- [11] 姚德臣,李博阳,刘恒强,姚靖婧,皮耀南.基于注意力GRU算法的滚动轴承剩余寿命预测[J].振动与冲击,2021,40(17):116-123.

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于 CNN 与改进的 K-means 聚类的工业环境非侵入式负荷识别方法

刘鑫彤<sup>1</sup>, 白迪<sup>2</sup>

(沈阳工程学院 研究生部, 沈阳 110000)

(沈阳工程学院 电力学院, 沈阳 110000)

## A non-intrusive load identification method for industrial environments based on CNN with improved K-means clustering

Xintong Liu<sup>1</sup>, Di Bai<sup>2</sup>

(Shenyang Institute of Engineering, Graduate School, Shenyang 110000)

(Shenyang Institute of Engineering, School of electric power, Shenyang 110000)

**ABSTRACT:** In order to further improve the accuracy and adaptability of NILM in industrial environments, this paper proposes a non-intrusive load recognition method for industrial environments based on CNN with improved K-means clustering. Firstly, the data in the industrial load data set is de-redundantly regularized, and the deep learning method is applied to establish a neural network to firstly complete the identification of the load state of industrial equipment, and then, for the obtained itemized load data, the clustering algorithm that introduces the gap statistic to improve the k-value is adopted to carry out load identification. In this paper, the improved algorithm is used to comprehensively analyze IMDELD, a publicly available dataset of electricity consumption in a Brazilian poultry feed plant in the field of NILM, and the simulation results show the effectiveness of the k-value improvement, which improves the accuracy of load decomposition and identification by NILM in the industrial field.

**KEY WORDS:** non-intrusive load identification, neural networks, k-means clustering, industrial electricity behavior

**摘要:** 为了进一步提高 NILM 在工业环境中的准确性和适应性, 本文提出一种基于 CNN 与改进的 K-means 聚类的工业环境非侵入式负荷识别方法。首先将工业负荷数据集中的数据去冗余正规范化, 应用深度学习方法建立神经网络首先完成对于工业设备负荷状态的识别, 再针对所获得的分项负荷数据, 采用引入间隙统计量改进 K 值的聚类算法进行负荷识别。本文利用改进后的算法对 NILM 领域公开的一家巴西家禽饲料工厂用电能耗数据集 IMDELD 进行综合分析, 仿真结果表明了 K 值改进的有效性, 提高了 NILM 在工业领域对负荷分解与识别的准确率。

**关键词:** 非侵入式负荷识别, 神经网络, K-means 聚类, 工业用电行为

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.P40011

## 0 引言

在全球用电负荷增长的形势下, 构建智能互动的新型电力系统是我国能源电力行业的重要目标。研究需求侧管理技术对提升电网控制能力和用能效率具有重要意义<sup>[1]</sup>。负荷监测分为侵入式 (ILM) 和非侵入式 (NILM) 两种。ILM 需要在每个设备上安装采集装置, 成本高且维护复杂。NILM 通过在电力入口安装计量设备, 分析入口数据获取各负荷状态信息, 节省成本和维护麻烦, 但在工业应用中较少<sup>[2]</sup>。

NILM 包括数据采集、特征提取、负荷识别与负荷分解四个步骤, 前两者属于数据预处理环节, 后两者是核心技术。早期研究主要利用高频数据识别负荷, 但无法现场分解。随着方法多样化, 学者们利用不同负荷特征进行分解, 如 V-I 轨迹和暂态电流值均方根。近期研究采用决策树、时间感知神经网络和 Transformers 等方法<sup>[3-9]</sup>, 提升工业 NILM 的识别精度, 解决复杂负荷特征识别问题。近年来, 工业环境中的非侵入式负荷监测研究备受关注。

## 1 非侵入式负荷监测

### 1.1 NILM 领域现有方法和技术

NILM 是一个典型的时间序列分析问题, 其主

要流程如图 1 所示。

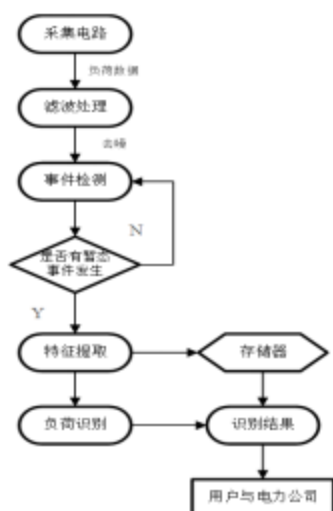


图 1 非侵入式负荷监测流程图

(1) 数据采集：主要考虑采集的物理量和频率。物理量包括电压、电流、视在功率和频率等；频率方面分为高频和低频采集，其中低频采集更适用于 NILM 应用。

(2) 数据处理：主要包括数据填充、重采样和去噪清理。数据填充技术解决采样设备损坏或数据传输失败导致的数据缺失问题，避免数据不连续性影响特征提取，从而确保 NILM 的有效性。

(3) 事件检测：基于负载特征变化判断用户用电行为。负载特征变化可能受设备状态变化和线路噪声影响，因此需充分考虑负载数据特性来选择事件检测方法。

(4) 特征提取：这是了解设备用电行为的关键步骤，通过提取电力信号中的特征来识别设备。特征提取有人工和自动两种方法。人工特征提取直观但依赖专业知识，难以适应新设备和场景。神经网络的自动特征提取方法无需人工干预，利用数据挖掘和高维映射关系自动识别特征，适应性强，提取速度快，且通过增加训练数据和改进算法提高准确性和可靠性。

(5) 负荷识别与负荷分解：负荷识别通过搜索工业负荷动作匹配当前事件类型，关注设备状态识别和分类；负荷分解关注设备细粒度能耗分解和曲线展示。深度学习神经网络在大负荷空间下更准确进行负荷分解，为电力系统管理和能源优化提供可靠基础。

## 1.2 用电负荷事件特征及数据选取

负荷特征是用电设备根据其结构特性反映出的独特状态。工业负荷状态变化主要由负荷投切操作引起，表现为功率的单调升降变化<sup>[10]</sup>。非侵入式

负荷监测通过监测电力总入口处的稳态功率变化来分析用电情况。

为了改善工业负荷监测效果，本文利用公开的工业数据集 IMDELD 进行综合分析。IMDELD (Industrial Machines Dataset for Electrical Load Disaggregation) 来自巴西的一家禽饲料工厂，记录了包括制粒机、双极接触器、排气扇和磨床在内的多种重型机械的电力消耗。该数据集用于非侵入式负荷监测 (NILM) 研究，记录了工厂 111 天内的电力消耗，由 11 台电力仪表收集，其中一台测量总功率，另外 10 台分别测量不同设备的功耗。

## 1.3 数据预处理

### 1.3.1 插值法

插值法可解决因噪声、人为干扰、网络延迟、设备损坏或传输失败导致的数据缺失问题。数据缺失会限制特征提取，影响 NILM 的有效性。插值法通过已知数据点推算缺失值，填补缺失数据，以避免后续事件检测和特征选择中的误差<sup>[11]</sup>。

IMDELD 数据采集的频率为 1Hz，即每秒钟生成一条样本数据，因此每一天得到的数据应该有 86400 条，数据集中记录到了该工厂 1 日内数据条数和数据缺失率，其中数据缺失率的计算公式如下：

$$\text{缺失率} = \frac{\text{缺失数量}}{\text{应有数量}} \times 100\% \quad (1)$$

线性插值算法适用于少量时序数据缺失情况，适配 IMDELD 数据集的 1 日数据缺失问题。即使 IMDELD 缺失率低，若事件发生在数据空缺时未处理，会影响事件检测准确性。因此，采用线性插值补全所有时间戳数据。具体方法是遍历所有时间点，判断是否存在时间断点，在不连续的数据点上填补线性插值数值，并标记相应时间戳。

线性插值的计算原理如图 2 所示，用可求表达式的函数  $L(x)$  替代未知曲线  $f(x)$ ，估算缺失值。

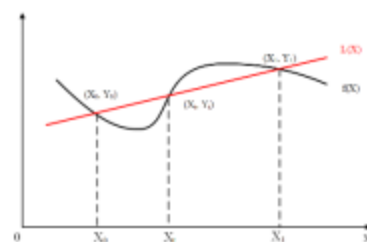


图 2 线性插值原理

在空缺时刻点  $x_t$  处要填补的数值  $y_t$  由函数  $L(x)$  计算得到，具体表达见式。通过时间断点相邻两侧的采集数据可以估计断点的近似值，完成



缺失数据的填补。

$$y_t = y_0 + (x_t - x_0) \times \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (2)$$

基于线性插值的缺失数据填补方法能够很好的补齐没有记录到的时间点数据,提高了数据质量,为后续事件检测和特征选择奠定了基础。

### 1.3.2 滑动平均法

在数据采集过程中,外界信号干扰、采集模块失灵和设备故障等因素常导致数据出现异常噪声值,这些异常数据在模型进行训练学习的过程中导致辨识度下降,因此需要对分表功率中的异常噪声进行预处理。滑动平滑法是一种效果良好的去噪方式<sup>[12]</sup>。

滑动平滑法应用于时间序列信号,通过滑动窗口确定噪声异常值并将其替换为窗口中点值。为防止位置偏差,滑动窗口长度一般为奇数。其数学表达如下所示:

$$y_{mean} = \frac{1}{n} \left( y_{t-\frac{n-1}{2}} + y_{t-\frac{n-1}{2}+1} + \dots + y_t + \dots + y_{t+\frac{n-1}{2}-1} + y_{t+\frac{n-1}{2}} \right) \quad (3)$$

式中,  $y_{mean}$  为光滑后异常值点的平均数据;  $y_t$  为滑动窗口中点  $t$  时刻异常噪声值;  $n$  为滑动窗口的长度。通过对时序功率序列进行去噪处理能有效降低个别异常值数据,提高整体的数据质量。

## 2 基于 CNN 的工业负荷识别

### 2.1 CNN 原理

将设备开启时的暂态功率波形作为负荷印记,负荷识别问题转化为图像识别问题<sup>[13]</sup>。CNN 作为广泛应用于计算机图像识别的网络模型,通过卷积层、池化层和全连接层实现多层前馈网络的图像识别功能<sup>[14]</sup>。

接层来自动提取和学习数据的层次化特征,关键组成部分如图 3 所示。



图 3 CNN 结构图

(1) 卷积层: 应用滤波器(卷积核)扫描输入图像,提取局部特征如边缘、纹理。将提取到的 P-Q 轨迹图像按像素分为多个局部块。以局部块为单位,通过卷积核进行卷积计算,公式如下:

$$A_j^i = f \left( \sum_{i \in M_j} A_i^{i-1} \times k_j^i + C_j^i \right) \quad (4)$$

式中:  $A_j^i$ ,  $k_j^i$  和  $C_j^i$  分别代表特征图、卷积核与卷积核的偏置。

(2) 池化层: 通过降采样在不影响特征信息的条件下减少特征图尺寸,提高计算效率,并防止过拟合,常用最大池化和平均池化。

(3) 全连接层: 整合卷积层提取的特征,利用 SoftMax 激活函数将图像特征转化为分类概率,取最大概率为最终结果,用于分类或回归任务。

SoftMax 回归模型为:

$$f_i(x) = \frac{\exp(x_i)}{\sum_j \exp(x_j)} \quad (5)$$

SoftMax 矩阵表达式为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \text{SoftMax} \left( \begin{bmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & W_{1,3} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & W_{2,3} \\ W_{3,1} & W_{3,2} & W_{3,3} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

式中:  $x_i$  为特征映射;  $b_i$  为偏置;  $y_i$  为分类概率。

### 2.2 基于 CNN 的电器识别算法训练流程

首先,对采集的用电数据进行滤波,并使用事件检测算法提取设备投切时的暂态功率轨迹,将其转化为  $60 \times 60$  的像素图像,以便卷积运算和特征提取。其次,将图像分为测试集和训练集。本文采用 LeNet-5 网络结构,通过 3 个大小分别为  $3 \times 3$  (有效捕捉细小的局部特征)、 $6 \times 6$  (捕捉更大范围的特征) 和  $8 \times 8$  (进一步提取更高级别的特征) 的卷积核处理图像,并用 reshape 函数整合特征映射图,使用 SoftMax 激活函数分类。最后,利用测试集验证训练好的网络并计算负荷识别率。电器负荷识别流程图如图 4 所示。



图 4 电器负荷识别流程图

## 3 基于 CNN 与改进的 K-means 结合的负荷识别方法

针对获得的分项负荷数据,采用改进的 K 算法进行聚类分析,引入间隙统计量与传统欧氏距离相结合。在获取各聚类结果后,统计各用电设备的电气特性和用户使用特征,挖掘分项电力数据与工厂用电行为之间的隐含关系,从而表征工厂的用电模式。

### 3.1 K-Means 聚类在 NILM 中的应用及其局限性

K-Means 聚类是一种常用的无监督学习算法，用于将数据集划分为  $K$  个簇，每个簇由一个中心点表示。该算法通过最小化簇内数据点到质心的平方距离之和来实现聚类<sup>[15]</sup>，如图 5 所示。

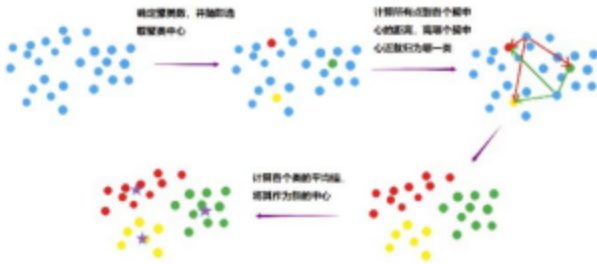


图 5 K-Means 聚类过程

在 NILM 中，通过对功率时间序列数据进行聚类，可以识别不同电器的运行模式，帮助将总功率负荷分解为各个电器的独立负荷。在某些 NILM 算法中，K-Means 聚类作为预处理步骤生成训练数据，用于训练更复杂的监督学习模型<sup>[15]</sup>。

然而，K-Means 聚类在 NILM 中有一定局限性。首先，它需要预先指定簇的  $K$  值，但在 NILM 应用中这个值往往未知或难以确定，不同的初始点可能导致不同的聚类结果，影响负荷分解的准确性。其次，K-Means 假设簇是球形和对称的，而电力消耗模式可能具有复杂的非线性关系，K-Means 难以有效处理这些复杂模式。

尽管 K-Means 在特征提取和事件检测方面有应用价值，其局限性也明显。为了解决这些问题，通常需要结合其他算法，如改进的聚类方法（如高斯混合模型 GMM）、深度学习方法（如卷积神经网络 CNN）以及基于时间序列的分析方法，以提高 NILM 系统的准确性和鲁棒性<sup>[16]</sup>。

### 3.2 将间隙统计量引入 K-Means 聚类以优化 K 值

间隙统计量 (Gap Statistic) 是一种用于确定 K-Means 聚类中最佳簇数  $K$  的方法。它通过比较实际数据的聚类结果与参考数据（通常是从均匀分布中生成的随机数据）的聚类结果来评估聚类质量，从而确定最优的  $K$  值。计算间隙统计量的步骤如图 6 所示。



图 6 Gap Statistic 优化 K 值过程

IMDELD 数据集的聚类分析主要集中在识别和分离不同工业设备的电力消耗模式。利用间隙统计量对  $K$  值进行优化后，对 IMDELD 数据集中表 1 所示的工厂内 4 种不同设备，基于采样频率为 1Hz 的有功功率、视在功率和电流三种电力数据的最大值进行聚类分析。与传统 K-means 聚类所得的聚类效果对比如图 7 所示：

表 1 IMDELD 8 台设备的运行数据

| 设备 | 有功功率最大值 (W) | 视在功率最大值 (w) | 电流最大值 (I) |
|----|-------------|-------------|-----------|
| 1  | 300         | 320         | 1.36      |
| 2  | 300         | 333         | 1.49      |
| 3  | 450         | 470         | 2.05      |
| 4  | 700         | 810         | 3.23      |
| 5  | 1650        | 1850        | 7.73      |
| 6  | 450         | 496         | 2.06      |
| 7  | 370         | 423         | 1.73      |
| 8  | 1220        | 1805        | 5.63      |

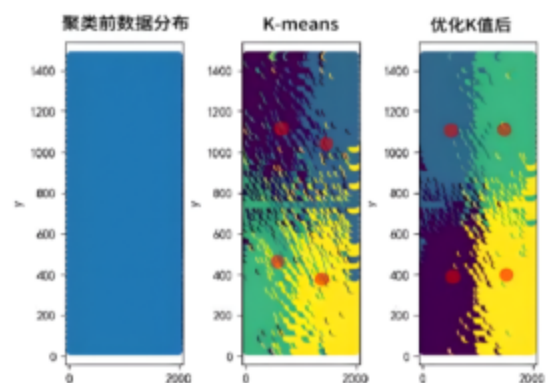


图 7 聚类效果图

可见相较于传统 K-Means 聚类，间隙统

计量方法提供了一种数据驱动的方法来选择最佳簇数  $K$ ，显著提高鲁棒性，能够避免人为选择的主观性并提供更稳定的  $K$  值选择。

### 3.3 基于 CNN 与改进的 K-means 结合的认识方法

通过将训练好的 NIM 卷积神经网络 (CNN) 模型中的 SoftMax 层替换为优化后的 K-Means 算法，可以改进 CNN 模型。具体步骤如下：

(1) 提取工厂设备 (制粒机、双极接触器、排气扇和磨床等) 的电力消耗数据，并分为测试集和训练集。

(2) 绘制 P-Q 轨迹图像，转化为  $60 \times 60$  的像素矩阵，构建卷积神经网络并训练。

(3) 建立基于间隙统计量优化  $K$  值的 K-Means 算法模型，根据要识别的设备数量，将输入维度设为 3，输出为设备类别。

(4) 将训练好的 CNN 模型的 SoftMax 层替换为聚类算法，利用测试集进行负荷辨识。

利用 K-means 改进后的卷积神经网络负荷辨识流程如图 8 所示。

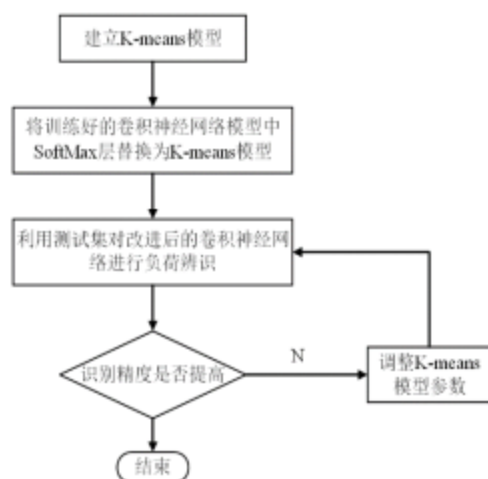


图 8 卷积神经网络负荷辨识流程

## 4 实验结果分析与析

通过 GitHub 数据平台获取制粒机、双极接触器、排气扇、研磨设备、饲料搅拌机和颗粒冷却器的负荷数据共 1830 份，分为训练集 (1000 份) 和测试集 (830 份)。将采集到的数据绘制功率轨迹图像并转化为  $60 \times 60$  像素矩阵，利用改进后的卷积神经网络模型对测试集进行负荷辨识，辨识结果如图 9 所示。

|       |    |    |    |    |    |    |      |
|-------|----|----|----|----|----|----|------|
| 制粒机   | 40 |    |    |    |    |    | 100% |
| 双极接触器 |    | 40 |    |    |    |    | 100% |
| 排气扇   |    |    | 40 |    |    |    | 100% |
| 研磨设备  |    |    |    | 40 |    |    | 100% |
| 饲料搅拌机 |    |    |    |    | 40 |    | 100% |
| 颗粒冷却器 |    |    |    |    |    | 40 | 100% |

图 9 改进后的设备识别结果

由此可见，K-means 改进的模型增强了相似特性负荷特征之间的差异，有效避免了特征重叠问题，提高了负荷辨识的准确率。

## 参考文献

- [1] 魏旭,刘东,高飞等.双碳目标下考虑源网荷储协同优化运行的新型电力系统发电规划.电网技术,47(09):3648-3661,2023.
- [2] 田洁.基于用户行为分析的非侵入式家庭负荷分解研究.华北电力大学(北京),2020.
- [3] Laughman C et al. Power signature analysis[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1(2): 56~63.
- [4] 杨云瑞,黄宇魁,陈文浩.基于 VI 轨迹特征的非侵入式负荷监测算法.计算机与数字工程,48(10):2353-2358,2020.
- [5] Yang D, Gao X, Kong L, et al. An Event-Driven Convolutional Neural Architecture for Non-Intrusive Load Monitoring of Residential Appliance[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2020, 66(2):173-182.
- [6] Lin J, Ding X, Qu D, et al. Non-intrusive load monitoring and decomposition method based on decision tree[J]. Journal of Mathematics in Industry, 2020, 10(1): 1-14.
- [7] Huang G et al. Physics-Informed Time-Aware Neural Networks for Industrial Nonintrusive Load Monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022: 1~11.
- [8] Angelis G F et al. Enerformer: A New Transformer Model for Energy Disaggregation[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2023: 1~1.
- [9] 杨心刚,张鹏,杜洋.基于谐波发射水平的工业用户电力设备分类识别方法.中国电力 54(08):43-51,2021.
- [10] 赵文清,张诗清,李刚.基于聚类和关联分析的居民用户非侵入式负荷分解.电力自动化设备,40(06):8-19, 2020.
- [11] 殷波,张帅.家用非侵入式电力负荷监测与识别算法研究.中国海洋大学学报,50(06):149-156,2020.
- [12] 丁迅,张忠,夏兆俊.基于非侵入式负荷监测的家庭智慧用能管理研究.现代电力,39(04):496-505,2022.
- [13] 何健明,李梦涛,张禄亮.基于 Attention 和残差网络的非侵入式负荷监测.电测与仪表,1-9[2024-05-18].
- [14] 武昕,于金奎,彭林.基于用户边缘侧事件解析的工业电力负荷非侵入式感知辨识.电力系统自动化,45(04):29-37,2021.
- [15] 李争,王泽,冯威.基于 CNN 与 K-means 聚类的非侵入式电器负荷识别方法.河北科技大学学报,43(04):365-373,2022.
- [16] 朱吴帆.基于非侵入式负荷分解的用户行为识别研究.华北电力大学(北京),2022,000971.

文章编号: P40033

中图分类号: TM72

文献标志码: D

学科代码: 080802

# 考虑灵活性的含电转氢综合能源系统优化调度

孙天贺<sup>1</sup>, 潘魁元<sup>1</sup>

(1. 辽宁省电网节能与控制重点实验室, 沈阳工程学院, 沈阳, 110136)

## Optimization and Scheduling of Integrated Energy Systems with Flexibility Considering Power-to-Hydrogen Conversion

SUN Tianhe<sup>1</sup>, PAN Kuiyuan<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Energy Saving and Controlling in Power System of Liaoning Province, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, 110136)

**ABSTRACT:** With the widespread penetration of high-proportion renewable energy in integrated energy systems, the integration of new energy sources such as wind and photovoltaic power has become an irreversible trend. However, the uncertainties introduced by these new energy sources significantly impact the system. To address the fluctuations in load and renewable energy generation, this paper proposes an optimization scheduling method that considers the dynamic supply-demand balance of flexibility. First, a quantitative analysis of the supply-demand models of various flexibility resources is conducted, and a mathematical model for the integrated energy system considering flexibility supply-demand balance is established. Next, the backbone particle swarm optimization (BBPSO) algorithm is used for solving the model. Finally, experimental comparisons between models that consider flexibility supply-demand balance and those that do not are conducted. The results indicate that the model considering flexibility supply-demand balance can significantly reduce fluctuations and enhance system stability.

**KEY WORDS:** flexibility supply-demand balance; integrated energy system; backbone particle swarm optimization (BBPSO)

**摘要:** 随着高比例可再生能源在综合能源系统中的广泛渗透, 风电和光伏等新能源的接入已成为不可逆转的趋势。然而, 新能源所带来的不确定性对系统的冲击和影响不容忽视。为应对负荷变化和可再生能源发电的波动性, 本文提出了一种考虑灵活性动态供需平衡的优化调度方法。首先, 对各类灵活性资源的供需模型进行了量化分析, 并建立了一个考虑灵活性供需平衡的综合能源系统数学模型; 其次, 采用骨干粒子群算法(BBPSO)进行求解; 最后, 通过实验对比分析了考虑灵活性供需平衡和未考虑灵活性供需平衡的模型。

结果表明, 考虑灵活性供需平衡的模型能够显著减少波动, 提高系统的稳定性。

**关键词:** 灵活性供需平衡; 综合能源系统; 骨干粒子群算法

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号

## 0 引言

在考虑高比例可再生能源接入的综合能源系统(integrated energy system, IES)优化中, 灵活性供需平衡是一个关键因素。高比例可再生能源的并网+带来了电力系统运行的不确定性和波动性, 这对系统的稳定性和经济性提出了新的挑战[1]。为了应对这些挑战, 需要建立一种新的灵活性平衡机制, 以实现源、网、荷、储等多方面的综合灵活性优化[2]。

对于灵活性的研究大部分侧重于灵活性评估指标的建立, 很少将其应用于优化调度中。文献[3]针对高比例新能源电力系统的灵活性不足问题, 建立了灵活性不足风险评价指标体系。文献[4]建立了考虑供需平衡的灵活性评价体系。文献[5]通过量化灵活性充裕度, 提出了可再生能源消纳的评估。

本文提出了一种考虑灵活性供需平衡的IES优化调度应用, 通过量化灵活性资源供需模型, 建立考虑灵活性供需平衡约束的综合能源系统数学模型, 并采用BBPSO算法进行求解, 通过对比原系统证明了该模型具有减少系统波动提高系统稳定性的作用。

## 1 问题描述

### 1.1 系统结构

考虑灵活性的IES结构如图1所示。电源端包括热电联产机组、风电机组以及主电网, 负责为整个系统提供必须的能量供应; 中间设备包括电热泵

基金项目: 本研由沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC220456)的资助。

Project Supported by the Shenyang Young and Middle-aged Science and Technology Innovation Talent Support Program (RC220456).

和电解槽,负责系统的能量转换,提高系统的灵活性;需求侧包括电负荷、热负荷以及氢市场,满足居民生活以及工业需求。

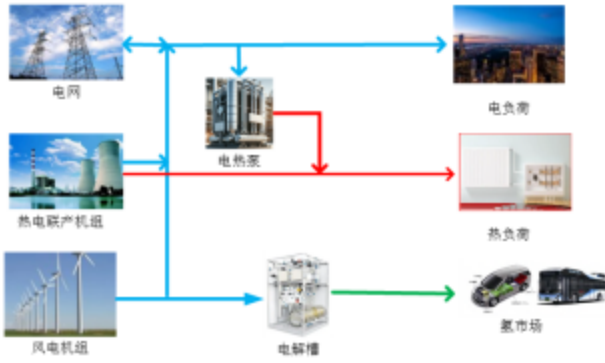


图1 考虑灵活性的综合能源系统结构图

Figure 1 Structure of a Flexible Integrated Energy System

## 1.2 灵活性供需模型量化分析

### 1.2.1 灵活性资源供给能力分析

系统内提供灵活性的资源包括热电联产机组、电热器以及电解槽,在一定时间内可提供一定的可调量来应对新能源的波动性。各类灵活性资源可提供的向上、向下灵活性以及一段时间内的动态灵活性如式(1-3)所示:

$$F_{up,t}^k = \min(P_{k,max} - P_{k,t}, \Delta P_k) \quad (1)$$

$$F_{down,t}^k = \min(P_{k,t} - P_{k,min}, \Delta P_k) \quad (2)$$

$$\Delta F_{k,t} = u_{k,t} \min(\Delta P_k, |P_{k,t} - P_{k,t-1}|) \quad (3)$$

式中,  $F_{up,t}^k$  表示第  $k$  类灵活性资源提供的向上灵活性;  $F_{down,t}^k$  表示第  $k$  类灵活性资源提供的向下灵活性;  $\Delta F_{k,t}$  表示在  $t$  时间内第  $k$  类灵活性资源提供的动态灵活性;  $P_{k,t}$  表示第  $k$  类灵活性资源在  $t$  时刻的出力;  $P_{k,max}$  与  $P_{k,min}$  分别表示第  $k$  类灵活性资源的最大出力和最小出力;  $\Delta P_k$  表示第  $k$  类灵活性资源的爬坡功率;  $u_{k,t}$  取值为  $\pm 1$ , 当  $P_{k,t} > P_{k,t-1}$  时,  $u_{k,t}$  取值为 1, 否则为 -1。

### 1.2.2 灵活性资源需求分析

#### (1) 新能源机组灵活性需求分析

由于风能、光伏能的那个不确定性,无法稳定可控,因此将其可控部分成为置信容量,而不可控部分成为不可置信容量。在灵活性调节时,仅对置信容量进行分析。新能源机组在  $t$  时刻的灵活性需求量  $D_{pw,t}$  以及  $t$  时间内动态灵活性需求量  $\Delta D_{pw,t}$  如式(4-5)所示:

$$D_{pw,t} = P_{pw,t} - \hat{P}_{pw,t} \quad (4)$$

$$\Delta D_{pw,t} = u_{pw,t} \min(D_{pw,t}, |\hat{P}_{pw,t} - \hat{P}_{pw,t-1}|) \quad (5)$$

式中,  $P_{pw,t}$  表示风电机组在  $t$  时刻的出力;  $\hat{P}_{pw,t}$  表示

风电机组置信容量;  $\hat{P}_{pw,t}$  表示  $t$  时刻的风电机组预测出力。

#### (2) 负荷灵活性需求分析

负荷也具有不可控性,其在  $t$  时刻的灵活性需求量  $D_{pl,t}$  以及  $t$  时间内动态灵活性需求量  $\Delta D_{pl,t}$  如式(6-7)所示:

$$D_{pl,t} = \mu L_{e,max} + (L_{e,max} - L_{e,min}) \quad (6)$$

$$\Delta D_{pl,t} = u_{l,t} \min(D_{pl,t}, |L_{e,t} - L_{e,t-1}|) \quad (7)$$

式中,  $L_{e,t}$  表示  $t$  时刻负荷需求大小;  $L_{e,max}$  与  $L_{e,min}$  分别表示负荷需求的最大值和最小值;  $\mu$  表示负荷备用系数。

### 1.2.3 灵活性供需平衡分析

灵活性供需平衡约束要求灵活性供给量大于灵活性需求量,且各类灵活性资源的供给量要在其上下限内,如式(8-9)所示:

$$\Delta F_{k,t} - \Delta D_{pw,t} + \Delta D_{pl,t} \quad (8)$$

$$F_{down,t}^k \leq \Delta F_{k,t} \leq F_{up,t}^k \quad (9)$$

## 2 综合能源系统调度优化模型

### 2.1 目标函数

考虑灵活性的综合能源系统调度优化以经济成本最低为目标,包括热电机组运行成本  $E_{CHP}$ 、弃风惩罚成本  $E_{pw}$ 、购电成本  $E_{grid}$ 、制氢收益  $E_{P2H}$ , 假设氢气全部售往氢市场,如式(10)所示:

$$\min F = E_{CHP} + E_{pw} + E_{grid} - E_{P2H} \quad (10)$$

$$E_{CHP} = u[P_e(t) + c_v P_h(t)]^2 + v[P_e(t) + c_v P_h(t)] + w \quad (11)$$

$$E_{pw} = \lambda_{pw} \cdot P_{pw,t}^{cur} \quad (12)$$

$$E_{grid} = \lambda_{grid} \cdot P_{grid,t} \quad (13)$$

$$E_{P2H} = \lambda_{P2H} \cdot \frac{P_{P2H,t}}{\mu_{P2H}} \quad (14)$$

式中,  $P_e(t)$  与  $P_h(t)$  分别表示热电联产机组  $t$  时刻的电出力和热出力;  $P_{pw,t}^{cur}$  表示  $t$  时刻的弃风功率;  $P_{grid}$  表示  $t$  时刻的购电功率;  $P_{P2H,t}$  表示  $t$  时刻电解槽消耗的电功率;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为热电联产机组的煤耗系数;  $\lambda_{pw}$ 、 $\lambda_{grid}$ 、 $\lambda_{P2H}$  分别表示弃风惩罚系数、购电电价、售氢价格;  $\mu_{P2H}$  表示电解槽消耗单位功率产生的氢气量。

### 2.2 约束条件

约束条件除了在前文中分析的灵活性供需平衡约束外还有以下几个:

#### 1) 电功率平衡:

$$P_{pw} + P_{e,t} + P_{grid,t} = P_{HP,t} + P_{P2H,t} + P_{l,t} \quad (15)$$

式中,  $P_{HP,t}$  与  $P_{l,t}$  分别表示  $t$  时刻的电热器消耗的功



率和电负荷需求。

2) 热功率平衡:

$$P_{h,t} + Q_{HP,t} = Q_{l,t} \quad (16)$$

式中,  $Q_{HP,t}$  表示  $t$  时刻的电热泵的热功率出力;  $Q_{l,t}$  表示  $t$  时刻的热负荷需求。

3) 热电机出力约束:

$$\begin{cases} P_{h,t}^{\min}(t) \leq P_{h,t}(t) \leq P_{h,t}^{\max}(t) \\ P_{e,t}(t) = k_t P_{h,t}(t) \end{cases} \quad (17)$$

式中,  $k_t$  表示热电机固定点热比。

4) 电解槽出力约束:

$$P_{P2H,\min} \leq P_{P2H,t} \leq P_{P2H,\max} \quad (18)$$

5) 电热泵出力约束:

$$\begin{cases} Q_{PH,\min} \leq Q_{PH,t} \leq Q_{PH,\max} \\ P_{PH,t} = \frac{Q_{PH,t}}{u_{HP}} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $u_{HP}$  表示电热泵的电热转换比。

6) 风电功率约束:

$$0 \leq P_{pw,t} \leq P_{pw,\max} \quad (20)$$

## 2.3 求解算法

粒子群算法(PSO)通过模拟鸟群觅食, 利用个体间的协作和信息共享, 逐步逼近问题的最优解, 适用于多种优化问题。本文采用粒子群算法的改进算法骨干粒子群算法(BBPSO)进行求解[6], 相较于 PSO 算法, 该算法省去了速度更新公式, 加快了收敛速度, 粒子位置更新公式如式(21)所示:

$$x_{i,j} = N\left(\frac{r_3 x p_{i,j} + (1-r_3) x g_{i,j}}{2}, |x p_{i,j} - x g_{i,j}|\right) \quad (21)$$

式中,  $r_3$  表示搜索因子;  $x p_{i,j}$  与  $x g_{i,j}$  分别表示个体引导者和全局引导者。

## 3 算例分析

### 3.1 数据输入

所建立模型应用在东北某综合能源系统。系统中包含一个 150MW 的热电联产机组, 一个 30MW 的电解槽、50MW 的电热泵、100MW 的风电场, 系统的典型日负荷需求曲线与风电预测曲线如图 2 所示。

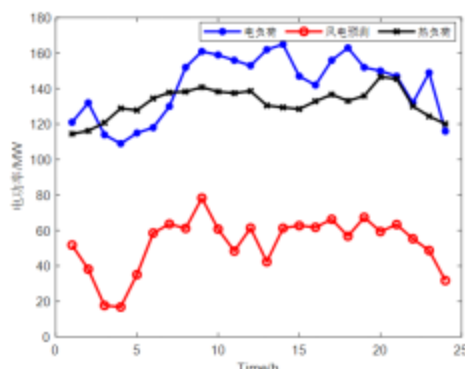


图 2 负荷曲线与风电预测曲线

Figure 2 Load Curve and Wind Power Forecast Curve

### 3.2 调度优化分析

采用 BBPSO 算法对考虑灵活性的综合能源系统调度优化模型进行求解, 并与原系统进行对比, 经济性运行数据如表 1 所示, S1 表示考虑灵活性供需平衡, S2 表示不考虑灵活性供需平衡。

表 1 不同经济成本对比

Table 1 Comparison of Different Economic Costs

|    | 热电运行<br>成本 | 弃风惩罚<br>成本 | 电网购电<br>成本 | 制氢收<br>益 | 总成本<br>万元 |
|----|------------|------------|------------|----------|-----------|
| S1 | 932.75     | 10.83      | 20.63      | 216.23   | 747.98    |
| S2 | 896.09     | 0.44       | 9.46       | 105.33   | 800.66    |

从表 1 中可以看出, 考虑灵活性供需平衡的综合能源系统在整体经济性上优于未考虑灵活性供需平衡的系统。尽管灵活性系统在热电运行和弃风惩罚成本上有所增加, 但通过提高制氢收益, 系统的总成本得以显著降低。为更直观的分析考虑灵活性供需平衡的优势, 对电功率平衡及机组出力进行分析, 如图 3 与图 4 所示。

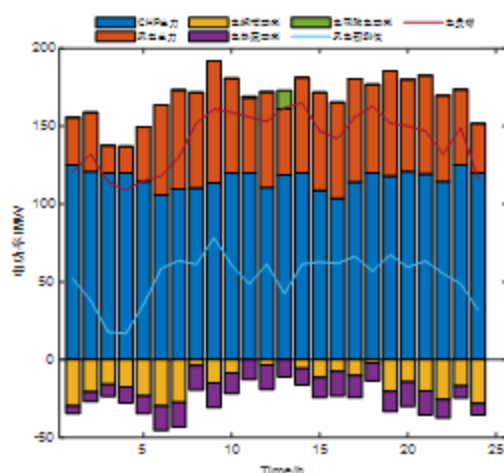


图 3 S1 方案下电功率平衡

Figure 3 Electric Power Balance under Scenario S1

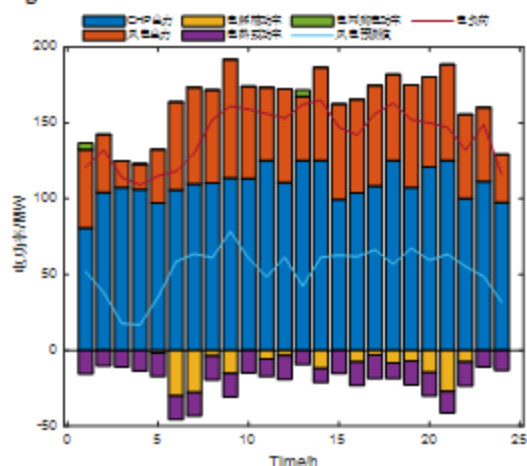


图 4 S2 方案下电功率平衡

Figure 4 Electric Power Balance under Scenario S2

对比图3与图4可知,在考虑灵活性供需平衡的方案下,热电联产机组与风电机组出力更加平滑,且波动性明显小于原系统,显示出了灵活性系统能够好的整合风电资源,降低风电波动性对系统带来的挑战。电解槽设备出力展示了在考虑灵活性供需平衡的方案下能够充分发挥电解槽作为灵活性资源的调节能力,具有削峰填谷作用,而在原系统中该设备的调节能力不明显。总体而言,考虑灵活性供需平衡的综合能源系统能够更有效地整合可再生能源资源,平衡电力供需,减少波动,提高系统的稳定性和效率。

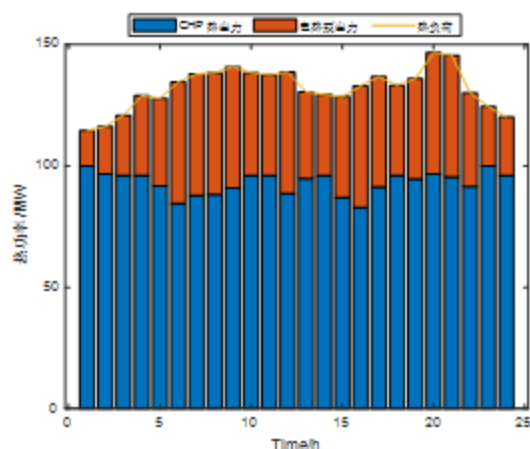


图5 S1方案下热功率平衡  
Figure 5 Thermal Power Balance under Scenario S1

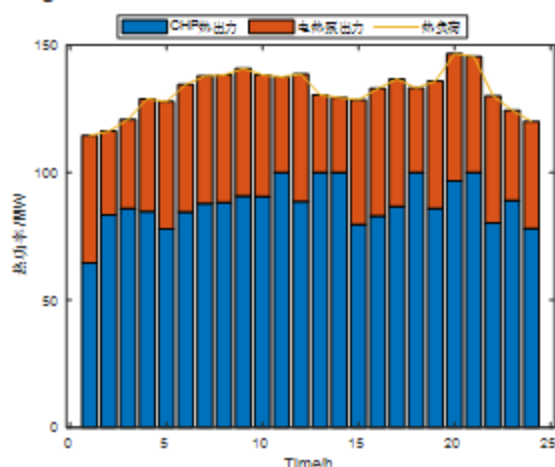


图6 S2方案下热功率平衡  
Figure 6 Thermal Power Balance under Scenario S2

图5与图6为S1与S2两种方案下的热功率平衡图。考虑灵活性供需平衡的综合能源系统能够更好地应对负荷变化,通过有效的调节手段实现热功率的平稳供应,提高了系统的运行效率和稳定性。而未考虑灵活性供需平衡的系统则在应对负荷变化时显得较为被动,运行效率和稳定性均有所不足。

### 3.3 不同容量配置的含电转氢 IES 经济性分析

为确定不同容量配置的电转氢设备对综合能

源系统优化调度的影响。电转氢设备容量分别取20MW、30MW、40MW进行运行分析,经济成本如表2所示。

表2 不同配置下经济成本对比

Table 2 Comparison of Economic Costs under Different Configurations

|      | 热电运行成本 | 弃风惩罚成本 | 电网购电成本 | 制氢收益   | 总成本    |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20MW | 937.1  | 69.85  | 54.67  | 182.5  | 879.12 |
| 30MW | 932.75 | 10.83  | 20.63  | 216.23 | 747.98 |
| 40MW | 910.10 | 7.054  | 63.07  | 175.02 | 805.21 |

分析表明,30MW电解槽容量配置实现了最经济高效的结果。通过最小化弃风惩罚成本和电网购电成本,同时最大化制氢收益,该容量配置实现了最低的总成本。

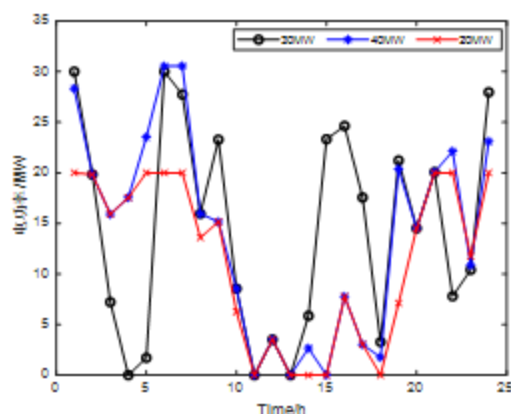


图7 P2H 出力曲线  
Figure 7 P2H Output Curve

图7为在不同容量配置下运行时电解槽的出力曲线图。通过曲线可以看出20MW容量配置的电解槽设备存在出力不满足系统消纳能力的问题,不利于系统的灵活性调节。而30MW与40MW的电解槽出力情况近似,30MW的电解槽已能满足系统灵活性要求,考虑到电解槽设备装机成本的问题,采用30MW的电解槽更为适宜。

## 4 总结

本文考虑了灵活性供需平衡对综合能源系统优化调度的影响进行了分析,采用BBPSO算法进行求解,并对不同容量配置的电解槽对优化运行的经济性进行了对比,得出了以下结论:

(1) 考虑了灵活性供需平衡的综合能源系统具有更好的稳定性和经济性,将电解槽作为灵活性资源的调节能力发挥到最好,实现了削峰填谷,降低了风电波动性对系统的影响。

(2) 通过对不同容量配置的电解槽设备下运

行经济性和设备出力能力的对比分析,在 30MW 时系统的经济运行成本最好且能够有效满足系统对灵活性的要求。

### 参考文献

- [1] 廖重庆,姚良忠.高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论框架[J].电力系统自动化,2017,41(09):2-11.
- [2] 曹崇相,李海波,乔颖.高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J].中国电机工程学报,2017,37(1):9-19.
- [3] 许莹,赵铁军,高小刚,等.高比例新能源电力系统调节资源灵活性不足风险分析[J/OL].中国电力,1-13.
- [4] 刘万亭,李华强,张弘历,等.考虑灵活性供需平衡的输电网扩展规划[J].电力系统自动化,2018,42(5):56-63.
- [5] 李则衡,陈磊,路晓敏,等.基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J].电网技术,2017,41(7):2187-2194.
- [6] Yanwen W, Peng C, Chen F. Security Assessment of Coal Mine Power Grid Voltage Based on an Improved AHP - FCE[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022(1): 5256285.



潘魁元

收稿日期:2024-06-15。

作者简介:

潘魁元(2001),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行,E-mail:12023201233@stu.sie.edu.cn;

孙天晖(1991),男,副教授,研究方向为电力系统分析与控制,E-mail:sunth@sie.edu.cn

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 含高比例光伏的低压配电网储能鲁棒配置策略

李文美, 申亚涛, 黄 纯, 谷紫文

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082)

## Robust Configuration Strategy for Energy Storage in Low Voltage Distribution Networks Containing a High Percentage of Photovoltaic

LI Wenmei, SHEN Yatao, HUANG Chun, GU Ziwen

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** Configuring energy storage in LV (low voltage) distribution networks containing a high percentage of PV (Photovoltaic) can improve the PV consumption capacity and power quality. In order to improve the practicality, economy and robustness of energy storage configuration, a robust configuration strategy for energy storage in LV distribution networks is proposed. First, a node voltage-power three-phase linear model is constructed to get rid of the dependence of energy storage configuration on network topology and line parameters; then, based on the three-phase linear model, the comprehensive voltage sensitivity of each node is calculated to determine the energy storage installation nodes; then, with the objective of minimizing the total operating cost and voltage deviation of multiple typical day scenes, the energy storage configuration model is established by considering the demand response and the four-quadrant operating capability for energy storage; then, the original model is converted to a two-stage robust optimization model by using budget uncertainty set to inscribe the source-load output uncertainty, and solved by C&CG algorithm to obtain the energy storage configuration scheme. Finally, the effectiveness of the proposed strategy is verified using a LV 21-node distribution network as an example.

**KEY WORDS:** voltage sensitivity; load demand response; four-quadrant operation of energy storage; robust configuration of energy storage; new power system

**摘要:** 在含高比例光伏的低压配电网中配置储能可提高其光伏消纳能力和电能质量。为提高储能配置的实用性、经济性和鲁棒性, 提出低压配电网储能鲁棒配置策略。首先, 构造节点电压-功率三相线性模型, 摆脱储能配置对网络拓扑和线路参数的依赖; 然后, 基于三相线性模型, 计算节点综合电压灵敏度确定储能安装节点; 接着, 以多个典型日场景的总运行成本和电压偏差最小为目标, 考虑负荷需求响应和储能四象限运行能力建立储能优化配置模型; 然后, 采用预算不

Project (2020GK1010)。

确定集刻画源荷出力不确定性, 将原模型转换为两阶段鲁棒优化模型, 并采用列与约束生成算法(column and constraint generation, C&CG)求解, 得到储能配置方案。最后, 以低压21节点配电网为例验证了所提策略有效性。

**关键词:** 电压灵敏度; 负荷需求响应; 储能四象限运行; 储能鲁棒配置; 新型电力系统

## 0 引言

新型电力系统背景下, 低压配网中分布式光伏渗透率不断提高, 导致功率倒送越限、电压越限等问题, 在配网侧接入储能可有效解决上述问题。然而, 低压配网存在源荷出力不确定、拓扑和线路参数不全等问题, 且储能投资成本仍较高。因此, 如何在低压配网中合理经济地配置储能成为亟需解决的问题。

储能优化配置问题总体上分为选址和定容两个步骤。在储能选址方面, 文献[1-3]分别通过计算节点综合电压灵敏度、节点综合损耗灵敏度和节点综合脆弱性指标确定储能安装位置, 有效加快了储能配置的求解效率, 并提高配网经济性和稳定性。但上述文献并未考虑到低压配网拓扑和线路参数未知的实际工况, 因此有必要提出一种不依赖网络拓扑和线路参数的储能选址方法。

其次, 在储能定容方面, 文献[4-5]分别考虑价格型和激励性需求响应进行储能配置, 有效提高了储能配置的经济性; 文献[6]考虑储能四象限运行能力进行储能配置, 有效提升了系统电压质量。但文献[4-6]仅单独考虑需求响应或储能四象限运行能力进行储能配置, 而低压配网可调资源较少, 为提高系统经济性和稳定性, 应同时考虑需求响应和储能四象限运行能力进行储能配置。

此外, 对配电网进行储能配置时需考虑分布

式光伏出力及负荷的不确定性。文献[7]采用多面体不确定集刻画源荷出力不确定性,构建储能鲁棒配置模型,但其仅基于单一源荷典型日场景,并未考虑到长时间尺度下源荷出力的季节性差异;文献[8]考虑季节性差异,基于多个源荷典型日场景进行储能配置,但并未考虑到各典型日场景的源荷不确定性。为此,文献[9]首先对全年运行数据聚类得到长时间尺度下的源荷典型日场景,然后采用端点场景法筛选各典型场景在短时间尺度下的不确定出力集合,从而建立储能鲁棒配置模型。整体来看,目前考虑多时间尺度的源荷不确定性进行储能配置的研究较少。

针对上述问题,提出一种含高比例光伏的低压配电网储能鲁棒配置策略。首先,构建低压配电网节点电压-功率的三相线性模型;其次,基于三相线性模型计算节点综合电压灵敏度确定储能安装节点;接着,以各典型日场景的总运行成本和电压偏差最小为目标,考虑负荷需求响应和储能四象限运行能力建立低压配电网储能优化配置模型;然后,使用预算不确定集刻画各典型日场景的源荷出力不确定性,将原模型转换为两阶段鲁棒优化模型,采用C&CG算法求解,并使用交替优化过程算法(Alternating Optimization Procedure, AOP)将子问题线性化,得到储能配置方案。最后,以低压21节点配电网为例验证了所提策略的经济性和鲁棒性。

## 1 三相配电网电压估算模型构建

低压配电网通常呈辐射状结构运行,可采用LinDistFlow模型描述其支路潮流方程<sup>[10-11]</sup>:

$$\begin{cases} S_{ik} = -s_k + \sum_{h:k \rightarrow h} S_{hk} \\ v_i = v_i - 2\text{Re}[\tilde{Z}_{ik}^* S_{ik}] \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\tilde{Z}_{ik} = \text{diag}(\lambda^*) Z_{ik} \text{diag}(\lambda) \quad (2)$$

式中:  $S_{ik} = P_{ik} + jQ_{ik}$ , 为支路  $ik$  的三相传输功率, 其中,  $P_{ik}$  和  $Q_{ik}$  分别为有功和无功功率;  $s_k = p_k + jq_k$ , 为注入节点  $k$  的三相功率, 其中,  $p_k$  和  $q_k$  为注入节点  $k$  的有功和无功功率;  $v_i$  为节点  $i$  三相电压幅值的平方;  $Z_{ik}$  为支路  $ik$  的三相阻抗矩阵;  $\lambda = [1, \lambda, \lambda^2]^T$ , 其中,  $\lambda$  为常数, 即  $e^{j(2\pi/3)}$ 。

根据文献[11], 可将式(1)转换为:

$$v = Rp + Xq + v_0 \mathbf{1}_{3N} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R = 2M \text{Re}(\text{bdiag}(\tilde{Z}))M^T \\ X = 2M \text{Im}(\text{bdiag}(\tilde{Z}))M^T \\ M = F(I_3 \otimes A^{-1})F^T \\ F = [I_3 \otimes e_1^T; \dots; I_3 \otimes e_N^T] \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $v$  为节点  $1 \sim N$  的三相电压幅值平方组成的列向量,  $N$  为总节点数;  $p$  和  $q$  为注入节点  $1 \sim N$  的三相有功和无功功率所组成的列向量;  $v_0$  为 0 号节点电压幅值的平方;  $\mathbf{1}_{3N}$  为  $3N \times 1$  的全 1 向量;  $\tilde{Z}$  为全部支路的等效阻抗矩阵;  $A$  为支路-节点关联矩阵;  $I_3$  为  $3 \times 3$  的单位矩阵;  $e_n$  为单位矩阵  $I_N$  的第  $n$  列。

当低压配网拓扑和线路参数已知时, 可直接利用式(4)计算式(3)参数  $R$ 、 $X$ ; 而低压配网拓扑和线路参数通常未知, 为此, 本文基于历史电压和历史有功、无功功率数据, 采用最小二乘法估算式(3)参数  $R$ 、 $X$ , 构建无需网络拓扑和线路参数的配网三相线性模型, 用以计算配网各节点电压。

## 2 基于节点综合电压灵敏度的储能选址

为提高储能配置模型的求解效率, 本文选取综合电压灵敏度最大的节点作为储能安装节点。

结合式(3), 无需网络拓扑和线路参数, 节点电压与节点注入有功、无功功率的耦合关系可表述为:

$$\Delta V = S_{p-u} \Delta p + S_{q-u} \Delta q \quad (5)$$

$$\begin{cases} S_{p-u,j}^{ml} = \frac{\partial V_i^m}{\partial p_j^l} = \frac{\partial v_i^m}{\partial p_j^l} \cdot \frac{\partial V_i^m}{\partial v_i^m} = R_{ij}^{ml} \cdot \frac{1}{2V_i^m} \\ S_{q-u,j}^{ml} = \frac{\partial V_i^m}{\partial q_j^l} = \frac{\partial v_i^m}{\partial q_j^l} \cdot \frac{\partial V_i^m}{\partial v_i^m} = X_{ij}^{ml} \cdot \frac{1}{2V_i^m} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $S_{p-u}$ 、 $S_{q-u}$  分别为节点有功-电压和节点无功-电压灵敏度矩阵;  $\Delta V$ 、 $\Delta p$  和  $\Delta q$  分别为节点电压幅值变化量、节点有功和无功功率变化量;  $S_{p-u,j}^{ml}$ 、 $S_{q-u,j}^{ml}$  分别为  $j$  节点  $l$  相有功  $p_j^l$ 、无功  $q_j^l$  变化对  $i$  节点  $m$  相电压  $V_i^m$  的影响,  $S_{p-u,j}^{ml} \in S_{p-u}$ ,  $S_{q-u,j}^{ml} \in S_{q-u}$ ;  $v_i^m$  为  $V_i^m$  的平方值;  $R_{ij}^{ml} \in R$ 、 $X_{ij}^{ml} \in X$ 。

基于式(5), 参考文献[1],  $j$  节点的综合电压灵敏度  $Z_j$  计算公式为:

$$Z_j = \sum_{l \in \Phi} (Z_{p-u,j}^l + Z_{q-u,j}^l) / 3 \quad (7)$$

式中:  $Z_{p-u,j}^l$  和  $Z_{q-u,j}^l$  分别为  $j$  节点  $l$  相有功、无功变化对系统的综合电压灵敏度;  $\Phi$  为相位集合。

以  $Z_{p-u,j}^l$  为例, 其计算方法如下:



$$\begin{cases} Z_{p-u,j}^l = \sum_{i \in I} Z_{p-u,j,i}^l \\ Z_{p-u,j,i}^l = \left| \sum_{m \in \Phi_{i,j}} Z_{p-u,j,i}^{ml} - \sum_{m \in \Phi_{i,j}} Z_{p-u,j,i}^{ml} \right| \\ Z_{p-u,j,i}^{ml} = S_{p-u,j,i}^{ml} \times (V_{i,j}^m - V_{ref,i,j}^m) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $Z_{p-u,j}^l$  为  $t$  时段  $j$  节点  $l$  相有功变化对系统的综合电压灵敏度;  $Z_{p-u,j,i}^l$  为  $t$  时段  $j$  节点  $l$  相有功变化对  $i$  节点  $m$  相的综合电压灵敏度;  $V_{i,j}^m$  和  $V_{ref,i,j}^m$  为  $t$  时段  $i$  节点  $m$  相的电压幅值和参考电压幅值;  $I$  为时间集合;  $N$  为节点集合;  $\Phi_{i,j}$ 、 $\Phi_{i,j}$  分别为  $t$  时段  $i$  节点的电压偏高、偏低的相位集合。

### 3 低压配电网储能优化配置模型

模型中下标  $i$  表示  $i$  节点, 下标  $t$  表示  $t$  时段, 下标  $d$  表示第  $d$  典型日, 上标  $m$  表示  $m$  相。

#### 3.1 负荷需求响应模型

本文考虑可中断负荷和可转移负荷两种激励型需求响应负荷。

##### (1) 可中断负荷约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{in,j,t}^m \leq \beta_{in,j,t}^m P_{inmax,j,t}^m \\ \sum_{i \in I} \beta_{in,j,t}^m \leq N_{in,j,t}^m \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\beta_{in,j,t}^m$  为可中断负荷的 0-1 状态变量, 为 1 表示削减;  $P_{in,j,t}^m$ 、 $P_{inmax,j,t}^m$  和  $N_{in,j,t}^m$  分别为可中断负荷的实际中断值、最大可中断值和最大可中断次数。

##### (2) 可转移负荷约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{in,j,t}^m \leq \beta_{in,j,t}^m P_{inmax,j,t}^m \\ 0 \leq P_{out,j,t}^m \leq (1 - \beta_{in,j,t}^m) P_{outmax,j,t}^m \\ \sum_{i \in I} P_{in,j,t}^m = \sum_{i \in I} P_{out,j,t}^m \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\beta_{in,j,t}^m$  为可转移负荷的 0-1 状态变量, 为 1 表示转入;  $P_{in,j,t}^m$  和  $P_{out,j,t}^m$  分别为节点的实际转入负荷和实际转出负荷;  $P_{inmax,j,t}^m$  和  $P_{outmax,j,t}^m$  为节点的最大可转入负荷和最大可转出负荷。

##### (3) 需求响应后总负荷

$$\begin{cases} P_{DR,j,t}^m = P_{load,j,t}^m - P_{in,j,t}^m + (P_{in,j,t}^m - P_{out,j,t}^m) \\ Q_{DR,j,t}^m = P_{DR,j,t}^m \tan \varphi_{load} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $P_{DR,j,t}^m$ 、 $Q_{DR,j,t}^m$  为需求响应后的负荷有功和无功;  $P_{load,j,t}^m$  为负荷预测值;  $\varphi_{load}$  为负荷功率因数角。

#### 3.2 目标函数

为提高低压配电网的运行经济性和可靠性, 本文以总运行成本  $f_1$  和总电压偏差  $f_2$  最小为优化目标进行储能配置。

##### (1) 总运行成本 $f_1$

总运行成本  $f_1$  包括储能投资运维成本  $C_{ess}$  和系统运行成本  $C_{op}$ 。

$$f_1 = C_{ess} + C_{op} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C_{ess} = \sum_{i \in N} \sum_{m \in \Phi} (a(c_i E_{ess,j}^m + c_g S_{ess,j}^m) + c_{gm} S_{ess,j}^m) / 365 \\ a = r(1+r)^L / ((1+r)^L - 1) \end{cases} \quad (13)$$

$$C_{op} = \sum_{d \in D} K_d (C_{grid,d} + C_{pvcu,d} + C_{DR,d}) \quad (14)$$

$$\begin{cases} C_{grid} = \sum_{i \in I} c_{buy,j} \sum_{m \in \Phi} P_{buy,j}^m \\ C_{pvcu} = c_{pvcu} \sum_{i \in I} \sum_{m \in \Phi} \sum_{j \in N} (P_{pvfore,j,t}^m - P_{pv,j,t}^m) \\ C_{DR} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in \Phi} \sum_{j \in N} (c_{in} P_{in,j,t}^m + c_{tran} (P_{in,j,t}^m + P_{out,j,t}^m)) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $c_i$  和  $c_g$  分别为储能单位容量和功率的投资成本;  $c_{gm}$  为储能单位功率年运维成本;  $E_{ess,j}^m$  和  $S_{ess,j}^m$  为储能的额定容量和额定视在功率;  $r$  和  $L$  分别为贴现率和储能运行年限;  $D$  为典型日集合;  $K_d$  为第  $d$  典型日在全年所占比例;  $C_{grid,d}$ 、 $C_{pvcu,d}$  和  $C_{DR,d}$  分别为第  $d$  典型日系统的购电成本、弃光惩罚成本和需求响应成本, 以某个典型日为例, 其计算公式如式(15)所示;  $c_{buy,j}$  为系统购电电价;  $P_{buy,j}^m$  为系统购电功率;  $c_{pvcu}$  为弃光惩罚成本系数;  $P_{pvfore,j,t}^m$  和  $P_{pv,j,t}^m$  分别为光伏预测值和实际出力值;  $c_{in}$  和  $c_{tran}$  分别为可中断负荷和可转移负荷的单位调度成本。

##### (2) 总电压偏差

$$f_2 = \sum_{i \in I} \sum_{m \in \Phi} \sum_{j \in N} |V_{i,j,t}^m - V_{i,j,t}^{ref}| \quad (16)$$

式中:  $V_{i,j,t}^m$  和  $V_{i,j,t}^{ref}$  分别为电压幅值平方和参考值。

#### 3.3 约束条件

##### 3.3.1 储能安装约束

###### (1) 储能安装容量约束

$$\begin{cases} 0 \leq E_{ess,j}^m \leq E_{ess,max}^m \\ W_{min} E_{ess,j}^m \leq S_{ess,j}^m \leq W_{max} E_{ess,j}^m \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $E_{ess,max}^m$  为储能最大安装容量;  $W_{max}$ 、 $W_{min}$  分别为储能的能量和最小能量倍率。

在含高比例光伏的低压配电网配置储能的主要目的是提高系统光伏消纳能力。因此, 配置储能时应考虑系统的光伏消纳率要求。

###### (2) 分布式光伏消纳率约束

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in \Phi} \sum_{j \in N} P_{pv,d,j,t}^m / \sum_{i \in I} \sum_{m \in \Phi} \sum_{j \in N} P_{pvfore,d,j,t}^m \geq 0.95 \quad (18)$$

##### 3.3.2 储能安装后系统运行约束

以某典型日为例, 低压配网的运行约束为:

###### (1) 潮流约束

$$\begin{cases} v_t = R(P_{pv,t} + P_{pd,t} - P_{pc,t} - P_{DR,t}) \\ \quad + X(Q_{ess,t} - Q_{DR,t}) + v_0 \mathbf{1}_{3N} \\ P_{grid,t}^m + \sum_{j \in N} (P_{pv,j,t}^m + P_{pd,j,t}^m - P_{pc,j,t}^m - P_{DR,j,t}^m) = 0 \\ Q_{grid,t}^m + \sum_{j \in N} (Q_{ess,j,t}^m - Q_{DR,j,t}^m) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $v_t$ 、 $P_{pv,t}$ 、 $P_{pd,t}$ 、 $P_{pc,t}$ 、 $P_{DR,t}$ 、 $Q_{ess,t}$  和  $Q_{DR,t}$  分别为低压配网内全部用户在  $t$  时段的电压幅值平方、光伏有功出力、储能放电功率、储能充电功率、需求响应后负荷有功、储能无功功率和需求响应后负荷无功, 以上矩阵均为  $3N \times 1$  矩阵;  $P_{grid,t}^m$  和  $Q_{grid,t}^m$  分别为低压配网与上级电网交换的有功和无功;  $P_{pc,j,t}^m$ 、 $P_{pd,j,t}^m$  和  $Q_{ess,j,t}^m$  分别为储能的充放电功率和无功功率;  $P_{pv,j,t}^m \in P_{pv,t}^m$ ,  $P_{pd,j,t}^m \in P_{pd,t}^m$ ,  $P_{pc,j,t}^m \in P_{pc,t}^m$ ,  $P_{DR,j,t}^m \in P_{DR,t}^m$ ,  $Q_{ess,j,t}^m \in Q_{ess,t}^m$ ,  $Q_{DR,j,t}^m \in Q_{DR,t}^m$ 。

(2) 分布式光伏约束

$$0 \leq P_{pv,j,t}^m \leq P_{pvfmax,j,t}^m \quad (20)$$

(3) 与上级电网交换功率约束

$$\begin{cases} P_{grid,t}^m \leq P_{grid,t}^m \leq P_{grid,max}^m \\ Q_{grid,t}^m \leq Q_{grid,t}^m \leq Q_{grid,max}^m \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $P_{grid,max}^m$  和  $P_{grid,min}^m$ 、 $Q_{grid,max}^m$  和  $Q_{grid,min}^m$  分别为系统与上级电网交换的有功和无功功率上下限值。

(4) 电压安全约束

$$(V_{i,min}^m)^2 \leq V_{i,t}^m \leq (V_{i,max}^m)^2 \quad (22)$$

式中:  $V_{i,t}^m \in v_t$ ;  $V_{i,min}^m$  和  $V_{i,max}^m$  为电压上下限值。

(5) 电压三相不平衡度约束

参考文献[12], 电压三相不平衡度约束具体为:

$$\left| V_{i,t}^m - (\sum_{m \in \Phi} V_{i,t}^m / 3) \right| / (\sum_{m \in \Phi} V_{i,t}^m / 3) \leq 6\% \quad (23)$$

(6) 储能充放电约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{pd,j,t}^m \leq \beta_{pd,j,t}^m S_{ess,t}^m \\ 0 \leq P_{pc,j,t}^m \leq (1 - \beta_{pd,j,t}^m) S_{ess,t}^m \\ |Q_{ess,j,t}^m| \leq (P_{pd,j,t}^m + P_{pc,j,t}^m) \tan \varphi_{ess} \\ (P_{pd,j,t}^m + P_{pc,j,t}^m)^2 + (Q_{ess,j,t}^m)^2 \leq (S_{ess,t}^m)^2 \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $\beta_{pd,j,t}^m$  为 0-1 变量, 为 1 表示储能处于放电状态;  $\varphi_{ess}$  为储能的功率因数角。

(7) 储能电量约束

$$\begin{cases} E_{i,0}^m = SOC_{ini} E_{ess,t}^m \\ E_{i,0}^m = E_{i,T}^m \\ E_{i,t}^m = E_{i,t-1}^m + (P_{pc,j,t}^m \cdot \eta_{pc} - P_{pd,j,t}^m / \eta_{pd}) \cdot \Delta T \\ SOC_{min} E_{ess,t}^m \leq E_{i,t}^m \leq SOC_{max} E_{ess,t}^m \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $E_{i,t}^m$ 、 $E_{i,0}^m$  和  $E_{i,T}^m$  分别为储能在  $t$  时段和运行

周期始末时段的存储电量;  $SOC_{ini}$ 、 $SOC_{max}$  和  $SOC_{min}$  分别为储能荷电状态的初始值和上下限值;  $\eta_{pc}$  和  $\eta_{pd}$  为储能充放电效率;  $\Delta T$  为运行时段间隔。

此外, 式(26)的前两行存在待求变量相乘的非线性项, 可采用大  $M$  法将其线性化; 式(26)的第四行存在平方项, 可采用圆的内接正多边形线性化。

### 3.4 目标函数归一化

目标函数中总运行成本  $f_1$  和总电压偏差  $f_2$  的量纲不一致, 将原目标函数进行如下归一化处理:

$$\min w_1 \frac{f_1 - f_{11}}{f_{21} - f_{11}} + w_2 \frac{f_2 - f_{22}}{f_{12} - f_{22}} \quad (26)$$

式中:  $w_1$  和  $w_2$  为权重系数;  $f_{11}$  和  $f_{12}$  分别为仅以总运行成本最小为目标时的总运行成本值和总电压偏差值;  $f_{21}$  和  $f_{22}$  分别为仅以总电压偏差最小为目标时的总运行成本值和总电压偏差值。

综上, 本文以式(26)为目标函数, 以式(9)~(11)、式(17)~(25)为约束条件, 构建含高比例光伏的低压配电网储能优化配置模型。

## 4 两阶段鲁棒优化模型

### 4.1 源荷不确定区间建模

为提高储能优化配置的鲁棒性, 从长、短两个时间尺度考虑光伏出力和负荷的不确定性。在长时间尺度, 考虑季节性差异, 采用  $K$ -means 算法聚类得到  $D$  个典型日的源荷出力场景; 在短时间尺度, 考虑源荷预测误差的影响, 以各典型日场景的源荷值为基准, 采用预算不确定集描述源荷不确定性。

以某典型日为例, 其在短时间尺度的源荷不确定区间  $U$  为:

$$U = \begin{cases} u = \tilde{P}_{a,j,t}^m \\ \tilde{P}_{a,j,t}^m = P_{a,j,t}^m + \beta_{a,j,t}^{m,+} \sigma_{a,j,t}^m P_{a,j,t}^m - \beta_{a,j,t}^{m,-} \sigma_{a,j,t}^m P_{a,j,t}^m \\ \beta_{a,j,t}^{m,+} + \beta_{a,j,t}^{m,-} \leq 1 \\ \sum_{j \in J} (\beta_{a,j,t}^{m,+} + \beta_{a,j,t}^{m,-}) \leq K_a \\ i = 1, 2, \dots, N, t = 1, 2, \dots, T, m = a, b, c \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $a \in (\text{pv}, \text{load})$ ,  $\tilde{P}_{a,j,t}^m$ 、 $P_{a,j,t}^m$  和  $\sigma_{a,j,t}^m$  分别为源荷不确定变量、源荷预测值和源荷波动系数;  $\beta_{a,j,t}^{m,+}$  和  $\beta_{a,j,t}^{m,-}$  为源荷波动状态的 0-1 变量,  $\beta_{a,j,t}^{m,+}$  为 1 表示向上波动,  $\beta_{a,j,t}^{m,-}$  为 1 表示向下波动;  $K_a$  为源荷波动的不确定预算参数。

### 4.2 两阶段鲁棒优化模型

基于上述源荷不确定区间建模, 本文将第 3 节的不确定性模型转化为两阶段鲁棒优化模型。

$$\min_x b^T x + \max_{u \in U} \min_{y \in Q(x,u)} c^T y \quad (28)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} Ax \geq a \\ Dy \geq d \\ Ky = h \\ Fx + Gy \geq f \\ I_u y = u \end{cases} \quad (29)$$

式中： $b$ 和 $c$ 分别表示式(26)中储能配置成本和其他目标函数对应的系数矩阵； $A$ 、 $D$ 、 $K$ 、 $F$ 、 $G$ 和 $I_u$ 为相应约束条件下的系数矩阵； $a$ 、 $d$ 、 $h$ 、 $f$ 为系统参数构成的列向量； $x$ 和 $y$ 为优化变量，用变量 $x$ 表征第一阶段待求变量，包括储能额定容量 $E_{\text{ess},j}^m$ 和额定视在功率 $S_{\text{ess},j}^m$ 、离散变量 $\beta_{p,d,i,j}^m$ 、 $\beta_{m,u,j,j}^m$ 和 $\beta_{m,l,j,j}^m$ ；用变量 $y$ 表征第二阶段剩余待求变量。

#### 4.3 C&CG 算法

为求解上述两阶段鲁棒优化模型，采用C&CG算法将模型拆解为主问题和子问题迭代求解。

##### 4.3.1 主问题

$$\begin{cases} \min_x & b^T x + \gamma \\ \text{s.t.} & Ax \geq a \\ & \gamma \geq c^T y_s \quad \forall s \leq k \\ & Dy_s \geq d \quad \forall s \leq k \\ & Ky_s = h \quad \forall s \leq k \\ & Fx + Gy_s \geq f \quad \forall s \leq k \\ & I_u y_s = u^* \quad \forall s \leq k \end{cases} \quad (30)$$

式中： $k$ 为当前迭代次数； $y_s$ 为第 $s$ 次迭代时子问题的解； $u^*$ 为第 $s$ 次迭代后得到的源荷最恶劣场景。

##### 4.3.2 子问题

$$\begin{cases} \max_{y \in U} \min_{y \in Q(x^*, x)} & c^T y \\ \text{s.t.} & Dy \geq d \quad (\eta_1) \\ & Ky = h \quad (\eta_2) \\ & Fx^* + Gy \geq f \quad (\eta_3) \\ & I_u y = u \quad (\eta_4) \end{cases} \quad (31)$$

式中： $x^*$ 为主问题求得的第一阶段变量最优解； $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 、 $\eta_3$ 、 $\eta_4$ 为子问题中各约束对应的对偶变量。

子问题式(31)为max-min形式的双层优化问题，可根据强对偶理论将其转换为单层max模型。

$$\begin{cases} \max_{\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4} & L = d^T \eta_1 + h^T \eta_2 + (f - Fx^*)^T \eta_3 + u^T \eta_4 \\ \text{s.t.} & D^T \eta_1 + K^T \eta_2 + G^T \eta_3 + I_u^T \eta_4 \leq c \\ & \eta_1, \eta_3, \eta_4 \geq 0 \end{cases} \quad (32)$$

然而，式(32)中的目标函数包含非线性项 $u^T \eta_4$ ，这使子问题难以直接求解。为此，采用AOP算法将子问题分解为迭代的线性问题<sup>[13]</sup>。具体步骤如下：

步骤1、给定一组 $u^*$ 作为初始源荷最恶劣场景。

步骤2、求解源荷最恶劣场景为 $u^*$ 时的子问题最优解，得到目标函数值 $L$ 及对偶变量

$\eta_1^*$ 、 $\eta_2^*$ 、 $\eta_3^*$ 、 $\eta_4^*$ 的取值。

步骤3、若目标函数值 $L < \infty$ ，求解对偶变量为 $\eta_1^*$ 、 $\eta_2^*$ 、 $\eta_3^*$ 、 $\eta_4^*$ 的子问题最优解，得到目标函数值 $L^*$ 及源荷最恶劣场景 $u^*$ 的取值，否则令 $L^* = \infty$ 。

步骤4、若 $L^* = \infty$ 或 $|L^* - L|/L \leq \varepsilon$  ( $\varepsilon$ 为收敛精度)，迭代结束，返回子问题的目标函数值 $L^*$ 和源荷最恶劣场景取值 $u^*$ 。否则，转到步骤2继续求解。

##### 4.3.3 C&CG 算法流程

将两阶段鲁棒优化模型分解为混合整数线性形式的主问题和子问题后，便可采用C&CG算法进行迭代求解，具体步骤如下：

步骤1、给定一组 $u_k^*$ 作为初始的源荷最恶劣场景。设定目标函数上界 $UB = +\infty$ ，目标函数下界 $LB = -\infty$ ，迭代次数 $k=1$ 。

步骤2、求解源荷最恶劣场景为 $u_k^*$ 时的主问题，获得最优解 $(x_k^*, \gamma_k^*, y_1^*, \dots, y_k^*)$ ，然后更新下界值 $LB = b^T x_k^* + \gamma_k^*$ 。

步骤3、将主问题所得解 $x_k^*$ 代入子问题，并采用AOP算法求解子问题，获得最优解 $(L_k^*, u_{k+1}^*)$ ，然后更新上界值 $UB = \min\{UB, b^T x_k^* + L_k^*\}$ 。

步骤4、若 $UB - LB \leq \tau$  ( $\tau$ 为收敛精度)，迭代结束，返回最优解 $(x_k^*, y_k^*)$ ，否则在主问题中添加变量 $y_{k+1}$ 及约束条件式(30)，并令 $k = k+1$ ，转到步骤2继续求解。

## 5 算例分析

### 5.1 算例系统介绍

采用图1所示的220V低压配网验证所提策略<sup>[14]</sup>。

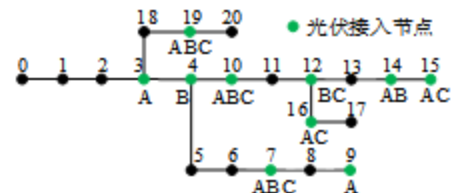


图1 低压21节点配电网拓扑

Fig. 1 LV 21-node distribution network topology

弃光惩罚成本 $c_{\text{pvpu}}$ 设为0.6元/kWh；电压安全范围设为 $[0.93, 1.07]$ pu；各相光伏装机容量均为10kW；储能和负荷的功率因数均设为0.95；权重系数 $w_1$ 和 $w_2$ 设为0.5和0.5；光伏、负荷波动范围 $\sigma_{\text{pv},i,t}^m$ 、 $\sigma_{\text{load},i,t}^m$ 均为5%；光伏、负荷不确定预算参数 $K_{\text{pv}}$ 、 $K_{\text{load}}$ 分别为6和12；采用K-means算法对某地区全年光伏和负荷数据聚类生成的4个源荷典型日场景、需求响应负荷以及储能单位配置成本等相关参数见链接<sup>[15]</sup>。

### 5.2 配网三相线性模型精度检验

三相线性模型的电压估算误差分布如图2所示。

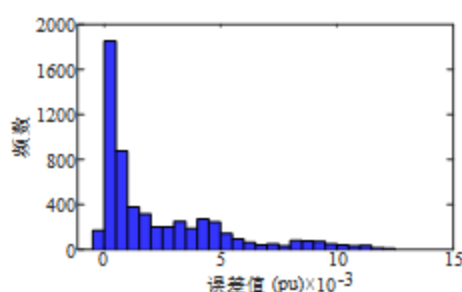


图2 电压估计误差分布情况

Fig. 2 Distribution of voltage estimation errors

通过最小二乘法求得配网三相线性模型参数  $R$ 、 $X$  后，对模型进行精度校验，即使用该模型计算节点注入功率已知时的节点电压，将其与潮流计算所得电压值进行比较，得到图2所示的电压估算误差分布。可以看出，该模型的电压估计误差均小于  $0.015\text{pu}$ ，证明电压估算模型具有较高精度。

### 5.3 储能选址结果分析

节点综合电压灵敏度计算结果如图3所示。

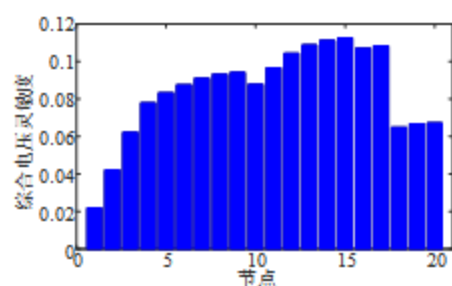


图3 节点综合电压灵敏度

Fig. 3 Node comprehensive voltage sensitivity

由图3可知，节点15的综合电压灵敏度最大，结合图1可知，节点15为线路末端节点，理论上放射状网络中线路末端节点具有更高的电压灵敏度，这也验证了所提不依赖网络拓扑和线路参数的储能选址方法的正确性和有效性。从保证节点电压质量的角度出发，在节点15安装储能并对其充放电功率进行调节具备更高的调压效率，能够利用较少的储能功率调节量实现调压，提高系统电压质量。因此，选取节点15作为储能选址的备选节点。

### 5.4 储能配置结果分析

为验证所提储能优化配置策略的经济性和有效性，设置以下四种方案进行对比：

方案1：不含储能的低压配电网运行模型。

方案2：考虑负荷需求响应，考虑储能四象限运行能力的储能鲁棒配置模型，即本文模型。

方案3：与方案2一致，但储能只允许输出或吸收有功功率。

方案4：与方案2一致，但不含负荷需求响应。

方案1、2、3、4的结果对比如表1所示。

| 表1 4种方案结果对比<br>Table1 Comparison of the results of 4 schemes |        |           |           |           |
|--------------------------------------------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|
|                                                              | 方案1    | 方案2       | 方案3       | 方案4       |
| $E_{\text{em}}/\text{kWh}$                                   | /      | 100/80/80 | 100/80/80 | 120/90/90 |
| $S_{\text{em}}/\text{kVA}$                                   | /      | 25/20/20  | 25/20/20  | 30/23/23  |
| 电压偏差 $f_v/\text{pu}$                                         | 96.44  | 62.59     | 69.22     | 66.78     |
| $C_{\text{em}}/\text{元}$                                     | /      | 244.27    | 244.27    | 282.34    |
| $C_{\text{inv}}/\text{元}$                                    | 517.55 | 394.63    | 398.37    | 397.39    |
| $C_{\text{mst}}/\text{元}$                                    | 97.39  | 28.23     | 27.96     | 28.43     |
| $C_{\text{m}}/\text{元}$                                      | 25.88  | 21.63     | 21.28     | 0         |
| $C_{\text{total}}/\text{元}$                                  | 640.82 | 688.76    | 691.88    | 708.16    |
| 光伏消纳率                                                        | 83.39% | 95.19%    | 95.23%    | 95.16%    |

对比方案1和方案2可知，配置储能后，低压配网的光伏消纳率从83.39%上升至95.19%，总电压偏差  $f_v$  从96.44pu减小至62.59pu，体现了储能在提高低压配网光伏消纳能力和电能质量方面的有效性。此外，相比方案1，方案2中系统总运行成本  $C_{\text{total}}$  增加了7.48%，这主要是由于目前的储能单位配置成本较高，随着储能单位配置成本的下降，系统配置储能的经济性会越来越高。

对比方案2和方案3可知，由于方案2考虑了储能无功调压的作用，总电压偏差  $f_v$  为62.59pu，小于方案3的总电压偏差69.22pu，这说明考虑储能四象限运行能力可有效减小电压偏差，提高系统运行安全性。

对比方案2和方案4可知，由于方案2考虑了负荷需求响应，其储能配置成本  $C_{\text{ess}}$  和总电压偏差  $f_v$  均小于方案4，这是因为负荷需求响应将晚间负荷高峰时段的负荷进行削减或者转移到午间光伏高发时段，因此，方案2所需的储能配置容量小于方案4。这证明了考虑负荷需求响应可有效提高系统储能配置的经济性，并减小系统电压偏差。

以典型日3为例，进一步对方案2的有功出力结果、节点电压和需求响应后负荷进行分析，以验证所提策略有效性。

#### 5.4.1 方案2的有功出力结果分析

方案2的有功出力结果如图4所示。

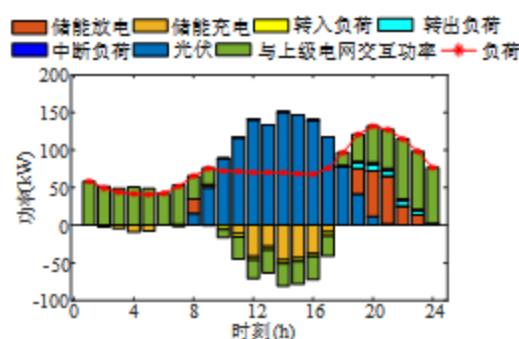


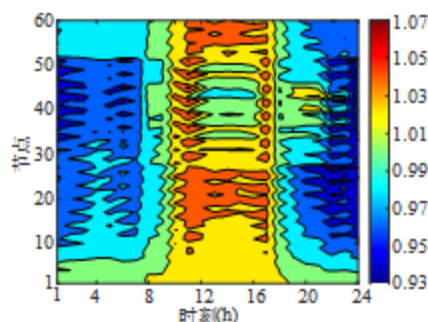
图4 方案2的有功出力结果

Fig. 4 Active output results for scheme 2

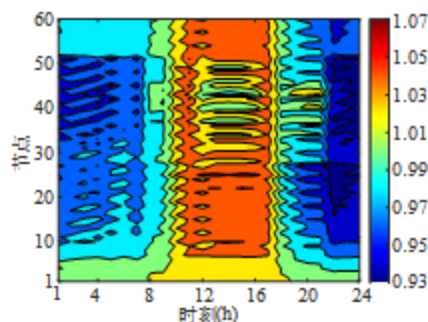
由图 4 可知, 在 11:00-17:00 的光伏高发时段, 光伏出力大于负荷需求, 系统向上级电网倒送有功以消纳光伏, 同时储能处于充电状态以存储光伏能量; 在 19:00-23:00 的晚间负荷高峰时段, 光伏出力值基本为 0, 系统向上级电网购电以满足负荷需求, 同时储能处于放电状态以降低系统购电成本。通过储能和负荷需求响应机制的协同, 显著降低了低压配电网的正向和反向功率峰值。

#### 5.4.2 储能功率四象限运行有效性分析

方案 2、3 的节点三相电压图如图 5 所示。



(a) 方案 2 节点电压



(b) 方案 3 节点电压

图 5 2 种方案的节点电压

Fig. 5 Node voltage for the 2 schemes

由图 5 可知, 2 种方案的节点电压均处于 0.93pu-1.07pu 的安全范围内。不同的是, 对比图 7(a)、(b), 在 10:00~18:00 的光伏高峰时段, 方案 2 中储能吸收无功功率以抑制电压越上限; 在 19:00~24:00 的负荷高峰时段, 储能发出无功功率以抑制电压越下限, 使得方案 2 的整体节点电压偏移量明显小于方案 3。这说明考虑储能四象限运行能力可有效提高低压配网电能质量。

#### 5.4.3 负荷需求响应有效性分析

方案 2 中需求响应后的负荷曲线如图 6 所示。

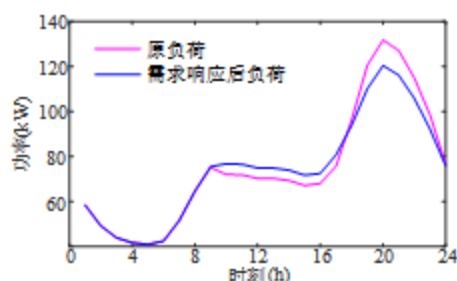


图 6 需求响应后负荷曲线

Fig. 6 Load curve after demand response

由图 6 可知, 方案 2 实施负荷需求响应后, 19:00-23:00 的高峰时段负荷需求明显减少, 负荷峰值由原来的 131.77kW 降到 120.40kW。这主要是因为该时段负荷需求大, 电价较高, 为提高系统储能配置的经济性, 方案 2 可对中断负荷节点的部分负荷进行削减, 同时将可转移负荷节点的部分负荷转移到午间光伏高发时段。

#### 5.4.4 不确定性参数对储能配置结果影响分析

为分析源荷不确定预算参数  $K_{pv}$ 、 $K_{load}$  对储能配置结果的影响, 分别基于三组源荷不确定预算参数求解方案 2 模型, 参数设置和运行结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 当  $K_{pv}$ 、 $K_{load}$  为 0 时, 鲁棒优化模型转换为确定性优化模型, 此时储能配置成本  $C_{ess}$  最小; 当  $K_{pv}$ 、 $K_{load}$  为 6 和 12 时, 储能配置成本显著增加; 当  $K_{pv}$ 、 $K_{load}$  为 12 和 24 时, 相比  $K_{pv}$ 、 $K_{load}$  为 6 和 12, 储能配置成本略微增加。这是因为仅光伏高发时段的源荷最恶劣场景对储能配置成本影响较大, 其余时段的源荷最恶劣场景主要影响购电成本  $C_{grid}$ 。

表 2 不同不确定预算参数下的储能配置结果  
Table 2 Results of energy storage configuration under different uncertain budget parameters

| $K_{pv}$ 、 $K_{load}$ | 0、0      | 6、12      | 12、24     |
|-----------------------|----------|-----------|-----------|
| $E_{pv}^u$ /kWh       | 80/60/50 | 100/80/80 | 110/80/80 |
| $P_{pv}^u$ /kW        | 20/15/13 | 25/20/20  | 28/20/20  |
| 电压偏差 $f_v$ /pu        | 66.35    | 62.59     | 64.92     |
| $C_{ess}$ /元          | 178.75   | 244.27    | 253.91    |
| $C_{grid}$ /元         | 385.63   | 394.63    | 406.65    |
| $C_{total}$ /元        | 27.03    | 28.23     | 29.16     |
| $C_{pv}$ /元           | 25.22    | 21.63     | 18.57     |
| $C_{total}$ /元        | 616.63   | 688.76    | 708.29    |

以典型日 3 为例,  $K_{pv}$  和  $K_{load}$  取 12 和 24 时的源荷最恶劣场景如图 7 所示。



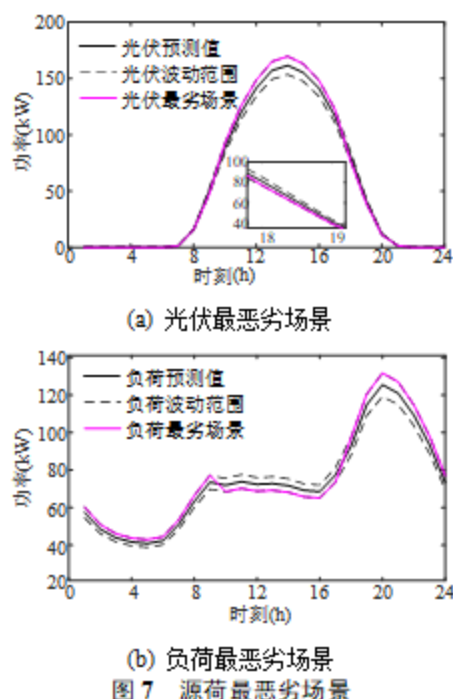


Fig.7 The worst operating scene for PV and load

由图7可知,在光伏高发时段,光伏最恶劣场景为波动上界,负荷最恶劣场景为波动下界;其余时段,光伏最恶劣场景为波动下界,负荷最恶劣场景为波动上界。

总体来看,源荷不确定预算参数越大,系统储能配置成本  $C_{\text{ess}}$  和总运行成本  $C_{\text{total}}$  越大。决策者可根据需求及历史数据,确定合适的不确定预算参数值,尽可能平衡储能配置的经济性和鲁棒性。

## 6 结论

本文提出一种含高比例光伏的低压配电网储能鲁棒配置策略,通过算例分析得到以下结论:

(1) 基于配网三相线性模型,计算节点综合电压灵敏度确定储能安装节点可有效摆脱储能选址对网络拓扑和线路参数的依赖。

(2) 在含高比例光伏的低压配网中配置储能可有效提高其光伏消纳能力和电能质量。

(3) 考虑负荷需求响应进行储能配置可有效提高储能配置的经济性;考虑储能四象限运行能力进行储能配置可有效改善系统电压质量。

(4) 考虑源荷不确定性进行储能配置时,需合理设置不确定预算参数以平衡系统储能配置的经济性和鲁棒性。

## 参考文献

[1] 李英豪,蔡鹤鸣,王康,等.改善不平衡配电网电压质量的分布式储能序次优化配置方法[J].电力建设,2022,43(01):87-95.  
Li Yingliang, Cai Heming, Wang Kang, et al. Sequence optimal configuration of distributed energy storage for improving voltage

quality of unbalanced distribution network[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(01): 87-95.

[2] Su X, Zhang Z, Liu Y, et al. Sequential and comprehensive BESSs placement in unbalanced active distribution networks considering the impacts of BESS dual attributes on sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3453-3464.

[3] 朱佩蓉,郭倩,李灵至,等.考虑主动配电网脆弱性的分布式储能配置[J/OL].电测与仪表:1-8[2024-05-06].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221019.1512.014.html>.  
Zhu Peixue, Guo Qian, Li Lingzhi, et al. Distributed energy storage configuration considering the vulnerability of active distribution network[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8 [2024-05-06].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20221019.1512.014.html>.

[4] 刘丽军,黄伟东,陈泽楷,等.考虑灵活性供需平衡的新型电力系统长期储能联合规划[J/OL].电网技术:1-13[2024-05-06].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0224>.  
Liu Lijun, Huang Weidong, Chen Zekai, et al. Joint long-term and short-term energy storage planning for new power system Considering supply and demand balance of flexibility[J/OL]. Power System Technology: 1-13[2024-05-06].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0224>.

[5] Sun W, Gong Y, Luo J. Energy storage configuration of distribution networks considering uncertainties of generalized demand-side resources and renewable energies[J]. Sustainability, 2023, 15(2): 1097.

[6] 贾兆昊,张峰,丁磊.考虑功率四象限输出的配电网储能优化配置策略[J].电力系统自动化,2020,44(02):105-113.  
Jia Zhao hao, Zhang Feng, Ding Lei. Optimal allocation strategy of energy storage in distribution network considering power four-quadrant output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(02): 105-113.

[7] 刘洋,谢平平,黄炳开,等.基于智能储能开关的多馈线共享储能鲁棒性规划[J/OL].电力自动化设备:1-11[2024-05-06].<https://doi.org/10.16081/j.epae.202403017>.  
Liu Yang, Xie Pingping, Huang Bingkai, et al. Robust planning of multi-feeder-sharing energy storage based on E-SOP[J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-11[2024-05-06].<https://doi.org/10.16081/j.epae.202403017>.

[8] 梅书凡,程勤良,代美.考虑风光出力季节性波动的储能容量配置[J].电力工程技术,2022,41(04):51-57.  
Mei Shufan, Tan Qinliang, Dai Mei. Energy storage capacity configuration considering seasonal fluctuation of wind and photovoltaic output[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(04): 51-57.

[9] 朱晓荣,屈国微,谢婉莹.考虑源网荷灵活性资源的配电网储能鲁棒规划[J].电力自动化设备,2021,41(08):8-16+40.  
Zhu Xiaorong, Lu Guowei, Xie Wanying. Robust planning of energy storage in distribution network considering source-network-load flexible resources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(08): 8-16+40.

[10] Patari N, Srivastava A K, Li Na. Distributed optimal voltage control considering latency and asynchronous communication for three phase unbalanced distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1033-1043.

[11] Kekatos V, Zhang Liang, Giannakis G B, et al. Voltage regulation algorithms for multiphase power distribution grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3913-3923.

[12] Zhai H, Yang M, Chen B, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks[J]. International Journal

- of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 1-10.
- [13] Li Z, Wu L, Xu Y, et al. Stochastic-weighted robust optimization based bilayer operation of a multi-energy building microgrid considering practical thermal loads and battery degradation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2): 668-682.
- [14] 蔡永翔, 唐巍, 张博, 等. 适应高比例户用光伏的中低压配电网集中-分布式协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4843-4854.  
Cai Yongxiang, Tang Wei, Zhang Bo, et al. Centralized-distributed multi-objective coordinated control for MV and LV distribution networks adapting to high-proportion residential PV units [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4843-4854.
- [15] [https://pan.baidu.com/s/18\\_aao-Cc9KGTLb8-MmOJA?pwd=d3n1](https://pan.baidu.com/s/18_aao-Cc9KGTLb8-MmOJA?pwd=d3n1)

收稿日期: 2024-06-12

作者简介:



李文美

李文美(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化调度, E-mail: liwenmei@hnu.edu.cn;

申亚涛(1991), 男, 博士研究生, 研究方向为新型电力系统运行与控制, E-mail: hnuasyt@hnu.edu.cn.

黄纯(1966), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型电力系统运行与控制、电力系统继电保护等, E-mail: hc@hnu.edu.cn.

(编辑 XXX)

文章编号:

中图分类号:

文献标志码:

学科代码:

# 基于改进哈里斯鹰优化算法的 微电网优化调度研究

侯硕颜<sup>1</sup>, 田卫华<sup>1</sup>

(1. 沈阳工程学院、辽宁省沈阳市沈北新区蒲昌路 18 号)

## Research on Microgrid Optimal Scheduling Based on Improved Harris Hawk Optimization Algorithm

Shuoyan Hou<sup>1</sup>, Weihua Tian<sup>1</sup>(1. Shenyang Institute of Engineering, No. 18, Puchang Road, Shenbei New District,  
Shenyang City, Liaoning Province)

**ABSTRACT:** Microgrid systems are usually composed of a variety of distributed power sources, and in order to reduce comprehensive operating costs, intelligent algorithms are often used to dispatch microgrids. Therefore, on the basis of Harris Hawk Optimization (HHO), an improved Harris Hawk Optimization (IHHO) algorithm was proposed, which used Sobol sequence initialization population, elite reverse learning and escape energy update optimization strategies to improve the solution accuracy. The optimal dispatching model of microgrid is based on the lowest pollutant treatment cost and the optimal power fluctuation of the contact line between the microgrid and the main network, and is solved by using the IHHO algorithm. The simulation results verify the superiority of the proposed algorithm, and the proposed optimization model can effectively improve the economy, environmental protection and reliability of microgrid operation.

**KEY WORDS:** microgrids, intelligent algorithms, harris hawk optimization algorithm, optimize scheduling

**摘要:** 微电网系统通常由多种分布式电源组成, 为降低综合运行成本, 常使用智能算法对微电网进行调度。智能算法在求解微电网调度模型时容易陷入局部最优解, 导致求解精度差, 因此在哈里斯鹰优化算法 (HHO) 的基础上, 提出了一种改进的哈里斯鹰优化 (IHHO) 算法, 利用 Sobol 序列初始化种群、精英反向学习以及逃逸能量更新优化策略提高求解精度, 并建立了以微电网的运行维护成本最小、污染物治理成本最低和微网与主网的联络线功率波动最优为优化目标的微电网优化调度模型, 并利用 IHHO 算法求解。仿真结果验证了所提算法的优越性, 且所提优化模型能有效地提高微电网运行的经济性、环保性和可靠性。

**关键词:** 微电网, 智能算法, 哈里斯鹰优化算法, 优化调度

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

微电网一般包含多种分布式电源, 在建立微电网的调度模型过程中, 由于存在大量的优化变量, 其问题属于非线性范畴, 因此经常利用智能算法来进行模型的求解<sup>[1]</sup>。一些常见的智能算法包括差分进化算法<sup>[2]</sup>、粒子群算法<sup>[3-4]</sup>、乌鸦搜索算法<sup>[5]</sup>等, 相比之下, HHO 算法展现出更快速的收敛性和更强的全局搜索性能。但其在处理更为复杂的优化问题时往往因收敛精度不足以及容易陷入局部最优而显示出局限性。现有的研究中通常需要对算法进行改进, 文献[6]提出一种信息交换的方法增加种群的多样性, 并设计了一个包含混沌干扰的非线性逃逸能量因子, 防止算法在后期陷入局部最优。文献[7]将混沌初始化机制、多种群策略以及差分进化思想进行融合, 以增强算法的全局探索和局部开发能力。

微电网调度优化问题是属于多目标优化问题的范畴, 其优化任务呈现多目标性质, 而不同研究者在微电网优化时可能会设定各自不同的优化目标。文献[8]通过使用一种改良的蜂群算法, 针对微电网系统, 以最小化发电成本为目标, 对经济调度模型进行优化处理, 减少了微电网日常运营的总成本, 但其并未考虑环境因素的影响。文献[9]通过结合柴油机、储能设备、电动汽车和主网联络线功率建立了微电网多目标分层调度模型, 最大程度上利用可再生能源并减小运行总成本, 提高了微电网运行的经济性、高效性和安全性。文献[10]以经济成本、环保成本和电网有功损耗作为优化目标对微电网的优化调度进行建模, 实现了微电网运行的可靠性。

在上述研究背景下, 本文考虑电动汽车参与下的微电网调度, 提出了一种基于 IHHO 算法的微电

基金项目: 2021 年度辽宁省教育厅科技项目 (LJKZ1099)

2021 Science and Technology Project of Liaoning Provincial  
Department of Education (LJKZ1099).

网优化调度策略,以微电网综合运行成本最小、污染物治理成本最低和主网联络线功率波动最优为优化目标建立微电网的优化模型,对HHO算法的搜索和开发阶段进行改进,用IHHO求解所建立的模型,通过仿真实验分析验证本文改进算法与建立模型的有效性。

## 1 微电网系统结构建模

本文所建立的微电网系统,发电设备包括风力发电机、太阳能光伏电站和燃气轮机。储能设备通过蓄电池系统实现,而此微网除了满足基本居民电力需求外,还考虑到了电动汽车所需的充电负荷。

### 1.1 风力发电模型

风力发电机的发电功率模型为:

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho S V_s^3 C_p \quad (1)$$

式中:  $P_{wt}$  为风机发电功率(kW),  $\rho$  为空气密度( $\text{kg/m}^3$ ),  $S$  为叶轮扫掠面积( $\text{m}^2$ ),  $V_s$  为风速( $\text{m/s}$ ),  $C_p$  为风能利用系数。

由公式(1)可知,风机的输出功率与风速有较大关系,其对应关系为:

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & v < v_{in} \\ P_r \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3} & v_{in} \leq v < v_r \\ P_{wr} & v_r \leq v < v_{out} \\ 0 & v_{out} \leq v \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $P_{wt}$  表示风机的发电功率,  $P_{wr}$  表示风机的额定功率,  $v$  表示实际风速,  $v_{in}$  为风机的切入风速,  $v_{out}$  表示风机的切出风速,  $v_r$  为风机额定风速。

### 1.2 光伏发电模型

光伏电池的数学模型表达为:

$$P_{pv} = P_m \frac{G}{G_{stc}} (1 + k_w (T_d - T_r)) \quad (3)$$

式中,  $P_{pv}$ 、 $P_m$  分别表示光伏电池的输出功率与额定功率,  $G$ 、 $G_{stc}$  分别表示此时和标准状态下的光照强度( $\text{W/m}^2$ ),  $k_w$  表示功率温度系数,  $T_d$  表示光伏电池的温度( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_r$  表示标准条件下的温度,  $T_r = 25^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.3 燃气轮机模型

在标准大气压下,燃气轮机的数学模型如式(4)所示:

$$P_{MT} = \frac{C_{MT} Q \eta}{C_{ng}} \quad (4)$$

式中,  $P_{MT}$  为燃气轮机的发电功率,  $C_{MT}$  为燃气轮机所使用的能耗成本,  $C_{ng}$  为此时每  $\text{m}^3$  天然气的价格,  $Q$  为每  $\text{m}^3$  天然气燃烧产生的热量,  $\eta$  为能量转换率。

### 1.4 储能设备模型

本文选用蓄电池作为微电网储能设备。储能蓄电池的荷电状态(SOC)和充放电功率是研究重点。SOC表示储能装置的剩余电量, SOC的值一般被用来表示电池剩余电量与满电量下电池容量的比,比值一般介于(0,1)之间。

蓄电池在充电过程中:

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\gamma) + \eta_{ch} \frac{P_{ch} \Delta T}{ESS} \quad (5)$$

蓄电池在放电过程中:

$$SOC(t) = SOC(t-1)(1-\gamma) - \frac{P_{dis} \Delta T}{ESS \eta_{dis}} \quad (6)$$

式中,  $SOC(t)$  和  $SOC(t-1)$  分别表示此时刻和上一时刻的电池容量,  $\gamma$  表示自放电率,  $\eta_{ch}$  和  $\eta_{dis}$  表示蓄电池充放电效率,  $P_{ch}$  表示蓄电池的充电功率,  $P_{dis}$  为放电功率,  $ESS$  代表储能系统的容量。

### 1.5 电动汽车充电负荷模型

对电动汽车充电负荷的建模需要考虑诸多因素的影响,包括电动汽车的起始放电时刻、充电时间、行驶里程、SOC状态和电池容量。

(1) 起始充电时刻

根据数据统计,电动汽车用户上班和下班开车时间可近似由正态分布表达<sup>[11]</sup>。数据显示,大约有20%的车主在公司进行充电,60%的车主下班回家充电,还有剩下20%的车主不定时充电,将其分别记为一类车主、二类车主和三类车主。

电动私家车起始充电时刻的概率密度函数如下所示<sup>[12]</sup>:

$$f_1(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} \exp\left(-\frac{(t-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad 0 < t \leq \mu_1 + 12 \quad (7)$$

其中,  $f_1(t)$  为一类车主的起始充电时刻概率密度函数;  $\sigma_1$ 、 $\mu_1$  表示一类车主的起始充电时刻方差和均值,  $\sigma_1 = 0.5$ ,  $\mu_1 = 9$ ;

$$f_2(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} \exp\left(-\frac{(t+24-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad \mu_2 + 12 < t \leq 24 \quad (8)$$

其中,  $f_2(t)$  为二类车主的起始充电时刻概率密度函数;  $\sigma_2$ 、 $\mu_2$  表示二类车主的起始充电时刻方差和均值,  $\sigma_2 = 1.5$ ,  $\mu_2 = 19$ ;

$$f_3(t) = \frac{1}{24} \quad 0 \leq t \leq 24 \quad (9)$$

其中,  $f_3(t)$  为三类车主的起始充电时刻概率密度函数。

### (2) 日行驶里程

根据数据统计可知, 电动汽车的日行驶里程可近似表现为正态分布, 函数表达式如下所示<sup>[13]</sup>:

$$f(l) = \frac{1}{l\sigma_l\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(\ln l - \mu_l)^2}{2\sigma_l^2} \quad (10)$$

式中,  $\mu_l$  和  $\sigma_l$  分别表示路程  $l$  的对数  $\ln l$  的期望值和标准差。  $\mu_l=3.3$ ,  $\sigma_l=0.881$ 。

### (3) 电动汽车 SOC

电动汽车结束行程时, 蓄电池剩余电量 SoC 是呈正态分布的, 其概率密度函数可表示为<sup>[14]</sup>:

$$f_{soc}(x) = \frac{1}{\sigma_{soc}\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(x - \mu_{soc})^2}{2\sigma_{soc}^2} \quad 0 < x < 1 \quad (11)$$

式中,  $\mu_{soc}=0.51$ ;  $\sigma_{soc}=0.17$ 。

电动汽车充电所需时间可以表示为:

$$T_i = \frac{Q - Q_s}{P\eta} \quad (12)$$

式中:  $Q$ 、 $Q_s$  分别表示电动汽车的额定容量和剩余电量,  $P$  表示电动汽车的充电功率,  $\eta$  表示电动汽车充电过程中的效率。

## 2 基于 IHHO 算法的微电网优化调度研究

在构建微电网的优化调度模型时, 考虑了风电、光伏、燃气轮机及储能设备之间的协调出力, 以微电网综合运行成本最小、污染物治理成本最低和主网联络线功率波动最优为优化目标, 具体函数如下所示。

### 2.1 目标函数

#### (1) 综合运行维护成本最小

$$f_1 = \sum_{t=1}^{24} (C_{wt}(t) + C_{pv}(t) + C_{fuel}(t) + C_{MT}(t) + C_{BA}(t) + C_{grid}(t)) \quad (13)$$

式中,  $C_{wt}$ 、 $C_{pv}$ 、 $C_{fuel}$ 、 $C_{MT}$ 、 $C_{BA}$ 、 $C_{grid}$  分别为风机和光伏的维护成本、燃气轮机的燃料成本和运行维护成本、储能蓄电池的运行维护成本和微网与主网的交互成本。

$$C_{wt} = \lambda_{wt} P_{wt} \quad (14)$$

式中,  $\lambda_{wt}$  表示风机的运行维护成本系数。

$$C_{pv} = \lambda_{pv} P_{pv} \quad (15)$$

式中,  $\lambda_{pv}$  表示光伏的运行维护成本系数。

$$C_{fuel} = \sum_{t=1}^T \frac{k P_{MT}(t)}{LHV \eta_{MT}} \quad (16)$$

式中,  $k$ 、 $LHV$ 、 $\eta_{MT}$  分别为天然气价格、低位热值和燃气轮机发电效率,  $P_{MT}(t)$  为燃气轮机在  $t$  时段发电功率。

$$C_{MT} = \sum_{t=1}^T \lambda_{MT} P_{MT}(t) \quad (17)$$

式中,  $\lambda_{MT}$  为燃气轮机的运行维护成本系数。

$$C_{BA} = \sum_{t=1}^T \lambda_{BA} (|P_{BA}^{ch}(t)| + |P_{BA}^{dis}(t)|) \quad (18)$$

式中,  $\lambda_{BA}$  为储能电池的运行维护成本系数,  $P_{BA}^{ch}(t)$ 、 $P_{BA}^{dis}(t)$  为储能电池的充放电功率。

$$C_{grid} = C_{buy} P_{buy} - C_{sell} P_{sell} \quad (19)$$

式中,  $C_{buy}$ 、 $P_{buy}$  分别表示微网向主网购电的价格和购电量,  $C_{sell}$ 、 $P_{sell}$  表示微网向主网卖电的价格和输送的电量。

#### (2) 污染物治理成本最低

微电网运行过程中, 风能和太阳能属于清洁能源, 因此风机和光伏发电单元运行过程中不会产生污染气体, 主要考虑燃气轮机和主网的污染气体影响, 污染气体主要包括  $CO_2$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$ , 其目标函数可表达为:

$$f_2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{t=1}^T (\alpha_i |P_{MT}(t)| + \beta_i |P_{buy}(t) + P_{sell}(t)|) \quad (20)$$

式中,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  表示燃气轮机和主网产生污染物  $i$  的单位治理成本,  $P_{buy}(t)$ 、 $P_{sell}(t)$  表示  $t$  时刻微网从主网的购售电量。

#### (3) 微网与主网联络线功率波动最优

微网与主网之间的交互功率也称为联络线功率, 其功率波动范围很大程度上标志着微电网运行的可靠性, 目标函数如下:

$$f_3 = \sum_{t=1}^{T-1} |P_{grid}(t+1) - P_{grid}(t)|^2 \quad (21)$$

式中,  $P_{grid}(t)$ 、 $P_{grid}(t+1)$  表示  $t$ 、 $t+1$  时刻微网和主网的联络线功率。

### 2.2 约束条件

#### (1) 功率平衡约束

$$P_{net}(t) = P_{MT}(t) + P_{grid}(t) + P_{BA}(t) \quad (22)$$

式中,  $P_{net}(t)$  表示  $t$  时刻经过电动汽车优化后的净负荷, 即总负荷减去风电和光伏出力的剩余负荷;  $P_{BA}(t)$  表示  $t$  时刻储能电池输出功率;  $P_{grid}(t)$  表示微网与主网之间的联络线功率。

#### (2) 燃气轮机出力上下限约束

$$P_{MT}^{\min} \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{\max} \quad (23)$$

式中,  $P_{MT}^{\min}$ 、 $P_{MT}^{\max}$  表示燃气轮机的传输功率上下限。



## (3) 燃气轮机爬坡约束

$$P_{MT}^{down} \leq P_{MT}(t+1) - P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{up} \quad (24)$$

式中,  $P_{MT}^{down}$ 、 $P_{MT}^{up}$  表示燃气轮机爬坡上下限。

## (4) 联络线功率上下限约束

$$P_{grid}^{min} \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{max} \quad (25)$$

式中,  $P_{grid}^{min}$ 、 $P_{grid}^{max}$  为联络线功率上下限。

## (5) 储能设备功率约束

$$P_{BA}^{min} \leq P_{BA}(t) \leq P_{BA}^{max} \quad (26)$$

式中,  $P_{BA}^{min}$ 、 $P_{BA}^{max}$  为储能电池充放电功率上下限。

## (6) 储能电池 SOC 约束

$$SOC_{min} < SOC_i < SOC_{max} \quad (27)$$

式中,  $SOC_i$  为  $i$  时刻的电池荷电状态, 而  $SOC_{min}$ 、 $SOC_{max}$  为荷电状态的上下限。

## 2.3 微电网运行策略

本文所研究的微电网优化调度策略中, 考虑电动汽车充电负荷接入对微电网的影响, 利用电动汽车对微电网负荷曲线进行优化, 以平滑负荷波动, 得到净负荷曲线, 即总负荷减去风电和光伏出力的剩余负荷。在系统中优先由风光出力单元供电, 如果其提供的电能能够满足符合需求且还有剩余的电量, 则将剩余电量给储能设备进行充电, 充满后将多余的风光出力通过联络线输送到主网来获取经济利益。如果风光出力不能满足负荷的需要, 优先由储能设备出力, 再比较燃气轮机和主网的发电成本, 选择发电成本较低的发电单元来满足微网中负荷的需要。

为了提高微电网运行的经济性、环保型和可靠性, 本文以微电网运行维护成本最少、污染物治理成本最低和主网联络线功率波动最优为优化目标, 针对原始 HHO 算法存在的收敛速度慢以及容易陷入局部最优等缺点, 提出了一种 IHHO 算法, 并用 IHHO 求解微电网优化调度模型。

## 2.4 IHHO 算法

## 2.4.1 HHO 算法原理介绍

哈里斯鹰优化算法思想来源于哈里斯鹰的狩猎机制, 优化过程分为探索阶段和开发阶段, 过程转换受捕捉对象的逃逸能量  $E$  来控制, 随着猎物逃跑,  $E$  会逐渐减小, 进而由全局勘探的探索阶段向局部搜索的开发阶段转化。

$$E = 2E_0 \left(1 - \frac{t'}{T'}\right) \quad (28)$$

式中,  $E$  为猎物的逃逸能量,  $E_0$  为初始能量, 在  $[-1, 1]$  中取值;  $T'$  和  $t'$  分别为最大迭代次数和当前迭代次数。

## (1) 探索阶段

哈里斯鹰优化算法具有较强的全局搜索性能, 此时  $|E| \geq 1$ , 位置更新策略为:

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{rand}(t) - r_1 |X_{rand}(t) - 2r_2 X(t)| & q \geq 0.5 \\ (X_{prey}(t) - X_m(t)) - r_3 (LB + r_4 (UB - LB)) & q < 0.5 \end{cases} \quad (29)$$

式中,  $X(t)$ 、 $X(t+1)$  为此时和下一次迭代过程中鹰的位置向量,  $X_{rand}(t)$  为种群中随机选择的个体鹰的位置,  $X_{prey}(t)$  为猎物的位置,  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ 、 $q$  为  $(0, 1)$  内部的随机数,  $X_m(t)$  为此时种群中鹰的平均位置,  $UB$ 、 $LB$  为变量的上下限, 公式为

$$X_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) \quad (30)$$

其中,  $N$  为种群数,  $X_i(t)$  为种群中第  $i$  只鹰的位置。

## (2) 开发阶段

哈里斯鹰在开发阶段主要以局部搜索为主, 此时  $|E| < 1$ 。此阶段搜索猎物采取围攻的方法有 4 种。通过逃逸能量  $E$  来模拟围困方式, 定义参数  $r$  表示猎物是否成功逃离。

a) 软围困。当  $|E| \geq 0.5$ ,  $r \geq 0.5$ , 猎物有足够的能量去突破围困。哈里斯鹰采取软围困方式搜索猎物, 位置更新公式为:

$$X(t+1) = X_{prey}(t) - E |JX_{prey}(t) - X(t)| \quad (31)$$

式中,  $J$  为模拟整个逃跑过程中猎物的随机跳跃强度。

b) 硬围困。若  $|E| < 0.5$ ,  $r \geq 0.5$ , 此时猎物因没有充分的能量而无法逃离, 哈里斯鹰采取硬围困的方式进行攻击, 采用以下公式进行更新:

$$X(t+1) = X_{prey}(t) - E |X_{prey}(t) - X(t)| \quad (32)$$

c) 渐进式快速俯冲软围困。当  $|E| \geq 0.5$ ,  $r < 0.5$ , 猎物有充足的能量逃跑, 并利用 Levy 飞行模拟逃跑行为试图突破围攻。哈里斯鹰采取渐进式快速俯冲软围困方式搜索猎物, 下一步行动为

$$Y = X_{prey}(t) - E |JX_{prey}(t) - X(t)| \quad (33)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (34)$$

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (35)$$

式中,  $D$  为问题维数,  $S$  为大小为  $1 \times D$  的随机向量,  $LF$  为 levy 飞行函数,  $F$  为适应度函数。

d) 渐进式快速俯冲硬围困。当  $|E| < 0.5$ ,  $r < 0.5$ , 猎物不能突破围困, 哈里斯鹰采取渐进式快速俯冲硬围困策略搜索猎物, 此时  $Z$  的更新位置不变, 位置  $Y$  的更新规则变为:

$$Y = X_{prey}(t) - E |JX_{prey}(t) - X_m(t)| \quad (36)$$

### 2.4.2 IHHO 算法改进策略

#### (1) Sobol 序列初始化种群

原始 HHO 算法是通过随机化对群体初始化的,这使得种群在整个搜索空间中分布不均匀,而 Sobol 序列是一种低差异的确定性序列,与随机序列相比,该序列能使生成的种群分布更均匀。原始种群的表达式可表示为:

$$X_i = Lb + S_n \times (Ub - Lb) \quad (37)$$

式中,  $Lb$  和  $Ub$  为搜索空间的下界和上界,  $S_n$  为 Sobol 序列产生的随机数,  $S_n \in [0,1]$ 。

#### (2) 精英反向学习策略

假设当前种群在搜索空间上的极值点作为精英个体,  $X_e = (x_1^e, x_2^e, \dots, x_d^e)$ ,

其反向解  $\bar{X}_e = (\bar{x}_1^e, \bar{x}_2^e, \dots, \bar{x}_d^e)$  上可定义如下:

$$\bar{x}_j^e = k \cdot (a_j + b_j) - x_j^e \quad (38)$$

式中,  $x_j^e \in [a_j, b_j]$ ,  $k$  为一般化系数,是区间  $[0,1]$  上的随机值,  $b_j$  和  $a_j$  分别为动态边界的上下界。由于生成的解可能会跳出  $[a_j, b_j]$  边界导致其失去合法性,故采取以下的方法对该值进行重置:

$$\bar{x}_i^e = rand(a_j, b_j) \quad (39)$$

#### (3) 逃逸能量更新优化策略

原始的 HHO 算法在迭代后期只进行局部搜索。为了克服算法在后期容易陷入局部最优的不足,采用一种新的能量因子  $E_1$  的更新方式:

$$E = \begin{cases} \cos(\pi \times (t/T + 1/2) + 2), & t \leq T/2 \\ \cos(\pi \times (t/T - 1/2)^{1/3}), & t > T/2 \end{cases} \quad (40)$$

$$E_1 = E \times (2 \times rand - 1) \quad (41)$$

式中,  $t$  为当前迭代次数,  $T$  为最大迭代次数,  $rand$  为  $[0,1]$  上的随机数。

## 3 算例仿真

### 3.1 参数设置

微电网系统各设备的运行参数见表 1 和表 2 所示,表 3 为分时电价,污染物处理成本见表 4 所示:

表 1 风机、光伏、燃气轮机和主网的运行参数

Table 1 Operating parameters of wind turbines, photovoltaics, gas turbines, and mains

| 类型           | 出力<br>上/下限 | 发电效率 | 爬坡率<br>上/下限 | 维护成本系数<br>(元·kW <sup>-1</sup> ) |
|--------------|------------|------|-------------|---------------------------------|
| 风机           | 250/0      | 0.87 | /           | 0.029                           |
| 光伏           | 150/0      | 0.75 | /           | 0.0096                          |
| 燃气轮机         | 22/0       | 0.40 | 220/-220    | 0.086                           |
| 主网交互<br>功率参数 | 250/-250   | /    | 250/-250    | /                               |

表 2 蓄电池运行参数

Table 2 Operating parameters of the battery

| 类型        | 最大充/放<br>电功率/kW | 充/放电<br>效率 | SOC <sub>min</sub><br>/SOC <sub>max</sub> | 维护成本系数<br>(元·kW <sup>-1</sup> ) |
|-----------|-----------------|------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
| 蓄电池<br>参数 | 200/-200        | 0.9/0.9    | 0.2/0.9                                   | 0.004                           |

表 3 分时电价

Table 3 Time-of-use electricity prices

| 峰谷时间段 | 时间段                        | 售电单价/元 | 购电单价/元 |
|-------|----------------------------|--------|--------|
| 峰时段   | 10:00-15:00<br>19:00-22:00 | 0.75   | 1.56   |
| 平时段   | 07:00-09:00<br>16:00-18:00 | 0.43   | 0.7    |
| 谷时段   | 01:00-06:00<br>23:00-24:00 | 0.24   | 0.43   |

表 4 污染物处理成本

Table 4 Contaminant treatment costs

| 污染气体类型               | CO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 污染气体排放<br>系数 kg/kW·h | 0.65            | 0.0002          | 0.01            |
| 主网                   | 0.889           | 0.002           | 0.0015          |
| 单位污染气体处理费用(元/kg)     | 0.21            | 14.824          | 62.964          |

在算法方面,采用 IHHO 算法,初始种群数设置为 100,最大迭代次数设置为 500。通过该算法,可实现微电网系统的优化经济运行。

### 3.2 结果分析

图 1 和图 2 分别表示优化前后微电网中各单元出力情况。

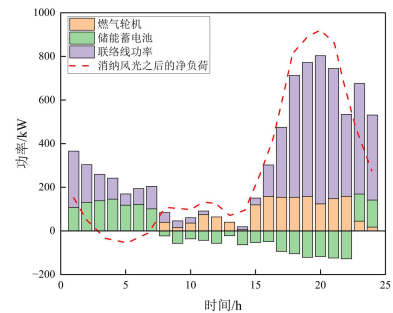


图 1 优化前微电网各单元出力

Fig.1 The output of each unit of the microgrid before optimization

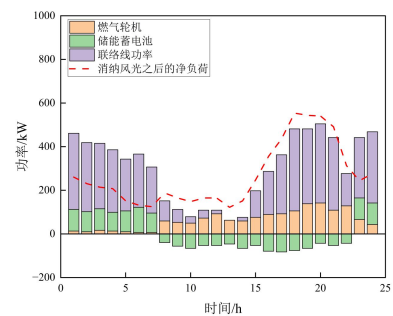


图 2 优化后微电网各单元出力

Fig.2 The output of each unit of the microgrid after optimization

如图所示,电动汽车参与微电网调度后,00:00~07:00的净负荷值明显高于优化前的净负荷,此时购电成本低,优先选择从主网购电以达到负荷需求。在08:00~15:00时,净负荷值比较平稳,此时优先由燃气轮机和储能电池出力。16:00~22:00期间,负荷进入高峰期,但此时的负荷还是低于电动汽车参与调度前的负荷,所以优先由燃气轮机和储能设备供电,不足部分再从主网购买。在23:00~24:00时,由于购电成本低,故微网和主网的联络线功率显著升高,而负荷侧需求大大降低。

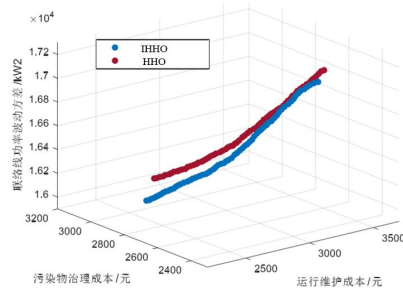


图3 算法改进前后 Pareto 前沿对比  
Fig.3 Comparison of the Pareto frontier before and after the algorithm improvement

表5 微电网优化前后参数对比  
Table 5 Comparison of parameters before and after microgrid optimization

|     | 运行维护<br>成本(元) | 污染物治理<br>成本(元) | 联络线功率波动<br>方差(kW²) |
|-----|---------------|----------------|--------------------|
| 优化前 | 3568.23       | 3378.85        | 30724.05           |
| 优化后 | 2912.46       | 2687.86        | 16448.82           |

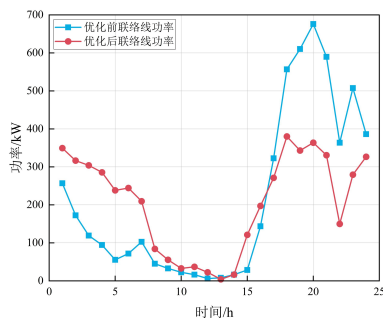


图4 优化前后微网与主网联络线功率  
Fig.4 The power of the connection line between the microgrid and the main network before and after optimization

算法改进前后 Pareto 前沿对比如图3所示,可以发现, IHHO 算法的 Pareto 获得解位于 HHO 算法下侧,说明改进后整体优化结果更具优势,由此可证明本文算法改进策略的有效性。根据以上的调度结果可以得出优化调度前后微电网各项指标参数对比,由表5中数据可知,优化后的微电网的运行维护成本比优化前降低了18.38%;污染物治理成本降低了20.45%;微网与主网的联络线功率波动方差降低了46.46%。优化前后主网联络线功率如图4所示,由图可知,优化后的联络线功率波动大大降低。由此可见,采用本文的微电网优化调度策略,能够有效地降低微电行的减小了微电网的总运行成本。

## 4 本文小结

本文建立了基于 IHHO 算法的微电网优化调度模型,考虑电动汽车参与微电网调度,以微电网运行维护成本最小、污染物治理成本最低和微网与主网的联络线功率波动最优为优化目标,针对 HHO 算法收敛精度差且易陷入局部收敛的不足,对算法进行改进,并用 IHHO 算法求解微电网模型。仿真结果表明,所提的优化调度模型能够有效地提高微电网运行的经济性、环保性和可靠性。

## 参考文献

- [1] 宋扬,石勇,刘宝泉,等.基于反向变异麻雀搜索算法的微电网优化调度[J].电力工程技术,2022,41(2):163-170.
- [2] 翁志远,方杰,孔敏,等.改进差分进化算法的作业车间调度优化策略[J].控制工程,2017,24(6):1282-1285.
- [3] 马宽,何国锋,董燕飞,等.基于多策略改进 PSO 算法的微电网优化调度研究[J].智慧电力,2023,51(8):23-29.
- [4] 陈友芹,蒋炯,殷展翔,等.基于 NCP SO 的微电网群优化调度策略研究[J].太阳能学报,2022,43(8):477-483.
- [5] 王利猛,孙珮然,姜鸿儒,等.计及谐波指标影响的含分布式电源配电网多目标规划[J].太阳能学报,2020,41(2):181-187.
- [6] QU C, HE W, PENG X, et al. Harris hawks optimization with information exchange[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 84: 52-75.
- [7] CHEN H, HEIDARI A A, CHEN H, et al. Multi-population differential evolution-assisted Harris hawks optimization: Framework and case studies[J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 111: 175-198.
- [8] 袁华骏,叶筱怡,耿宗璞.考虑经济成本的微电网调度运行[J].电气自动化,2021,43(05):48-50.
- [9] 侯慧,薛梦雅,陈国炎,等.计及电动汽车充放电的微电网多目标分级经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(17):55-62.
- [10] 郝少飞,邹文进,葛浩然,夏宇,马刚.基于改进鲸鱼优化算法的微电网优化运行[J].广东电力,2022,35(01):51-59.
- [11] Fretzen U, Ansarin M, Brandt T. Temporal city-scale matching of solar photovoltaic generation and electric vehicle charging[J]. Applied Energy, 2021, 282, 116160.
- [12] Zhang Q, Zhao J, Wang X, et al. Distribution network hierarchically partitioned optimization considering electric vehicle orderly charging with isolated bidirectional DC-DC converter optimal efficiency model[J]. Energies, 2021, 14(6): 1614.
- [13] Zhang Q, Hu Y, Tan W, et al. Dynamic time-of-use pricing strategy for electric vehicle charging considering user satisfaction degree[J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3247.
- [14] 黑桐.居民小区内电动汽车有序充放电策略研究[D].山东大学.



侯硕颜

收稿日期: 20 - - 。

作者简介:

侯硕颜(1998),男,硕士研究生,研究方向为微电网优化调度,E-mail: monkey981018@163.com;  
田卫华(1970),女,教授,博士,研究方向为电力系统分析等,E-mail: tianwh@sie.edu.cn.

# 基于多智能体有限时间一致性的孤岛异构微电网分布式二次控制

朱国皓<sup>1</sup>, 孟庆伟<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 石大山能新能源学院, 山东 青岛)

## Distributed Secondary control of islanded heterogeneous microgrids based on multi-agent finite-time consensus

Zhu Guohao<sup>1</sup>, Meng Qingwei<sup>1</sup>

(1. College of New Energy, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**ABSTRACT:** Inverter-based distributed generators (IIDGs) and miniature synchronous generators (SGs) have different physical characteristics and control modes in islanded microgrids. Aiming at the different operating characteristics of IIDG and SG, the distributed frequency quadratic control strategy and active power allocation strategy are designed based on the theory of finite time consistency of heterogeneous multi-agent. Finally, the effectiveness of the proposed control strategies is verified by simulation.

**KEY WORDS:** Islanded microgrids; Distributed control; Heterogeneous multi-agent

**摘要:** 逆变器型分布式发电机(IIDGs)与微型同步发电机(SGs)在孤岛微电网中具有不同的物理特性和控制方式。针对 IIDG 与 SG 不同的运行特性, 基于异构多智能体有限时间一致性理论, 设计了分布式频率二次控制策略和有功功率分配策略。最后, 通过仿真验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:** 孤岛微电网; 分布式控制; 异构多智能体

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号

## 0 引言

随着可再生能源技术的发展, 可再生能源在电网中的占比不断提高。区域内的分布式电源与储能、负荷共同组成微电网, 实现能源综合利用<sup>[1]</sup>。微电网通常有并网和孤岛两种运行模式, 在孤岛微电网中分布式电源(DER)主要包含微型同步发电机

型微源(SGs)与逆变器接口型微源(IIDGs), 本文主要研究孤岛微电网。

孤岛微电网通常采用分级控制的策略, 包括一次控制、二次控制和三次控制三个级别<sup>[2]</sup>。一次控制(主控制)通过下垂控制来实现, 下垂控制可以快速稳定系统频率与电压。二次控制的主要目的是恢复由下垂控制造成的频率/电压偏差<sup>[3]</sup>。三次控制主要是微电网中各个机组之间的调度与优化。本文主要研究微电网的二次控制。

二次控制主要分为集中式控制与分布式控制<sup>[4]</sup>。集中式控制策略需要 DER 单元与中央控制器交换信息, 中央控制器收集到节点信息并进行统一处理后再返回节点。因此, 集中式控制存在易受系统单点故障影响、鲁棒性差和过度依赖通信网络的缺点<sup>[1]</sup>。近年来, 由于多智能体分布式共识技术的发展, 仅通过交换 DER 局部信息来实现全局控制的分布式控制策略被广泛应用到微电网中。由于分布式控制策略不需要全局信息, 所以具有较好的稳定性、灵活性和可扩展性。MG 中的 DER 被当作节点, 通过多智能体领导-跟随一致性算法实现频率恢复和有功功率分配<sup>[5]</sup>。近年来, 为了提高微电网的抗干扰性与控制精度, 设计了鲁棒控制<sup>[6]</sup>、有限时间控制<sup>[7]</sup>和固定时间控制<sup>[8]</sup>等分布式控制器。

风电与光伏等可再生能源通过逆变器装置接入电网, 电力电子占比逐渐增大。孤岛微电网由于缺乏大电网的支撑, 仅仅依靠 IIDG 供能, 使得微电网呈现低惯性的特点, 受到扰动更易失稳。为了解决只含有 IIDG 的微电网低惯性问题, 有学者提出了虚拟同步发电机(VSG)技术<sup>[9]</sup>。VSG 通过逆变器模拟同步发电机的转子方程, 使 IIDG 具有惯性,

**基金项目:** 新能源电力系统国家重点实验室开放基金(LAPS23010) 新能源电力系统频率的异构多智能体协同调控机理与方法研究。

Project Supported by Open Fund of State Key Laboratory of New Energy Power System (LAPS23010). Research on the mechanism and method of heterogeneous multi-agent cooperative regulation of new energy power system frequency.

提高了 MG 的稳定性。但是 VSG 并联时会出现低频振荡等问题<sup>[10]</sup>。SG 具有惯性大和过流能力强的特点,可以有效提高微电网系统的惯性<sup>[11]</sup>。由于 SG 与 IIDG 在物理结构和控制方式上存在差异,所以需要一种统一的控制方式来连接 SG 与 IIDG 的特性并实现系统频率恢复和功率分配。

本文主要研究 SG 与 IIDG 共同作用的孤岛微电网异构微源频率恢复与有功功率分配。由于 SG 与 IIDG 有不同的运行特性,本文建立了异构微电网二次控制模型。经过稳定性分析表明,微电网中的异构微源能够恢复频率至额定值,同时可以实现有功功率分配。

## 1 异构微电网一次控制

图、顶点与边的集合分别用  $G$ 、 $V$  和  $E$  来表示,即  $G=(V,E)$ 。其中顶点集  $V$  和边集  $E$  又可以分别表示顶点  $v_i=\{v_1, v_2 \dots v_n\}$  和边  $e_i=\{e_1, e_2 \dots e_n\}$ ,

$(v_i, v_j) \in E(G)$  表示顶点  $i$  和  $j$  之间存在一条边,若该边为有向边则表示顶点  $i$  可以从  $j$  接受信息。 $A$  为图  $G$  的邻接矩阵,  $a_{ij} > 0$  表示顶点  $i$  和  $j$  相连可以传递信息,并且传递信息的权重为  $a_{ij}$ ,  $a_{ij} = 0$  表示顶点  $i$  和  $j$  不相连。用  $D = \text{diag}\{d_1, d_2 \dots d_n\}$  表示图的度矩阵,当图为无向图时,顶点  $v_i$  的度表示与该顶点相连的顶点数;当图为有向图时,顶点  $v_i$  的度表示为能够向该顶点传递信息的顶点数。 $L = D - A$  为图的拉普拉斯矩阵。定义矩阵  $B = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ,若  $i$  节点可以接收到领导节点的信息则  $b_i = 1$ , 否则  $b_i = 0$ 。

微型同步发电机的核心部件主要为转子发电单元,因此采用转子的动力学建模可以有效反映微型同步发电机的特性。动力学方程可以由经典的恒压后电抗模型的互连摆动方程给出:

$$M_i \frac{dw_i}{dt} = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} - P_{ei} - D_i(w_i - w_0) \quad (1)$$

式中  $w_i$ 、 $w_0$ 、 $E_i$ 、 $G_{ii}$ 、 $P_{mi}$ 、 $P_{ei}$  和  $M_i$  分别为第  $i$  个微型同步发电机的角频率、额定角频率、发电机内部电压、自电导、机械功率、输出有功功率和惯性系数。可以通过角频率算出实际频率  $f_i = w_i / 2\pi$ 。

微型同步发电机的调速器一次调频方程为:

$$P_{mi} = k_{fi}(w_0 - w_i) \quad (2)$$

式中  $k_{fi}$  为第  $i$  个微型同步发电机的调频系数。

结合(1)、(2)可得微型同步发电机完整的转子方程为:

$$\frac{1}{a_i} \frac{dw_i}{dt} = w_0 - w_i - \frac{b_i}{a_i} P_{ei} \quad (3)$$

式中  $a_i = (k_{fi} + D_i) / M_i$ ,  $b_i = 1 / M_i$ 。

本文采用基于逆变器控制的 IIDG,假设可控微源为理想电压源,忽略逆变器的影响。与同步发电机不同,基于逆变器作用的 IIDG 不存在调速器。下垂控制在逆变器的内部控制回路中实现,来模拟同步发电机的一次调频特性,其中有功功率和角频率的下垂特性由下式给出:

$$w_i = w_0 - m_{pi} p_i \quad (4)$$

式中  $w_i$ 、 $w_0$ 、 $p_i$  和  $m_{pi}$  分别为第  $i$  个 IIDG 的角频率、额定角频率、输出的有功功率和下垂系数。

系统发生负荷波动时,在下垂控制的作用下会形成频率偏差。本文采用二次控制来补偿由下垂控制造成的频率偏差。同时为了防止微电网中某些微源的超负荷运行,对 IIDG 与 SG 的输出功率进行控制,实现系统微源输出的有功功率按比例分配。

## 2 异构微电网二次控制

### 2.1 频率二次控制

基于输入输出反馈线性化设计控制器,(3)两边求导得:

$$\frac{1}{a_i} \ddot{w}_i = \dot{w}_0 - \dot{w}_i - \frac{b_i}{a_i} \dot{P}_{ei} \quad i \in SG \quad (5)$$

式中  $\ddot{w}_i = d \frac{dw_i}{dt} / dt$ 。

因此微型同步发电机的频率二次控制变成了一个二阶线性多智能体系统的领导跟随同步问题,具体可以表述为如下形式:

$$\begin{cases} \frac{dw_i}{dt} = \dot{w}_i \\ \ddot{w}_i = u_i \end{cases} \quad i \in SG \quad (6)$$

式中  $u_i$  为引入的频率辅助控制。

(4)两边求导得:

$$\dot{w}_i = \dot{w}_0 - \dot{m}_{pi} p_i \quad i \in IIDG \quad (7)$$

因此 IIDG 的二次频率控制变成了一个一阶线性多智能体系统的领导跟随同步问题,具体可以表述为如下形式:

$$\dot{w}_i = u_i \quad i \in IIDG \quad (8)$$

式中  $u_i$  为引入的频率辅助控制。

(6)与(8)共同形成了异构多智能体系统,假设微电网中的异构微源可以通过通信网络进行通信,可以根据自身与邻居节点的信息设计控制输入。为了恢复系统频率至额定值,引入分布式有限时间控制协议即本文提出的微电网分布式频率二次控制器:

$$\begin{cases} \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sig}(w_j(t) - w_i(t))^{\alpha_1} + c_i \text{sig}(w_0 - w_i(t))^{\alpha_1} & i \in \text{IIDG} \\ \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sig}(w_j(t) - w_i(t))^{\alpha_1} + \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sig}(\dot{w}_j(t) - \dot{w}_i(t))^{\alpha_2} \\ + c_i \text{sig}(w_0 - w_i(t))^{\alpha_1} + c_i \text{sig}(-\dot{w}_i(t))^{\alpha_2} & i \in \text{SG} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $0 < \alpha_1 < 1, \alpha_2 = 2\alpha_1 / (\alpha_1 + 1)$  为系统控制增益,

$c_i > 0$  为第  $i$  个节点的牵引控制增益。

由(5)设计 SG 节点的分布式二次频率控制:

$$\dot{w}_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sig}(w_j(t) - w_i(t))^{\alpha_1} + c_i \text{sig}(w_0 - w_i(t))^{\alpha_1} \quad (10)$$

## 2.2 有功功率分配控制

本文通过不同下垂系数设计 SG 与 IIDG 的分布式有功功率控制器。SG 的分布式有功功率分配控制器为:

$$\frac{b_i}{a_i} \dot{P}_{ei} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sig}\left(\frac{b_j}{a_j} P_{ej}(t) - \frac{b_i}{a_i} P_{ei}(t)\right)^{\alpha_1} \quad (11)$$

IIDG 的分布式有功功率控制器为:

$$m_{pi} \dot{P}_{ei} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sig}(m_{pj} P_{ej}(t) - m_{pi} P_{ei}(t))^{\alpha_1} \quad (12)$$

设:

$$P_i = \begin{cases} \frac{b_i}{a_i} P_{ei} & i \in \text{SG} \\ m_{pi} P_{ei} & i \in \text{IIDG} \end{cases} \quad (13)$$

结合(11)(12)和(13)可知孤岛微电网有功功率分配控制为:

$$\dot{P}_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij} \text{sig}(P_j(t) - P_i(t))^{\alpha_1} \quad i \in \text{IIDG}, \text{SG} \quad (14)$$

式中  $\alpha_1 > 0$ 。

结合(9)(10)(11)(12)(13)和(14)可得 SG 与 IIDG 的控制输入为:

$$w_0 = \begin{cases} \int \frac{1}{a_i} u_i + \dot{w}_i + \frac{b_i}{a_i} \dot{P}_{ei} dt & i \in \text{SG} \\ \int u_i + m_{pi} \dot{P}_i dt & i \in \text{IIDG} \end{cases} \quad (15)$$

## 3 仿真验证

为了验证本文提出的分布式二次控制策略的有效性,根据图 1 所示的系统通信网络 and 实际拓扑,构建了一个孤岛微电网仿真系统。系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

| Table.1 System parameters                                         |      |                |                 |                    |      |                 |      |
|-------------------------------------------------------------------|------|----------------|-----------------|--------------------|------|-----------------|------|
| R <sub>1</sub> & R <sub>2</sub> & R <sub>3</sub> & R <sub>4</sub> |      |                |                 | 0.03 Ω             |      |                 |      |
| L <sub>1</sub> & L <sub>2</sub> & L <sub>3</sub> & L <sub>4</sub> |      |                |                 | 0.35mH             |      |                 |      |
| K <sub>f1</sub>                                                   |      | 3.18e4         |                 | m <sub>p1</sub>    |      | 8.98e-5         |      |
| K <sub>f2</sub>                                                   |      | 3.82e4         |                 | m <sub>p2</sub>    |      | 10.47e-5        |      |
| D <sub>1</sub>                                                    | 3000 | D <sub>2</sub> | 4000            | M <sub>1</sub>     | 0.05 | M <sub>2</sub>  | 0.06 |
| R <sub>I1</sub>                                                   | 0.1Ω |                | R <sub>I2</sub> | 0.12Ω              |      | R <sub>I3</sub> | 0.1Ω |
| L <sub>I1</sub> & L <sub>I2</sub> & L <sub>I3</sub>               |      |                |                 | 0.318mH            |      |                 |      |
| P <sub>load1</sub>                                                |      | 160KW          |                 | Q <sub>load1</sub> |      | 100Kvar         |      |
| P <sub>load2</sub>                                                |      | 20KW           |                 | Q <sub>load2</sub> |      | 10Kvar          |      |
| α <sub>1</sub>                                                    | 0.5  | α <sub>2</sub> | 0.667           | c <sub>i</sub>     |      | 1               |      |

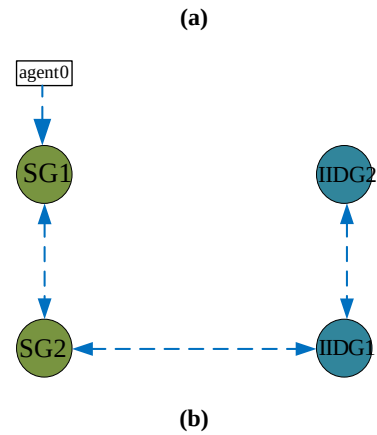
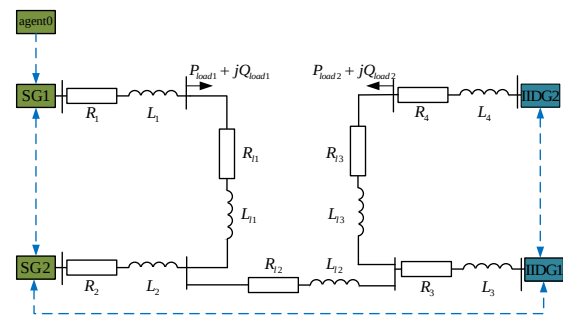


图 1 孤岛微电网结构图: (a)物理结构 (b)通讯网络

Fig. 1 Structure of an islanded microgrid: (a) Physical structure (b) Communication network

通过负载的阶跃变化来验证所提分布式有限时间控制器可以实现 SG 与 IIDG 的频率恢复以及输出的有功功率按照比例分配。系统频率变化与输出有功功率变化如图 2 和图 3 所示。负载变化顺序如下:

1)  $0s < t \leq 8s$ , 孤岛微电网中所有的 SGs, IIDGs 和负载接入系统, 在分布式二次控制器的作用下,



系统频率恢复至额定值。SG1, SG2, IIDG1 和 IIDG2 的输出有功功率分别为 65.8KW, 80KW, 21.1KW, 18.1KW。满足输出功率按照比例分配。

2)  $8s < t \leq 11s$ , Load-2 突增 10KW 负载, 频率恢复至额定频率, 输出功率仍按照比例分配。

3)  $11s < t \leq 15s$ , Load-2 突减 10KW 负载, 频率恢复至额定频率, 输出功率仍按照比例分配。

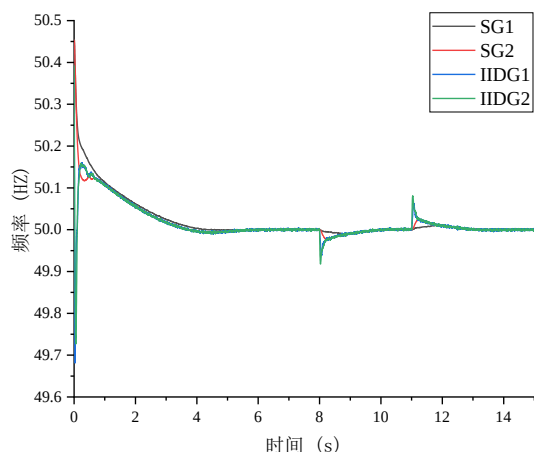


图 2 负载变化时系统频率变化

Fig. 2 System frequency variation during load variation

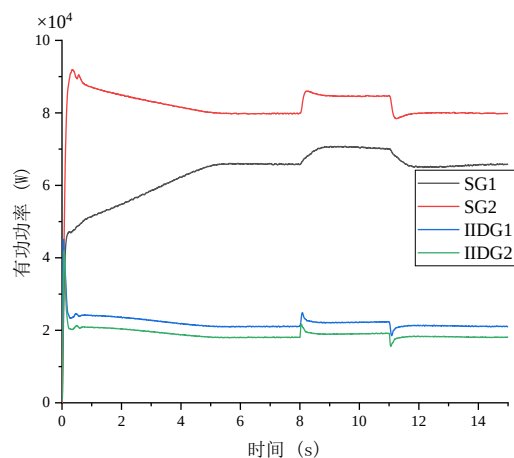


图 3 负载变化时系统输出有功功率变化

Fig. 3 Variation of system output active power during load variation

由仿真结果可知本文提出的分布式二次控制器可以恢复系统频率至额定值, 同时可以实现 SG 与 IIDG 输出的有功功率按比例分配, 验证了本文所提控制策略的有效性。

## 4 结论

本文提出了一种基于多智能体有限时间一致性的孤岛异构微电网分布式二次控制策略。仿真结果表明, 采用本文提出的控制策略可以补偿由一次控制引起的频率偏差以及精确的有功功率分配。仿真结果还表明该控制策略较好的弹性。

## 参考文献

- [1] Cady S T, Dominguez-Garcia A D, Hadjicostis C N. A Distributed Generation Control Architecture for Islanded AC Microgrids[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015.
- [2] Bidram A, Davoudi A. Hierarchical Structure of Microgrids Control System[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012.
- [3] Afshari A, Karrari M, Baghaee H R, et al. Cooperative Fault-Tolerant Control of Microgrids Under Switching Communication Topology[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020.
- [4] Li Z, Zang C, Zeng P, et al. Fully Distributed Hierarchical Control of Parallel Grid-Supporting Inverters in Islanded AC Microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017.
- [5] Simpson-Porco J W, Shafiee Q, Dorfler F, et al. Secondary Frequency and Voltage Control of Islanded Microgrids via Distributed Averaging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015.
- [6] Chen K, Baran M. Robust Controller for Community Microgrids for Stability Improvement in Islanded Mode[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023.
- [7] Lu R, Wang J, Wang Z. Distributed Observer-Based Finite-Time Control of AC Microgrid Under Attack[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020.
- [8] Zhao D, Zhang C, Sun Y, et al. Distributed Robust Frequency Restoration and Active Power Sharing for Autonomous Microgrids With Event-Triggered Strategy[J]. IEEE transactions on smart grid, 2021.
- [9] Shuai Z, Hu Y, Peng Y, et al. Dynamic Stability Analysis of Synchronverter-Dominated Microgrid Based on Bifurcation Theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017.
- [10] Shi M, Chen X, Zhou J, Chen Y, Wen J, He H. Frequency Restoration and Oscillation Damping of Distributed VSGs in Microgrid With Low Bandwidth Communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021.
- [11] Nikkhajoei H, Lasseter R H. Distributed Generation Interface to the CERTS Microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009.

收稿日期: 2013-07-04。

作者简介:

朱国皓(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网控制, E-mail: s22150027@s.upc.edu.cn;



朱国皓

(编辑 五号楷体, 居右, 段前空 6pt)

# 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度

李 硕, 刘 莉, 孙天贺

(1. 沈阳工程学院、辽宁省沈阳市沈北新区蒲昌路 18 号)

## Low carbon economic optimization of integrated energy system considering flexible load

Shuo Li, Li Liu, Tianhe Sun

(1. Shenyang Institute of Technology, 18 Puchang Road, Shenbei New District, Shenyang City, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** With the continuous development of social economy, the power system not only needs to meet the needs of users, but also needs to ensure its own stability, reduce operating costs as much as possible, and promote the sustainable development of energy. This paper constructs a mathematical model of an integrated energy system that includes wind, photovoltaic storage, gas turbines, and flexible loads to minimize total operating costs. The model considers the translation, transfer and reduction characteristics of flexible load and carbon trading mechanism. In this paper, the cplex solver in the Yalmip toolbox is used to solve the problem. The simulation results show that under the carbon trading system, the electrothermal coupling scheduling and the interaction of flexible electrical and thermal loads can significantly reduce the peaking and valley load difference, alleviate the peak power pressure, reduce the system operating cost, and improve the energy utilization rate, thus significantly improving the comprehensive economic and environmental benefits of the system.

**KEY WORDS:** Integrated Energy System, Flexible Load, Carbon Trading, Low-Carbon Economy

**摘要:** 随着社会经济的不断发展, 电力系统不仅需要满足用户的生活需求, 还需保证自身的稳定性, 尽可能降低运行成本, 同时促进能源的可持续发展。本文构建了一个包含风能、光伏储能、燃气轮机和柔性负荷在内的综合能源系统低碳经济调度模型, 旨在最小化总运行成本。模型考虑了柔性负荷的可平移、可转移、可削减特性以及碳交易机制。本文采用 Yalmip 工具箱中的 cplex 求解器进行求解, 仿真结果表明, 在碳交易体系下, 电热耦合调度以及柔性电、热负荷的互动能够显著减小负荷峰谷差, 缓解高峰用电压力, 降低系统运行成本, 提高能源利用率, 从而显著提升系统的经济和环境综合效益。

**关键词:** 综合能源系统, 柔性负荷, 碳交易, 低碳经济

## 0 引言

当前, 能源消费规模不断扩大, 环境问题日益严峻, 实现能源结构的优化问题已逐渐成为社会的重要议题。综合能源系统 (Integrated Energy System, IES) 在促进节能减排、推动能源体系变革方面将起到至关重要的作用<sup>[1]</sup>。现有的 IES 优化调度主要以系统运行成本最低为调度目标, 却忽略了 IES 运行过程中的环境成本。在寻求可兼顾经济环境效益 IES 调度模型的过程中, 碳交易机制的提出为 IES 减少碳排放提供了新思路。文献[2]针对电、热、气联供的 IES 提出阶梯型碳交易成本计算方法。文献[3]基于 LCA 能源链提出一种碳排放系数计量方法, 并研究了碳交易 IES 能效的影响。文献[4]将碳交易机制引入传统经济调度模型中, 实现了对火电机组碳排放量的削减。尽管对 IES 低碳运行的研究已陆续展开, 但柔性负荷的合理调度在其中可发挥的作用还有待进一步研究。柔性负荷具有可灵活调度的特点, 对于缓解供需矛盾、提高可再生能源利用率等方面均起到较好的效果。文献[5-6]将柔性负荷引入主动配电网, 实现了系统运行成本的降低和网损的减少。文献[7]建立了包含分时电价机制和柔性负荷的微网调度模型, 通过规划柔性负荷用电时段, 使配电网的用电效益和清洁能源消纳能力均有所提高。

本文主要内容为构建一个包含风光储、燃气轮机、柔性负荷等在内的综合能源系统低碳经济调度模型。该模型以总运行成本最小为目标, 考虑了柔性负荷的可平移、可转移、可削减的负荷特性和碳交易机制。针对负荷分布不均匀问题, 通过合理调配柔性负荷, 使日负荷曲线变得更加平滑, 减小负荷的峰谷差。考虑到综合能源系统的低碳经济发

展,引入碳交易机制,使该综合能源系统的碳排放量降低,促进电力系统的低碳发展模式采用Yalmip工具箱中的cplex求解器对算例进行求解,得到碳交易体系下考虑柔性电、热负荷参与调度的优化结果,结果表明,本文提出的低碳经济调度模型有效的提高了能源利用率和系统的经济环境综合效益。

## 1 含柔性负荷的综合能源系统模型

在全球生态环境受损严重的背景下,随着各种新能源与电力系统的深度耦合,形成了以电力系统为核心的综合能源系统。综合能源系统中的柔性负荷包括可平移负荷、可转移负荷和可削减负荷,该特性能使系统根据实际需要和市场的指令进行负荷的调配,为IES提供额外的调节能力,提高了系统的灵活性,有助于平衡供需。通过优化调度策略,柔性负荷模型可以实现能源的高效利用,降低系统运行成本。同时,柔性负荷还可以促进新能源的消纳,减少弃风、弃光等现象,提高新能源的利用效率,降低系统运行成本。

### 1.1 可平移负荷

以1h作为单位调度时段单位,针对一个特定的可平移负荷 $L_{\text{shift}}$ ,其参与调度前的功率分布可表示为向量 $L_{\text{shift}}^*$ ,如下式所述:

$$L_{\text{shift}}^* = (0, \dots, P_{t_s}^{\text{shift}}, P_{t_s+1}^{\text{shift}}, \dots, P_{t_D}^{\text{shift}}, \dots, 0) \quad (1)$$

式中 $t_s$ 为起始时段; $t_D$ 为持续时间。可平移负荷工作在一个连续的时间段,需在连续的时间范围内对负荷进行时间平移。假定这个时间范围是 $[t_{\text{sh-}}, t_{\text{sh+}}]$ ,负荷的整体平移中必须注意 $L_{\text{shift}}$ 的开始时段和平移持续时间。利用取值为0或1的变量 $\alpha$ 来标识 $L_{\text{shift}}$ 在特定时间段 $\tau$ 的平移情况,当 $\alpha_\tau=1$ 时,表示负荷此时平移到 $\tau$ 时刻,从 $\tau$ 时段开始生效; $\alpha_\tau=0$ 表示 $L_{\text{shift}}$ 负荷不平移,保持不变。同时,为确保调整的时间段在用户可接受的范围之内,平移的起始时段应从集合 $S_{\text{shift}}$ 中选取:

$$S_{\text{shift}} = [t_{\text{sh-}}, t_{\text{sh+}} - t_D + 1] \cup \{t_s\} \quad (2)$$

假如 $\tau=t_s$ ,则负荷量维持不变;反之若 $\tau$ 属于 $[t_{\text{sh-}}, t_{\text{sh+}} - t_D + 1]$ 的范围且 $\tau$ 不等于 $t_s$ ,那么 $L_{\text{shift}}^*$ 的功率分配向量将从初始时刻 $t_s$ 转变到新的起始时刻为 $\tau$ 的 $L_{\text{shift}}$ 上,此时新的功率分布向量为:

$$L_{\text{shift}} = (0, \dots, P_{\tau}^{\text{shift}}, P_{\tau+1}^{\text{shift}}, \dots, P_{\tau+t_D-t_s}^{\text{shift}}, \dots, 0) \quad (3)$$

在完成可平移负荷的调度后,应给参与调度的用户一些补偿费用 $F_{\text{sh}}$ ,以此激励更多用户参与调度。平移后需补偿用户的费用 $F_{\text{shift}}$ 为:

$$F_{\text{shift}} = F_{\text{cost}}^{\text{shift}} P_{\text{sum}}^{\text{shift}} \cdot \sum_{t=t_{\text{sh-}}}^{t_{\text{sh+}}-t_D+1} \alpha_t \quad (4)$$

式中, $F_{\text{cost}}^{\text{shift}}$ 指代可平移负荷单位功率的补偿价格,单位元/kW; $P_{\text{cost}}^{\text{shift}}$ 为 $L_{\text{shift}}$ 的用电功率总量,单位

kW。

### 1.2 可转移负荷

假设可转移负荷 $L_{\text{tran}}$ 的转移时段区间为 $[t_{\text{tr-}}, t_{\text{tr+}}]$ ,用0-1变量 $\beta$ 表示 $L_{\text{tran}}$ 在特定时间段 $\tau$ 的转移状态, $\beta_\tau=1$ 表示在时段 $\tau$ 时 $L_{\text{tran}}$ 中的功率 $P_\tau^{\text{tran}}$ 发生转移,其功率转移过程遵循的功率限制条件为:

$$\beta_t P_{\min}^{\text{tran}} \leq P_t^{\text{tran}} \leq \beta_t P_{\max}^{\text{tran}} \quad (5)$$

式中 $P_{\min}^{\text{tran}}$ 、 $P_{\max}^{\text{tran}}$ 分别为各时间段可转移负荷最小和最大功率约束条件。

若转载负荷未收到制约,负荷会散布至多个时间段,从而导致设备的频繁启停,故而要规定转移负荷的最小连续运行时间,以限制可转移负荷的转移,具体约束条件见如下式:

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\min}^{\text{tran}}-1} \beta_\tau \geq T_{\min}^{\text{tran}} (\beta_t - \beta_{t-1}) \quad (6)$$

式中 $T_{\min}^{\text{tran}}$ 为最小连续运行时间。

转移后需补偿用户的费用 $F_{\text{tran}}$ 为:

$$F_{\text{tran}} = F_{\text{cost}}^{\text{tran}} \sum_{t=t_{\text{tr-}}}^{t_{\text{tr+}}} (\beta_t P_t^{\text{tran}}) \quad (7)$$

式中 $F_{\text{cost}}^{\text{tran}}$ 为单位功率负荷转移所需的补偿费用,单位元/kW。

### 1.3 可削减负荷

可削减负荷是这几类负荷中最灵活的负荷类别,用0-1和变量 $\gamma$ 来表示 $\tau$ 时刻负荷削减状态, $\gamma_\tau=1$ 表示负荷 $L_{\text{cut}}$ 在 $\tau$ 时段被削减。削减后的负荷表示为:

$$P_t^{\text{cut}} = (1 - \theta_\tau \gamma_\tau) P_\tau^{\text{cut}*} \quad (8)$$

式中 $\theta_\tau$ 为削减系数; $P_t^{\text{cut}*}$ 和 $P_t^{\text{cut}}$ 为削减前后负荷功率大小。

考虑到用户满意度,防止连续削减负荷,保证系统合理运行,还需对削减时长和削减次数的上下限进行约束。以下为约束条件:

最小连续削减时间约束:

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\min}^{\text{cut}}-1} \gamma_t \geq T_{\min}^{\text{cut}} (\gamma_t - \gamma_{t-1}) \quad (9)$$

最大连续削减时间约束:

$$\sum_{t=1}^{t+T_{\max}^{\text{cut}}-1} (1 - \gamma_t) \geq 1 \quad (10)$$

削减次数约束:

$$\sum_{t=1}^{24} \gamma_t \leq N_{\max} \quad (11)$$

式中, $T_{\min}^{\text{cut}}$ 代表最小连续削减时间; $T_{\max}^{\text{cut}}$ 代表最大连续削减时间; $N_{\max}$ 则是最大削减次数限制。

用户所需补偿费用 $F_{\text{cut}}$ 为:

$$F_{cut} = F_{cost}^{cut} \sum_{t=1}^T \gamma_t (P_t^{cut} - P_t^{cut*}) \quad (12)$$

式中:  $F_{cost}^{cut}$  为单位功率削减负荷转移的补偿价格, 单位¥/kW。

## 2 碳交易成本模型

碳交易成本的计算要考虑到实际碳排放量、分配到的碳排放额度以及碳交易价格。碳交易成本可以通过以下公式来计算:

$$f_{CO_2} = P_{CO_2} (E_p - E_q) \quad (13)$$

式中,  $f_{CO_2}$  为碳交易成本, 其值为正则代表碳排放超额, 需购买碳排放额度, 为负则表示为售出碳排放额度获得利益;  $E_p$  和  $E_q$  分别为实际碳排放量和分到的碳排放额度;  $P_{CO_2}$  为当日碳交易市场价格。

鉴于 IES 的碳排放源于不同类型能源的生产运输过程和使用过程, 将该模型分为两个阶段计量 IES 的碳排放量, 具体模式如下:

$$E_{out} = \sum_{i \in \Omega} (c_i^{pre} + c_i^{run}) P_i \quad (14)$$

式中  $\Omega$  为能源设备集合, 包括供能设备和储能设备;  $c_i^{pre}$  为第  $i$  台能源设备对应能源生产运输阶段的碳排放系数, 单位  $g/(kW \cdot h)$ ;  $c_i^{run}$  为第  $i$  台能源设备对应能源使用阶段的碳排放系数, 单位  $g/(kW \cdot h)$ ;  $P_i$  为第  $i$  个能源设备的运行出力。

## 3 含柔性负荷的综合能源系统低碳经济调度模型

### 3.1 目标函数

IES 运行优化的经济性最优是以系统的总运行成本最低为优化目标。在满足各单元约束的前提下, 合理配置 IES 中各个可控组件的输出, 以及对柔性负荷实施精细化管理, 使日前运行成本  $f_{IES}$  与碳交易成本  $f_{CO_2}$  之和最小。其总成本最低的目标函数  $F_g$ :

$$F_g = \min(f_{IES} + f_{CO_2}) \quad (15)$$

其中, 日前运行成本公式如下:

$$f_{IES} = F_{NET} + F_{DG} + F_{GT} + F_{GB} + F_{BAT} + F_{HST} + F_L \quad (16)$$

式中,  $F_{NET}$  为与电网交互成本;  $F_{DG}$  为新能源发电成本;  $F_{GT}$ ,  $F_{GB}$  分别为燃气轮机、燃气锅炉的运行成本;  $F_{BAT}$ ,  $F_{HST}$  分别为蓄电池、蓄热槽的折旧成本;  $F_L$  为调度柔性负荷的总补偿费用。

其中, 各个成本的公式如下:

$$\begin{cases} F_{NET} = \sum_{t=1}^T K_{NET}(t) P_{NET}(t) \\ F_{DG} = \sum_{t=1}^T [K_{WT} P_{WT}(t) + K_{PV} P_{PV}(t)] \\ F_{GT} = \sum_{t=1}^T K_{GT} P_{GT}(t) \\ F_{GB} = \sum_{t=1}^T K_{GB} P_{GB}(t) \\ F_{BAT} = \sum_{t=1}^T K_{BAT} |P_{BAT}(t)| \\ F_{HST} = \sum_{t=1}^T K_{HST} |P_{HST}(t)| \\ F_L = F_{shift} + F_{tran} + F_{cut} \end{cases} \quad (17)$$

式中  $K_{NET}(t)$  为分时电价;  $P_{NET}(t)$  为与电网交换的功率, 购电为正;  $K_{WT}$ ,  $K_{PV}$ ,  $K_{GT}$ ,  $K_{GB}$ ,  $P_{WT}(t)$ ,  $P_{PV}(t)$ ,  $P_{GT}(t)$ ,  $P_{GB}(t)$  分别为风机、光伏、燃气轮机、燃气锅炉的运行成本系数、输出功率;  $K_{BAT}$ ,  $K_{HST}$  分别为蓄电池、蓄热槽的折旧系数;  $P_{BAT}(t)$ ,  $P_{HST}(t)$  分别为蓄电池、蓄热槽的充放能量, 吸收为正, 释放为负。

### 3.2 约束条件

#### 3.2.1 电功率平衡约束:

$$P_{NET} + P_{WT} + P_{PV} + P_{GT} = L_e + P_{BAT} \quad (18)$$

$$L_e = L_{base} + L_{shift} + L_{tran} + L_{cut} \quad (19)$$

$$L_e = L_{base} + L_{shift} + L_{tran} + L_{cut} \quad (20)$$

式中,  $L_e$  为总电负荷, 单位 kW;  $L_{base}$  为综合能源系统中的基础负荷, 不参与调度;  $L_{shift}$ 、 $L_{tran}$ 、 $L_{cut}$  分别为可平移、可转移、可削减电负荷, 单位 kW。

#### 3.2.2 热功率平衡约束:

$$Q_{GT} + Q_{GB} = Q_L + Q_{HST} \quad (21)$$

$$Q_L = Q_{base} + Q_{shift} + Q_{cut} \quad (22)$$

式中,  $Q_{GT}$ 、 $Q_{GB}$  分别为燃气轮机和锅炉的产热功率;  $Q_L$  为总热负荷, 单位 kW;  $Q_{base}$ 、 $Q_{shift}$ 、 $Q_{cut}$  分别为热负荷中的基础负荷、可平移负荷、可削减负荷, 单位 kW。

#### 3.2.3 电功率出力上下限约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{WT} \leq P_{WT,max} \\ 0 \leq P_{pv} \leq P_{pv,max} \\ P_{NET,min} \leq P_{NET} \leq P_{NET,max} \\ 0 \leq P_{GT} \leq P_{GT,max} \\ P_{BAT,min} \leq P_{BAT} \leq P_{BAT,max} \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $P_{WT,max}$ 、 $P_{pv,max}$  分别为预测的风电机组、光伏出力, 单位 kW;  $P_{NET,min}$ 、 $P_{NET,max}$  分别为电网交换功率的最小值与最大值, 单位 kW;  $P_{GT,max}$  为燃气轮机的额定电功率, 单位 kW;  $P_{BAT,min}$ 、 $P_{BAT,max}$

分别为蓄电池放电、充电最大功率，单位 kW。

### 3.2.4 热功率出力上下限约束

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{GT} \leq Q_{GT,max} \\ 0 \leq Q_{GB} \leq Q_{GB,max} \\ Q_{HST,min} \leq Q_{HST} \leq Q_{HST,max} \end{cases} \quad (24)$$

式中， $Q_{GT,max}$ 、 $Q_{GB,max}$  分别为燃气轮机、燃气锅炉的额定输出热功率，单位 kW； $Q_{HST,min}$ 、 $Q_{HST,max}$  分别为蓄热槽放热、吸热最大功率，单位 kW。

### 3.2.4 储能约束

$$\begin{cases} E_{cap,min} \leq E_{cap}(t) \leq E_{cap,max} \\ P_{ex,min} \leq P_{ex}(t) \leq P_{ex,max} \\ 0 \leq S(t) + R(t) \leq 1 \\ \sum_{t=1}^T P_{ex}(t) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中， $E_{cap}(t)$ 、 $P_{ex}(t)$ 分别为储能容量、充放能功率； $E_{cap,max}$ 、 $E_{cap,min}$ 、 $P_{ex,max}$ 、 $P_{ex,min}$  分别为储能容量和充放能功率的上、下限值； $S(t)$ 、 $R(t)$ 分别为充、放状态， $S(t)$ 、 $R(t)$ 均为 0-1 变量。

## 4 算例仿真

### 4.1 低碳经济调度结果分析

考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济调度的优化结果，并得出各类能源的供给状况和在优化处理后柔性电、热负荷的分布。具体可见图 1-4。

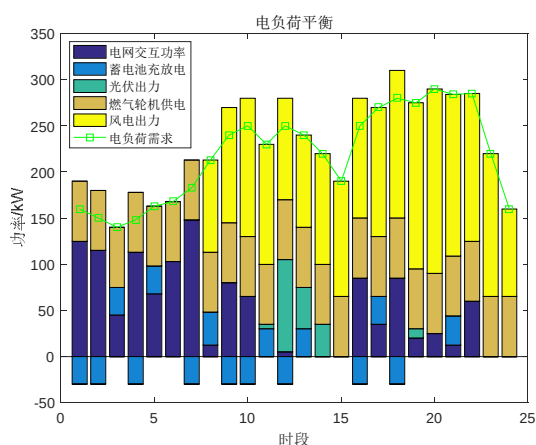


图 1 电功率平衡

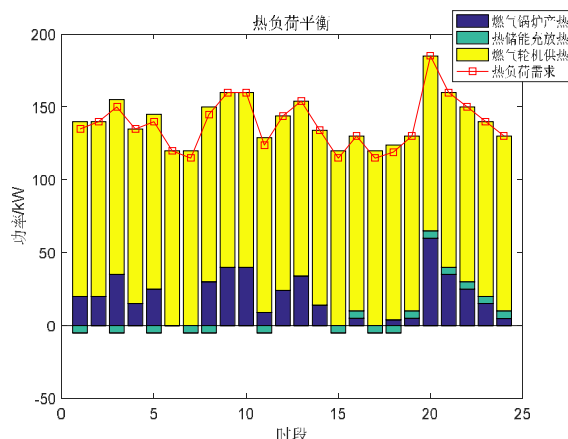


图 2 热功率平衡

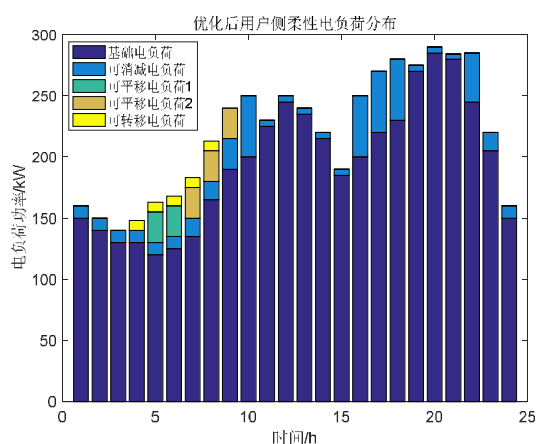


图 3 用户侧柔性电负荷分布

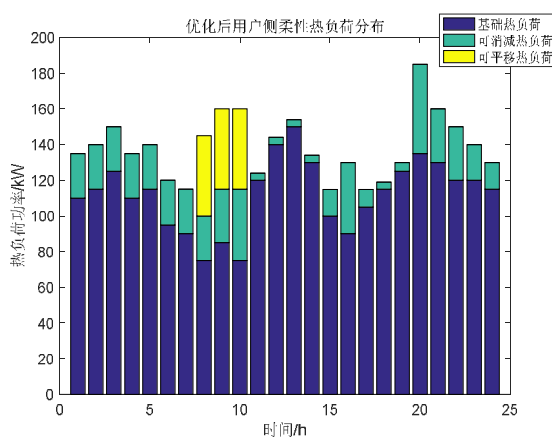


图 4 用户侧柔性热负荷分布

### 4.2 不同场景的调度分析

为探究柔性负荷在综合能源系统中的作用，设计三个不同的场景进行对比分析：

场景 1：考虑包括可平移、可转移、可削减的柔性电负荷和包括可平移、可削减的柔性热负荷参与的系统优化调度情况；场景 2：只考虑包括可平移、可转移、可削减柔性电负荷，不考虑柔性热负荷参与系统优化调度的情况；场景 3：不考虑柔性

负荷参与系统优化调度的情况。3 个场景除考虑的负荷种类不同外，其他条件均保持一致。

表 1 不同场景的优化结果

| 场景 | 成本/元   | 净负荷峰谷差/kW |       |
|----|--------|-----------|-------|
|    |        | 电负荷       | 热负荷   |
| 1  | 3162.3 | 168.43    | 34.57 |
| 2  | 3244.6 | 168.43    | 65.47 |
| 3  | 3432.9 | 229.17    | 65.47 |

由于场景 3 中没有考虑柔性负荷参与的调度，而场景 1、2 均有柔性电负荷的参与，所以场景 1、2 的电负荷曲线在电力负荷高峰期的总电量需求得到有效降低，且电力负荷时段得到转移。和场景 3 相比，场景 1 的电负荷的峰谷差由 229.17kW 降低至 168.43kW；由于场景 2 未考虑柔性热负荷，其热负荷曲线与场景 3 的热负荷曲线重合；场景 1 同时考虑柔性热负荷的参与，其电、热负荷曲线均出现削峰填谷现象，场景 1 的热负荷峰谷差也降至 34.57kW。

4.3 碳交易机制对 IES 系统的影响

为探究碳交易机制对综合能源系统调度的影响，构建了 3 种不同场景进行分析：场景 4，不考虑碳交易和柔性负荷的情况；场景 5，计入碳交易因素的优化调度；场景 6：不考虑柔性负荷参与系统优化调度的情况。上述三种场景除已知条件不同外，其他条件完全相同。

表 2 不同场景的结果分析

| 场景 | 运行成本/元  | 碳交易成本/元 | 总成本/元   | 新能源出力总量 kW·h | 碳排放量 t |
|----|---------|---------|---------|--------------|--------|
| 4  | 3318.26 | —       | 3318.26 | 2981.73      | 3.08   |
| 5  | 3432.91 | 140.92  | 3573.83 | 3864.95      | 2.57   |
| 6  | 3162.58 | 131.94  | 3294.52 | 3864.95      | 2.51   |

鉴于场景 4 没有考虑碳交易，因此不考虑该场景下的碳交易费用。依据图表 4.3.2 的数据显示，场景 4 的碳排放数值最高，可再生能源的应用程度较低；场景 5 的碳交易成本是正数，表明该系统需外购碳排放额度。尽管如此，场景 5 的碳排放总量相较于场景 4 有了明显下降，但运行成本也出现增长。和场景 5 相比，场景 6 的运行成本降低了 7.87%，且碳排放也进一步降低，导致碳交易成本有所减少。场景 6 的总成本和碳排放量在三个场景中均为最低。

5 结论

本文建立了一种以总成本最低为目标的碳交易体系下考虑需求侧柔性负荷的 IES 模型。柔性负荷的可削减、可平移、可转移特性提高了综合能源系统的灵活性和稳定性。其在综合能源系统中可以起到削峰填谷作用，降低负荷的峰谷差，使电、热负荷波动更平稳。同时，由于负荷侧波动变平缓，在储能装置的作用下，清洁能源的利用更充分合理，进一步减少了电网的出力，从而降低了来自电网的碳排放量以及电力调度成本。柔性负荷不仅可以在阶梯电价用电政策下，通过将负荷分散开来的方式降低电网的运行成本，还可以间接地促进电能的合理调度，减少碳排放，提升环境效益，也保证调度的经济性。

参考文献

[1] 程耀华, 张宁, 康重庆, 等. 低碳多能源系统的研究框架及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 ( 14 ): 4060-4069.

[2] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于碳交易的电-热-气综合能源系统低碳经济调度 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42 ( 14 ): 8-13.

[3] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑 LCA 能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 ( 6 ): 1614-1626, 1858.

[4] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 基于碳交易机制的电 - 气互联综合能源系统低碳经济运行 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 ( 15 ): 9-16.

[5] 贾先平, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 含柔性负荷的主动配电网优化模型研究 [J]. 电测与仪表, 2018, 55 ( 13 ): 46-52, 116.

[6] 王云, 刘东, 李庆生. 主动配电网中柔性负荷的混合系统建模与控制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 ( 8 ): 2142-2150.

[7] 王凌云, 马奇伟, 徐嘉阳. 基于 MAS 微电网的需求响应互动定价优化模型 [J]. 可再生能源, 2017, 35 ( 6 ): 905-911.

收稿日期: 2024-07-04。

作者照片

作者简介:

李硕(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化调度, E-mail: 1795186363@qq.com

刘莉(1963), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。

作者姓名



# 考虑不确定性的电热氢综合能源系统优化配置

李硕, 刘莉, 孙天贺

(1. 沈阳工程学院、辽宁省沈阳市沈北新区蒲昌路 18 号)

## Research on Optimizing Energy Storage Capacity Configuration Considering the Correlation between Wind and Solar Power Output

Shuo Li, Li Liu, Tianhe Sun

(1. Shenyang Institute of Technology, 18 Puchang Road, Shenbei New District, Shenyang City, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** To make full use of wind energy and geothermal energy, and to minimize the comprehensive cost, the first stage is capacity configuration, and the second stage is max-min-max two-stage robust multi-vector optimal configuration model operating in the worst scenario, to optimize the configuration of wind power, cogeneration unit, electric to hydrogen device, ground source heat pump and energy storage of the system. Based on the robust optimization method, the bilateral uncertainty of wind power and load is processed. A typical scenario of wind power and load is obtained by using Latin hypercube sampling method and K-means clustering method. Based on the typical scenario, a box-type uncertainty set independent of probability distribution is used to describe the uncertainty of wind power and load, and the upper and lower boundary interval represents the fluctuation range of wind power and load. It can effectively ensure that the robust optimization results are not affected by wind power and load fluctuation parameters. Finally, through the analysis of an example, it is proved that the proposed model can reduce the cost while ensuring the reliability of power supply.

**KEY WORDS:** Uncertainty, two-stage robustness, integrated energy system

**摘要:** 为充分利用风能和地热能, 以综合成本最小为目标, 建立了第一阶段为容量配置, 第二阶段为在最恶劣场景下运行的 max-min-max 两阶段鲁棒多向量优化配置模型, 对系统的风电、热电联产机组、电转氢装置、地源热泵和储能进行优化配置。基于鲁棒优化方法对风电和负荷的双侧不确定性进行处理, 采用拉丁超立方采样法和 K-means 聚类方法得到风电和负荷的典型场景, 在典型场景基础上采用不依赖于概率分布的盒式不确定集描述风电和负荷的不确定性, 以上下边界区间表示风电和负荷的波动范围, 能有效保证鲁棒优化结果不受风电和负荷波动参数的影响。最后, 通过算例分析, 验证了所提模型可以在保证供电可靠性的同时降低成本。

**关键词:** 不确定性, 两阶段鲁棒, 综合能源系统

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

2021 年, 我国首次提出了构建新型电力系统的重要战略目标。2022 年, 我国风电装机规模 3.6 亿千瓦, 占总装机的 14%; 风电发电量 0.8 万亿千瓦时, 占总发电量的 9%。随着风电并网比例迅速增加, 以及日益增长的负荷需求, 降低新能源不确定性影响, 是支撑电力系统协同优化调度问题的关键技术, 有助于电力资源的灵活调节和新能源协同消纳。

传统的综合能源系统优化配置是基于确定性优化开展研究的<sup>[1]</sup>。由于风电出力的波动性与间歇性, 用户行为的复杂性, 使风电与负荷都具有不确定性, 采用确定性优化方法求解出的配置方案可能在实际运行中缺乏适用性和可靠性。因此, 需要引入不确定优化方法。目前考虑不确定性的配置方法有场景法、随机优化和鲁棒优化等。场景法在场景缩减时可能会导致极限场景的丢失; 随机优化方法需要大量采样, 从采样数据中总结出统计特征, 其过度依赖于不确定因素的概率分布, 而不确定因素的概率分布往往很难测定, 且测定成本较高; 当实际情况相对测定的概率分布出现偏离时, 最优配置结果也往往不再最优<sup>[2]</sup>。

相对而言, 鲁棒优化能够保证不确定事件发生时的可靠性。鲁棒优化不需要事先给定不确定参数的概率分布, 而是通过一个不确定集来描述参数的波动, 只要参数的取值在不确定集范围之内, 鲁棒优化模型的解一定可行。文献[3]基于能源集线器模型建立了区域综合能源系统鲁棒规划模型, 以上下边界区间描述负荷的不确定性, 实现了系统综合成本最优。文献[4]考虑了风电与负荷的不确定性和相关

性,基于鲁棒优化和 Cholesky 分解技术对风电和负荷进行处理,构建了以设备的全寿命周期成本最小为目标的分布式电源鲁棒规划模型,提高了系统的投资效益。文献[5]以投资和运行成本之和最小建立了两阶段鲁棒规划模型,引入了 minimax 后悔度以降低传统鲁棒优化的保守性。文献[6]引入信息间隙决策理论处理供需两侧的不确定性,以项目内部收益率最大为目标,提出了一种面向投资收益的鲁棒优化配置模型,该模型兼顾方案鲁棒性的同时提高了系统投资收益。文献[7]以投资成本最小及系统峰谷波动最小为目标,建立了电热耦合系统多目标鲁棒优化模型,并采用 NSGA-II 和 TOPSIS 相结合的求解算法实现多目标问题求解。上述文献采用鲁棒方法进行协同优化配置,可在确保新能源消纳目标的前提下,提高系统整体的经济性。但是,无法根据需要对鲁棒配置方案的保守度进行灵活调节。

因此,本文针对风电和电负荷的双侧不确定性问题,首先采用拉丁超立方采样法生成初始场景,然后利用 K-means 聚类方法对初始场景进行场景缩减,便得到风电和电负荷的典型场景。最后采用盒式不确定集对典型场景进行处理,以上下界区间描述典型场景的风电和电负荷波动。并以综合成本最小为目标,建立了第一阶段为容量配置,第二阶段为在最恶劣场景下运行的 max-min-max 两阶段鲁棒多向量优化配置模型。采用列和约束生成算法(power to hydrogen, P2H)将两阶段鲁棒优化问题转变为主、子问题,再用强对偶转换将子问题线性化,而后便可在 Matlab 中用 cplex 求解器进行求解。最后,通过算例分析,验证了所提模型可以在保证供电可靠性的同时降低成本。

## 1 区域综合能源系统结构及设备模型

### 1.1 系统组成

图 1 是典型的电热氢区域综合能源系统。该系统通过公共节点与外部电网相连。正常运行时,与外电网的联络线上没有功率传输,只有发电不能满足负荷需要时才向外电网购电。系统中有风电机组、CHP 机组、地源热泵、P2H、储能设备等。在供暖季节,地源热泵通过较少的电能,将土壤中的低品位热能传递到建筑物的供热系统,为用户供暖。储能设备用于应对风电出力的不确定性和波动性,在风电产生过剩时进行存储,以便在低产能时释放电能,确保系统的稳定运行。P2H 装置在风电出现盈余时将电能转化为氢气直接进行售卖;系统通过 CHP 机组将电网和热网进行耦合。

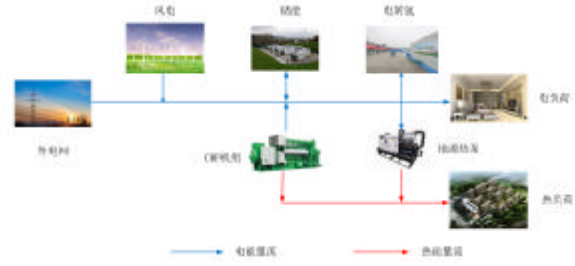


图 1 电热氢综合能源系统框架图

### 1.2 CHP 机组运行特性

当机组的热出力小于  $Q_1$  时,随着热出力的增加,电出力会下降;当机组的热出力大于  $Q_1$  时,随着热出力的增加,电出力的调节范围也在逐渐减小。CHP 机组的热电运行特性如下:

$$\begin{cases} Q_{CHP,min} \leq Q_{CHP} \leq Q_{CHP,max} \\ P_{CHP,min} - C_{v2}Q_{CHP} \leq P_{CHP} \\ \leq P_{CHP,max} - C_{v1}Q_{CHP} & Q_{CHP} \leq Q_1 \\ P_{CHP,min} - C_{v2}Q_{CHP} + C_m(Q_{CHP} - Q_1) \\ \leq P_{CHP} \leq P_{CHP,max} - C_{v1}Q_{CHP} & Q_{CHP} > Q_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P_{CHP}$ 、 $Q_{CHP}$  分别为热电机组的电出力和热出力,  $P_{CHP,max}$ 、 $P_{CHP,min}$  分别为热电机组不产热时的电出力上下限,  $Q_{CHP,min}$ 、 $Q_{CHP,max}$  为热电机组的热出力下限和上限,  $C_{v1}$ 、 $C_{v2}$ 、 $C_m$  为斜率,  $Q_1$  为热电机组在最小凝汽工况下运行的最小进汽量时对应的热出力值。

### 1.3 电转氢模型

如果不考虑电解槽的传热,则碱式电解槽的制氢效率的表达式如下:

$$v_{H_2} = \eta_e \frac{P_{P2H}}{HHV_{H_2}} \quad (2)$$

式中:  $HHV_{H_2}$  表示氢气的高热值,热值一般代表单位体积燃料燃烧时所放出的全部热量,高热值则为是燃料燃烧热值和水蒸汽冷凝热值之和;  $\eta_e$  表示电解槽运行效率,一般为 65%~79%;  $v_{H_2}$  是电解槽产氢速率。

在正常运行模式下,电解槽效率与电解槽消耗功率近似为线性关系,一般可认为电解槽的效率恒定,则可转变为 P2H 设备产氢量和电解槽耗电功率之间关系的产出模型:

$$V_{H_2,t} = \frac{P_{P2H,t}}{\mu_h} \quad (3)$$

式中:  $V_{H_2,t}$  为电解槽  $t$  时段的产氢体积;  $P_{elc,t}$  为电解槽  $t$  时段的耗电功率;  $\mu_h$  为电解槽单位耗电量,一般取 4.50-5.04(kW·h/Nm<sup>3</sup>)。

### 1.4 地源热泵模型

在电热氢区域综合能源系中,认为地源热泵的热能输入计量不变,不考虑地源热泵散热损失。可采用制热能效系数  $COP$  来表示热泵的工作特性。地源热泵的热能输出和电能输入之间的关系如下式所示:

$$H_{HP,t} = COP \cdot P_{HP,t} \quad (4)$$

地源热泵的热能输出受到其上下边界的限制:

$$\underline{H}_{HP} \leq H_{HP,t} \leq \overline{H}_{HP} \quad (5)$$

式中:  $H_{HP,t}$  为地源热泵  $t$  时段热出力,  $P_{HP,t}$  为地源热泵  $t$  时段耗电量,  $COP$  为地源热泵的制热系数,  $\underline{H}_{HP}$  为地源热泵热出力最小值;  $\overline{H}_{HP}$  为地源热泵热出力最大值。

## 2 综合能源系统两阶段鲁棒优化配置模型

为了确保电热氢区域综合能源系统配置方案在实际运行中面对风电和电负荷的波动和变化时,能够保持安全可靠的供电,并提高系统的经济性。建立了综合成本最小的 max-min-max 两阶段鲁棒优化配置模型。

### 2.1 目标函数

两阶段鲁棒优化配置模型将鲁棒性建模分为预优化和鲁棒优化两个阶段,使得系统能够更全面地考虑风电和电负荷的不确定性和变化因素。预优化阶段有助于在较短时间内找到一个投资成本相对较低的初始配置,而鲁棒优化阶段则进一步优化以提高系统的鲁棒性。其目标函数如式(6)所示,预优化阶段的 min 为配置优化,鲁棒优化阶段的 max min 为运行优化。

$$\min C = \min_x \left( C_{\text{int}} + \max_u \min_y C_{\text{ope}} \right) \quad (6)$$

式中:  $x$  表示配置变量,是第一阶段决策变量,具体如式(7)所示。 $y$  表示运行变量,是第二阶段决策变量,具体如式(8)所示。 $y$  由配置变量  $x$  和不确定变量  $u$  共同决定。 $\max \min$  的目标函数考虑最大化在风电和电负荷不确定性的情况下的最小成本。即在所有可能的风电和电负荷变化范围内,确保系统在最坏情况下的成本也能够保持在一个相对较低的水平。外层的  $\max$  表示在整个  $u$  中找到最差情况下的风电和电负荷,内层的  $\min$  则表示在给定  $x$  和  $u$  时找到最小的  $y$ 。 $C_{\text{int}}$  为投资成本,  $C_{\text{ope}}$  为运行成本,具体如式(4.4)和式(4.5)所示。

$$x = [E_{WT}, E_{CHP}, E_{P2H}, E_{HP}, E_S]^T \quad (7)$$

$$y = [P_{WT,t}, P_{CHP,t}, P_{HP,t}, P_{S,dis,t}, P_{S,ch,t}, P_{P2H,t}, P_{buy,t}, P_{L,t}]^T \quad (8)$$

式中: 分别为风电配置容量, CHP 机组配置容量, P2H 装置配置容量, 热泵配置容量和储能配置容量  $P_{WT,t}$ ,  $P_{S,dis,t}$ ,  $P_{S,ch,t}$ ,  $P_{buy,t}$ ,  $P_{L,t}$  分别为风电  $t$  时段风电实际出力、储能充电功率、储能放电功率、购电功率和负荷功率。

$$C_{\text{int}} = \sum_{i \in I} \frac{\rho(1+\rho)^{r_i}}{(1+\rho)^{r_i} - 1} c_i E_i \quad (9)$$

式中:  $\rho$  为贴现率;  $i$  为设备类型;  $I$  为设备类型集合,包括风电、CHP 机组、P2H 装置、地源热泵和储能设备;  $r_i$  为设备  $i$  的投资折现年数;  $c_i$  为设备  $i$  的单位投资成本;  $E_i$  为设备  $i$  的配置容量。

运行成本包括设备的维护成本、燃料成本和售氢收益,具体如下所示:

$$C_{\text{ope}} = C_{\text{om}} + C_{\text{fuel}} + C_{\text{buy}} - C_{H_2} \quad (10)$$

$$\begin{cases} C_{\text{om}} = \sum_{i \in I} \sum_{t=1}^{N_T} c_{i,om} P_{i,t} \Delta t \\ C_{\text{fuel}} = \sum_{t=1}^{N_T} c_{\text{fuel}} P_{CHP,t} \Delta t \\ C_{\text{buy}} = \sum_{t=1}^{N_T} c_{\text{buy}} P_{\text{buy},t} \Delta t \\ C_{H_2} = \sum_{t=1}^{N_T} c_{H_2} V_{H_2,t} \Delta t \end{cases}$$

式中:  $C_{\text{om}}$ ,  $C_{\text{fuel}}$ ,  $C_{\text{buy}}$ ,  $C_{H_2}$  分别为设备的维护成本,燃料成本、购电成本和售氢收益。 $c_{i,om}$  为设备  $i$  的单位维护成本;  $P_{i,t}$  为  $t$  时刻设备  $i$  的功率;  $c_{\text{fuel}}$  为 CHP 机组的单位燃料成本;  $c_{\text{buy}}$  为电价;  $c_{H_2}$  为单位体积氢气的售价;  $V_{H_2,t}$  为  $t$  时段的制氢总量。

### 2.2 约束条件

电热氢区域综合能源系统优化配置模型包括电平衡约束、热平衡约束、配置容量约束、设备约束、购电功率约束等。

#### 2.2.1 热平衡约束:

$$H_{CHP,t} + H_{HP,t} = H_{L,t} \quad (11)$$

式中:  $H_{CHP,t}$  为 CHP 机组  $t$  时段的热输出功率;  $H_{HP,t}$  为地源热泵  $t$  时段的热输出功率;  $H_{L,t}$  为热负荷  $t$  时刻功率。

#### 2.2.2 电功率平衡约束:

$$P_{S,dis,t} + P_{CHP,t} + P_{WT,t} + P_{buy,t} = P_{L,t} + P_{S,ch,t} + P_{P2H,t} \quad (12)$$

#### 2.2.3 P2H 装置功率约束如式:

$$0 \leq P_{P2H,t} \leq \overline{P}_{P2H} \quad (13)$$

式中:  $\overline{P}_{P2H}$  为电解槽容量上限。

#### 2.2.4 购电功率约束:

$$0 \leq P_{\text{buy},t} \leq \overline{P}_{\text{buy}} \quad (14)$$

#### 2.2.5 储能约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{S,ch,t} \leq U_{S,ch,t} \overline{P}_S \\ \overline{P}_S = \mu E_S \\ 0 \leq U_{S,dis,t} + U_{S,ch,t} \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $P_{ch,t}$  为储能装置  $t$  时段的充电功率;  $P_{dis,t}$  为储能装置  $t$  时段的放电功率;  $P_{max}$  为储能的充放电功率上限;  $z_t$  为储能  $t$  时段的充放电状态的 0-1 变量, 1 时表示处于充/放电状态;  $Q$  为储能容量和储能充放电功率上限的比例系数。

2.2.6 CHP 机组输出功率与地源热泵输出功率约束如式(1)和式(4-5)所示

### 2.3 模型求解

本文采用 C&CG 算法来求解两阶段鲁棒优化配置问题。C&CG 算法将原问题分解为主问题和子问题进行交替求解, 加快了求解效率。因子问题是非线性问题, 在交替求解前需用库恩塔克等效平衡条件和辅助变量将问题线性化, 然后在 Matlab 仿真软件中调用 Cplex 求解器交替求解, 最终得到原问题的解。

$$\begin{cases} \min_x (c^T x + \max_{u,y} \min b^T y) \\ \text{s.t. } Dx \geq d \\ Fx + Gy \geq h \\ Ky = k \\ Ey \geq e \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $c$  和  $b$  为对应的系数列向量;  $d, h, k, e$  为对应约束下的常数列向量;  $D, F, G, K, E$  为对应约束下的系数矩阵。分解式(4.12)得到如式(4.13)所示的主问题。

$$\begin{cases} \min_x (c^T x_l + \alpha) \\ \text{s.t. } \alpha \geq b^T y_l \\ Dx_l \geq d \\ Fx_l + Gy_l \geq h \\ Ky_l = k \\ Ey_l \geq e \\ Iy_l = u_l^* \\ \forall l \leq m \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $l$  为迭代次数;  $\alpha$  为辅助变量;  $x_l$  和  $y_l$  分别为迭代  $l$  次的解;  $u_l^*$  为迭代  $l$  次后的  $u$  值;  $m$  为最大迭代次数;  $Iy_l = u_l^*$  表示风电和电负荷的值取迭代  $l$  次后得到的最坏情况下的值。

分解式(16)得到如式(17)所示的子问题。

$$\max_{u \in U} \min_{y \in \Omega(x,u)} b^T y_l \quad (18)$$

式中:  $\Omega(x,u)$  表示在  $(x,u)$  给定时,  $y_l$  的可行域, 如式(19)所示。

$$\Omega(x,u) = \left\{ y_l \mid \begin{cases} Ey_l \geq e, & \rightarrow \gamma \\ Ky_l = k, & \rightarrow \lambda \\ Fx_l + Gy_l \geq h, & \rightarrow v \\ Iy_l = u. & \rightarrow \pi \end{cases} \right\} \quad (19)$$

式中:  $\gamma, \lambda, v, \pi$  为子问题各约束对应的对偶变量。

根据式(19)和库恩塔克等效平衡条件, 将式(18)中的内层  $\min$  转化为  $\max$  形式, 并与外层的  $\max$  问题合并, 得到如式(20)所示的对偶问题。

$$\begin{cases} \max_{u \in U, \gamma, \lambda, v, \pi} e^T \gamma + k^T \lambda + (h - Fx)^T v + u^T \pi \\ \text{s.t. } E^T \gamma + K^T \lambda + G^T v + I^T \pi \leq c \\ \gamma \geq 0, \lambda \geq 0, v \geq 0 \end{cases} \quad (20)$$

将式(19)代入式(20)后, 通过引入相关约束与辅助变量对其线性化, 可以得到:

$$\begin{cases} \max_{B, B', \gamma, \lambda, v, \pi} e^T \gamma + k^T \lambda + (h - Fx)^T v + u^T \pi + \Delta u^T B' \\ \text{s.t. } \gamma + K^T \lambda + G^T v + I^T \pi \leq c \\ 0 \leq B' \leq \bar{\pi} B \\ \pi - \bar{\pi}(1 - B) \leq B' \leq \pi \\ \sum_{t=1}^{N_T} B_{WT,t} \leq \Gamma_{WT} \\ \sum_{t=1}^{N_T} B_{L,t} \leq \Gamma_L \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\Delta u = [\Delta u_{WT,t}^-, \Delta u_{L,t}^+]^T$ ;  $B = [B_{WT,t}^-, B_{L,t}^+]^T$ ;  $\bar{\pi}$  为对偶变量的上界, 可取为足够大的正实数;  $B' = [B'_{WT,t}, B'_{L,t}]^T$  为引入的连续辅助变量。

经过上述分解, 随后可用 C&CG 算法求解, 流程如下:

(1) 初始设置: 设定目标函数值的下界为  $L_B = -\infty$ , 上界为  $U_B = +\infty$ , 给定不确定变量  $u$  的初始值、不确定调节参数  $\Gamma$  和迭代次数  $l=0$ 。

(2) 主问题求解: 根据  $u_l^*$  求解式(17), 得到主问题的解  $(x_l^*, \alpha_l^*, y_l^*, \dots, y_l^*)$ , 把  $x_l^*$  带入到式(21), 并更新  $L_B = c^T x_l^* + \alpha_l^*$ 。

(3) 子问题求解: 求解式(21), 得到子问题的  $b^T y_l$  和  $u_{l+1}^*$ , 更新  $U_B = \min\{U_B, c^T x_l^* + b^T y_l^*\}$ 。

(4) 收敛判断: 给定收敛阈值  $\varepsilon$ , 若满足  $U_B - L_B \leq \varepsilon$ , 则停止迭代, 返回最优解和; 否则增加变量  $y_{l+1}$ , 令  $l=l+1$ , 跳转至第(2)步, 直至满足  $U_B - L_B \leq \varepsilon$ 。

## 3 算例分析

本文算例以我国北方某综合能源系统在供暖期为研究对象, 该地区有丰富的风能和地热能资源, 可配置的风电容量上限为 5000kW, 地源热泵容量上限为 450kW, 其余设备: CHP 机组和储能装置的配置容量上限分别为 2500kW 和 1500kW·h, P2H 装置不设安装容量上限。地源热泵、P2H 装置、储能设备的最小功率均为 0。系统相关参数如表 4.1 所示, 售氢价格为 3.6 元/Nm<sup>3</sup>, 缺负荷惩罚成本为

10 元/kW·h。

### 3.1 配置结果分析

设置 3 种配置方案, 验证文中所提模型的有效性和算法的可靠性。(1) 电热氢区域综合能源系统鲁棒优化配置 ( $\Gamma_{WT}=13$ ,  $\Gamma_L=13$ ); (2) 电热区域综合能源系统鲁棒优化配置 ( $\Gamma_{WT}=13$ ,  $\Gamma_L=13$ ); (3) 电热氢区域综合能源系统传统鲁棒优化配置 ( $\Gamma_{WT}=24$ ,  $\Gamma_L=24$ )。

表 2 各配置方案设备容量和成本

| 参数            | 方案 1    | 方案 2   | 方案 3    |
|---------------|---------|--------|---------|
| 储能容量/(万 kW·h) | 1068    | 1104   | 1141    |
| 地源热泵容量/万 kW   | 301     | 321    | 324     |
| 风电/万 kW       | 4160    | 4108   | 4550    |
| CHP 机组/万 kW   | 2206    | 2206   | 2372    |
| P2H 装置/万 kW   | 777     | 0      | 100     |
| 年投资成本/亿元      | 517.88  | 489.72 | 532.77  |
| 制氢收益/亿元       | 30.74   | 0      | 2.92    |
| 年运行成本/亿元      | 829.2   | 859.68 | 841.7   |
| 弃风率/%         | 0       | 1.45   | 0       |
| 总成本/亿元        | 1347.08 | 1349.4 | 1374.47 |

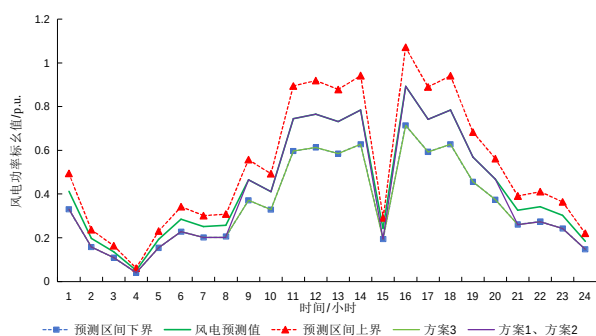


图 2 各方案风电典型日出力

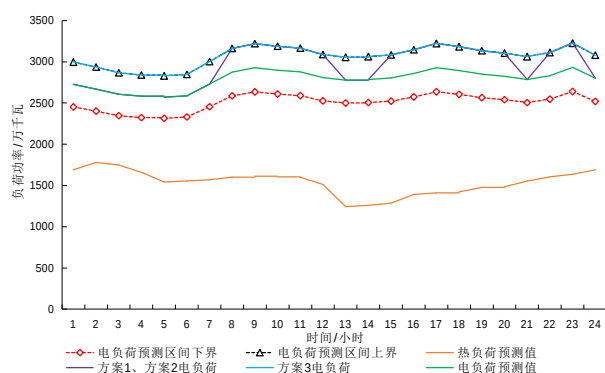


图 3 各方案电负荷典型日需求

以风电和电负荷典型日为例进行分析, 各方案的风电实际出力标幺值如图 2 中所示, 方案 1 和方案 2 在 1-8 时、15 时、21-24 时风电出力取到区间最小值。方案 3 在 1-24 时风电出力都取区间下界。电负荷实际值如图 4.4 所示, 方案 1 和方案 2 在 8-12 时、15-20 时、22-23 时取到了区间最大值。方案 3 在 1-24 时电负荷实际值都取区间上界。

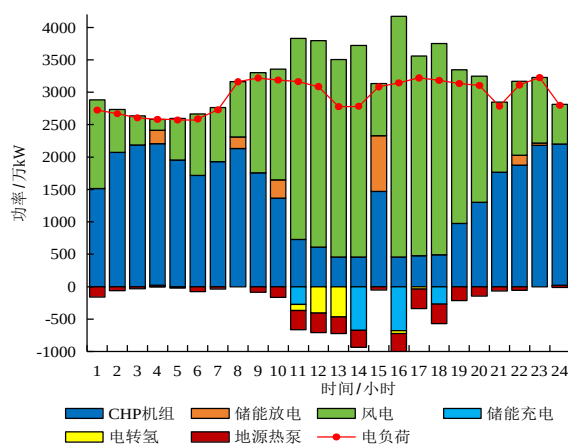


图 4 方案 1 典型日电平衡图

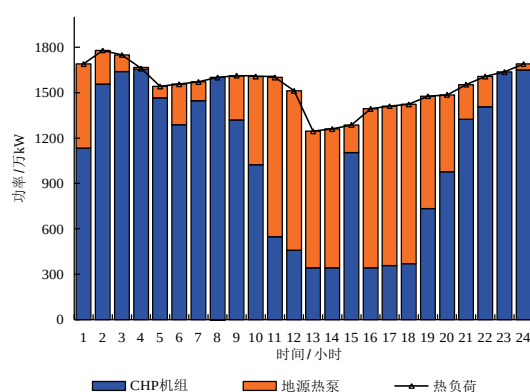


图 5 方案 1 典型日热平衡图

从图 4 和图 5 可以看出, 方案 1 在 11-14 时、16-18 时风电出力较大。P2H 装置在风电出力较大的 11-13 时、16-17 时开始工作, 将电能转化为氢气, 获取制氢收益。储能装置在风电出力较大的 11 时、14 时、16 时、17 时进行储能, 在风电较小的 4 时、8 时、10 时、15 时、22 时、23 时释放, 起到削峰填谷的作用。地源热泵在 1-22 时、24 时工作, 将电能转化为热能, 降低了 CHP 机组热出力, 使系统出力更加灵活, 风电利用率进一步提升。在 13-14 时、16-18 时因风电出力大, CHP 机组出力已达最小值, CHP 机组只能提供一部分热出力, 此时地源热泵出力最大, 消纳更多的风电。

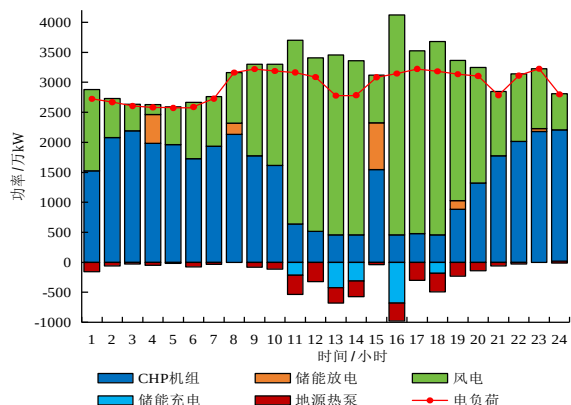


图 6 方案 2 典型日电平衡图

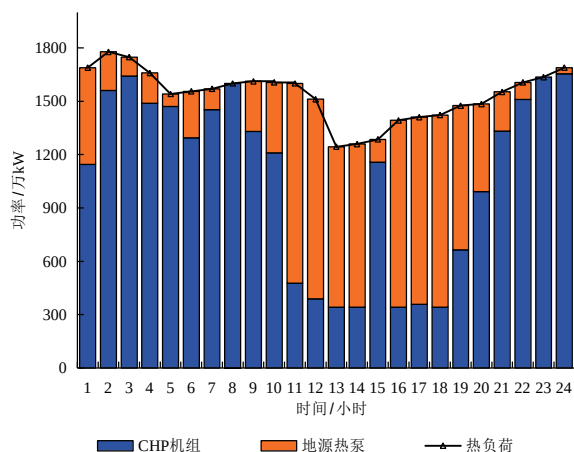


图7 方案2典型日热平衡图

从图6和图7可以看出,在11-14时、16-18时风电出力较大时,方案2多余的风电由地源热泵和储能装置共同消纳,因为和方案1相比没有配置P2H装置,考虑到配置成本,过大的储能装置利用率较低且不经济,所以会产生一定的弃风,降低了风电消纳率。

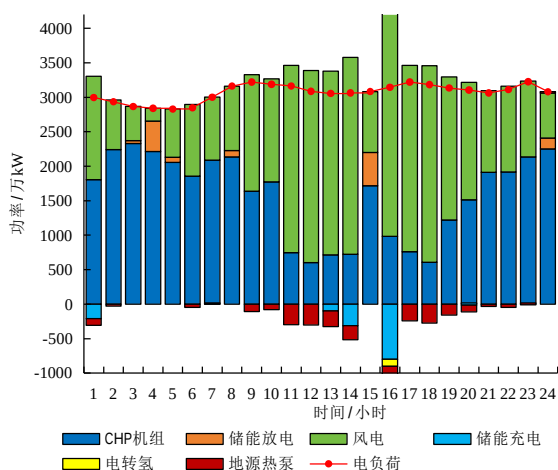


图8 方案3典型日电平衡图

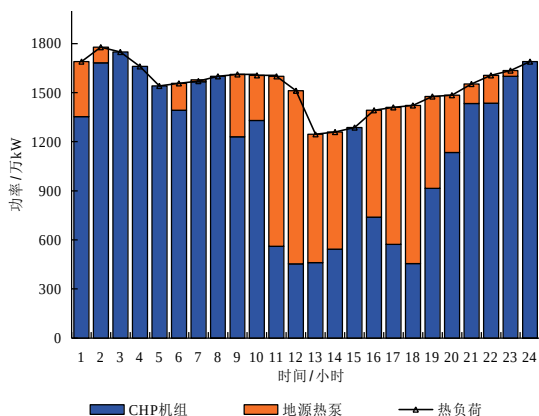


图9 方案3典型日热平衡图

从图8和图9可以看出,方案3考虑的情况过于保守,P2H装置仅在16时有较小的功率,在1

时、13-14时、16时风电由地源热泵和储能消纳。地源热泵在3-5时、7-8、15时、24时未工作,热负荷全部由CHP机组提供,此时CHP机组受热负荷限制,电出力无法提高,电负荷的不足由储能释放电能提供。

## 4 结论

为了解决风电和负荷不确定性导致的弃风和运行可靠性问题,提升系统容量配置的合理性,本文在考虑源荷双侧不确定性的基础上,对电热氢区域综合能源系统容量优化配置展开研究。在典型场景的基础上提出一种不依赖于概率分布的盒式不确定集描述风电和负荷的不确定性,并引入不确定性调节参数以有效控制配置方案的保守性,算例分析表明,通过改变不确定调节参数,能在保证供电可靠性的同时提高经济性。

## 参考文献

- [1] 陈灵敏, 吴杰康, 张文杰, 等. 基于棒优化的微能源网综合需求响应协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 159-169.
- [2] 李红伟, 吴磊, 荆浩婕, 等. 考虑风光不确定性的综合能源系统区间优化调度[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5076-5083.
- [3] Yang L, Dan W, Hongjie J, et al. Multi-objective stochastic expansion planning based on multi-dimensional correlation scenario generation method for regional integrated energy system integrated renewable energy [J]. Applied Energy, 2020, 276.
- [4] 石锦凯, 鲍彦, 陈振, 等. 计及充电负荷不确定性的充电站储能鲁棒优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 49-58.
- [5] 张敏, 王金浩, 常潇, 等. 考虑可再生能源不确定性的热-电耦合微能源系统多目标鲁棒规划方法[J]. 中国电力, 2021, 54(04): 119-129.
- [6] 郭尊, 李庚银, 周明, 等. 考虑网络约束和源荷不确定性的区域综合能源系统两阶段鲁棒优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(09): 3090-3100.
- [7] Li P, Wang Z X, Wang J H, et al. Two-stage optimal operation of integrated energy system considering multiple uncertainties and integrated demand response [J]. Energy, 2021, 225(4): 120256.

收稿日期: 2024-07-04。

作者照片

作者简介:

李硕(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化, E-mail: [1795186363@qq.com](mailto:1795186363@qq.com);

刘莉(1963), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。

作者姓名



# 一起调相机励磁系统故障分析及措施建议

张国栋

(国网青海省电力公司超高压公司, 青海 西宁 810008)

**Abstract:** The synchronously tuned camera is actually running without mechanical load (empty load). The reactive power it absorbs from the grid is supplied only to the loss of the motor itself, so the synchronously tuned camera always operates with an electromagnetic power and zero power factor close to a thousand zeros. Improving the quality of system power supply supply synchronous generator excitation current power supply and its ancillary equipment is collectively referred to as excitation system. The automatic excitation regulator has a considerable effect on improving the stability of the power system and the online group. In particular, the development of modern power system leads to the trend of reducing the stability limit of the unit, and also promotes the continuous development of excitation technology.

**Keywords:** adjust the camera; Excitation; Measures

**摘要:** 同步调相机实际上是一台不带机械负载(空载)运行的。它从电网吸收的有功功率仅供给电机本身的损耗,因此同步调相机总是在接近千零的电磁功率和零功率因数的情况下运行。改善系统供电质量供给同步发电机励磁电流的电源及其附属设备统称为励磁系统。的自动励磁调节器对提高电力系统并联机组的稳定性具有相当大的作用。尤其是现代电力系统的发展导致机组稳定极限降低的趋势,也促使励磁技术不断发展。

**关键词:** 调相机; 励磁; 措施

## 1 前言

同步调相机实际上是一台不带机械负载(空载)运行的。它从电网吸收的有功功率仅供给电机本身的损耗,因此同步调相机总是在接近千零的电磁功率和零功率因数的情况下运行。调相机是一种特殊的“发电机”,但它不发有功功率,仅“发出”无功功率。励磁系统一般由励磁功率单元和励磁调节器两个主要部分组成。励磁功率单元向同步发电机转子提供励磁电流;而励磁调节器则根据输入信号和给定的调节准则控制励磁功率单元的输出。

2020年×月×日,某站2号调相机并网运行时,调变组保护A、B屏励磁变过流动作,2号机出口断路器跳闸,现场检查发现励磁系统#3整流柜损坏,柜内三相母排熔断。

## 1 故障现象

故障前,2号调相机并网运行,无功出力为滞相24Mvar;故障发生后12ms,励磁系统检测到励磁变低压侧电流异常升高,励磁调节器触发角度由86度调整到150度逆变角;202ms,励磁变过流保护动作,发出跳并网断路器和磁场断路器指令;253ms,500kV侧并网断路器断开;263ms,灭磁回路跨接器闭合,灭磁电阻投入;325ms,磁场断路器断开,励磁系统闭锁触发脉冲并退出运行,调相机进入惰转状态;522ms,励磁绕组过负荷反时限动作,此时并网断路器和磁场断路器已分断;5.6s,机端电压衰减到0,励磁变低压侧电压随之衰减到0,故障电流消失。由于调相机开路瞬变时间常数达7.5s,且故障期间1、2号整流柜正常运行,因此在励磁变过流保护动作之前调相机未见明显异常,转子电流由770A减小至672A,无功出力由滞相24Mvar变化为进相6.8Mvar,无功波动为30.8Mvar,未出现失磁现象;故障期间1号调相机运行正常,无功出力未有波动,此次2号调相机励磁系统故障对电网及调相机本体影响有限。

## 2 现场检查情况

3号整流柜正面,-B相散热器与晶闸管阳极接触部分有灼伤痕迹,-B相晶闸管陶瓷外壳裂开,+B、-B相晶闸管外挡板脱落,其余5只晶闸管无明显异常。

3号整流柜背面,-A、-B、-C相快熔开裂,交直流侧隔离刀闸、交直流铜排有熏黑痕迹,脉冲板及屏后二次线损毁,#3整流柜与#2整流柜连接处三相交流铜排熔断。

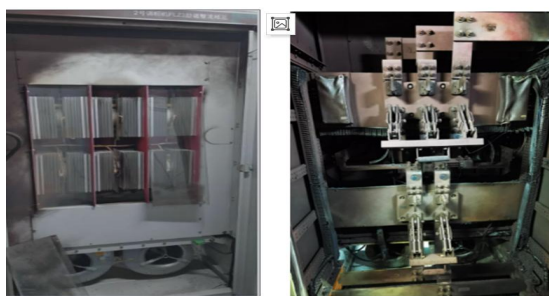


图1 3号整流柜正视图

图2 3号整流柜背视图

### 3 励磁系统故障原因分析

3号整流柜-B相晶闸管关断承受反压时被击穿,随着-C相晶闸管正常导通,整流桥BC相间短路。

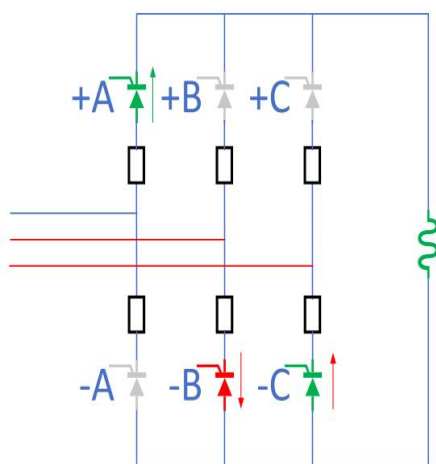


图3-B 相晶闸管击穿, BC 相间短路

-A 晶闸管被提前触发。故障发生后, -B 相晶闸管上承受的反向电流迅速增大, 短路电流由阴极流向阳极的过程中, 在阴极和门极之间产生电压差, 一部分短路电流经由脉冲变压器副边的二极管形成通路, 将脉冲变副边的铜箔烧断并向-A 晶闸管门极放电(图4红圈处), 造成-A 晶闸管提前触发, 导致两相短路发展为三相短路。

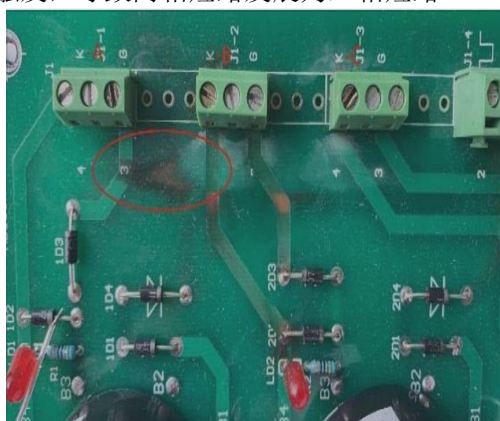


图4 -A 晶闸管门极放电痕迹

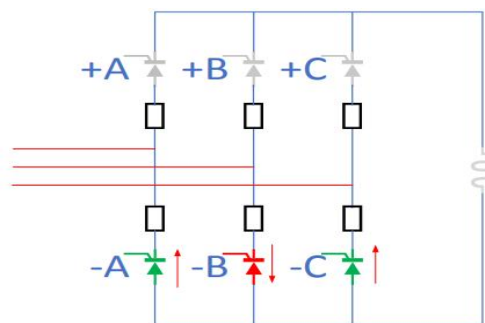


图5 晶闸管侧三相短路

BC 相间发生短路后, 由于快速熔断器  $I_2 t$  值超标, 未能在晶闸管损坏之前迅速熔断, 无法保护晶闸管。故障发生后, 抽取该批次未损坏的 6 只快速熔断器在上海电器设备检测所有限公司进行第三方检测。检测报告显示, 快速熔断器的弧前  $I_2 t +$  熔断  $I_2 t$  为  $10.6 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$  (快熔厂家对此款熔断器未开展相关实际  $I_2 t$  测试的型式试验, 其出厂值  $7.29 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$  为厂家理论计算值), 超过设计值 ( $7.29 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ ) 约 45%, 大于 5STP 26N6500 晶闸管 ( $10.125 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ ) 的  $I_2 t$ , 使得快速熔断器动作滞后, 无法有效保护晶闸管, 使得 -A、-C 相晶闸管因严重过流而击穿。

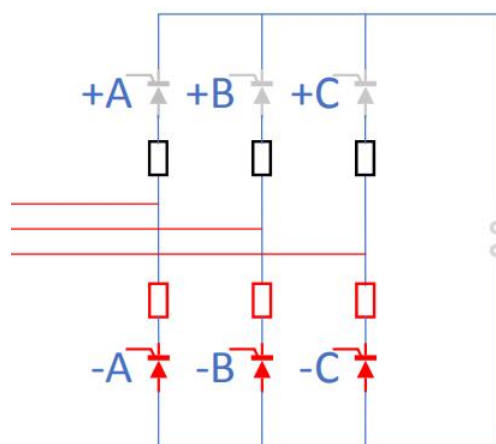


图6 快速熔断器未能保护晶闸管

-A 相快熔在通过大电流、内部燃弧后, 未能在内部彻底灭弧, 快熔破裂喷出的导电物质降低了柜内绝缘水平, 引发 -A、-B、-C 三相熔断器对晶闸管散热器的固定螺栓时间放电(图7和图8), 形成电弧。电弧使得快熔内侧(朝绝缘板)铜板烧蚀缺损, 瓷管釉面烧熔, 瓷管呈碎裂状; 而外侧(朝后门)铜板无烧蚀变形, 瓷管裂纹长而少。

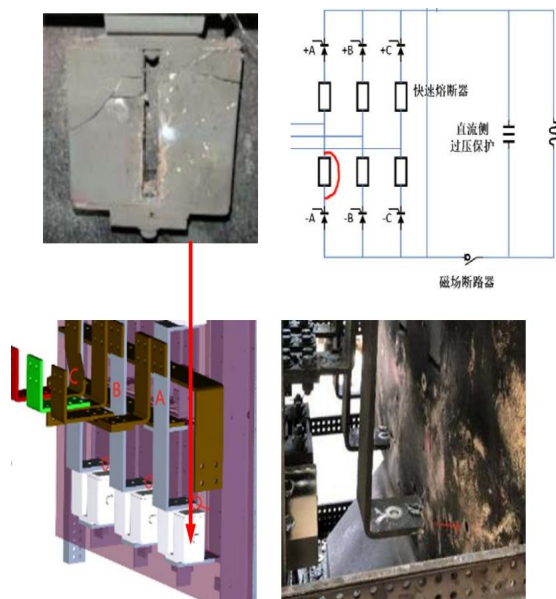


图 7 快熔破裂导致柜内产生电弧

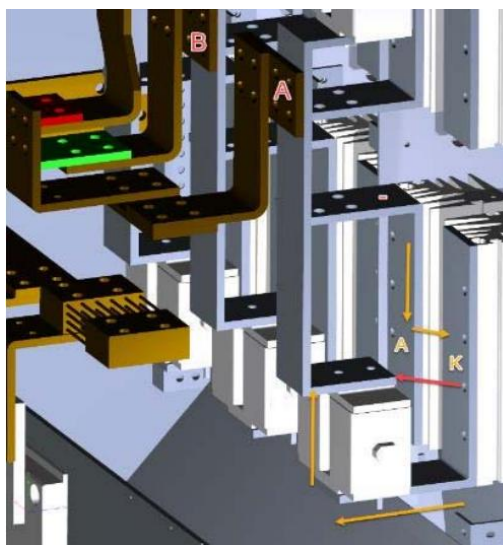


图 8 放电过程示意图(隐去了绝缘板)

电弧在柜内蔓延,经由交流母排的最薄弱部位(汇流铜排支撑处,铜排对地间距25mm(图9),且没有绝缘套管)放电,引发铜排三相短路,使得故障蔓延和扩大化。励磁母排安装到机柜采用了环氧板、不饱和树脂板,均属于有机绝缘,对于I级污秽等级,交流电压1545V需要满足的对地爬电距离不小于 $16 \times 1.545 = 24.72\text{mm}$ ,屏柜交接处(母排支撑)的铜排对地最小爬电距离为25mm,裕度过小,且未有绝缘措施,所以当屏柜内出现拉弧现象,屏柜内部有电时,此处为最薄弱部位最容易发生放电短路,引起铜排三相短路造成了故障扩大。

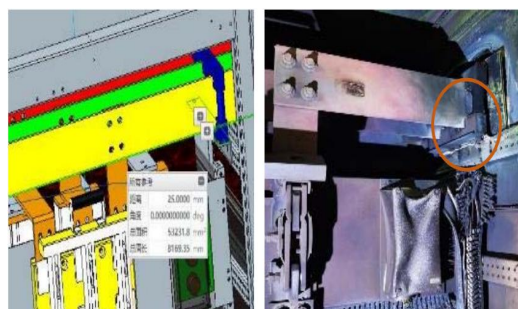


图 9 母排支撑与铜排的间距

6 后备过流保护在故障发生 200ms 后正确动作。由于调相机直轴开路瞬变时间常数约 7.5 秒,并网断路器和磁场断路器分断后,机端电压缓慢下降,无法立即阻断短路电流。长时间的短路电流作用于交流铜排相间短路点(图10),造成励磁系统烧毁。

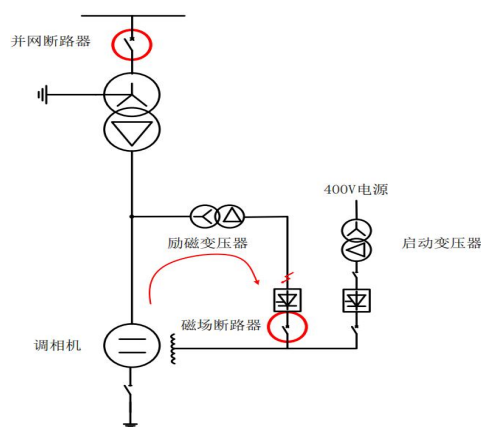


图 10 过流保护动作后的短路电流

#### 4 处理措施和建议

① 开展晶闸管应用筛选测试,保证供货晶闸管的合格率。所有调相机站励磁系统应提供晶闸管的出厂时间、投入使用时间、出厂报告及复测试验报告,如有不满足质控要求的,应予以更换。目前励磁系统晶闸管只测试了通态电压、反向断态电流、门极触发电流和门极触发电压等少数参数,应开展更加全面的筛选测试,涵盖断态电压临界上升率、维持电流、擎住电流、通态电流临界上升率、通态浪涌电流、门极控制开通时间等参数。

② 优化脉冲触发回路走线方式,提高脉冲触发回路抗干扰能力。工程中应严格禁止在励磁系统屏柜内出现强弱电共槽盒的情况,防止出现信号干扰情况,影响设备运行。

③ 快速熔断器应通过型式试验并提

供试验报告。部分型号快速熔断器规格书中的  $I2t$  参数为推算值, 第三方试验发现实测值和推算值的差距达到 45%, 造成产品选型不正确, 快熔无法起到保护晶闸管的作用。调相机在用励磁系统的快速熔断器应通过型式试验并提供试验报告, 实测  $I2t$  参数应与晶闸管参数相配合, 确保熔断器具备可靠的保护能力。不满足要求的, 应予以更换。

④ 一次回路应做好绝缘防护措施。南瑞科技和西门子的裸露金属铜排无相关的参考文献:

- [1] 许其品, 朱宏超, 王庆, 王亚婧, 袁亚洲, 杨铭, 杨鹏程, 徐春建, 一种大型调相机启动并网过程中的励磁控制方法, 掌桥科研 2017 年
- [2] 王永骥;张丽胜;涂健;同步发电机组励磁系统实时仿真研究;2000 年

作者简介:

张国栋 1981 年 6 月 男 副高级工程师 从事换流站运检管理, 研究换流站调相机运检技术。

绝缘措施, 存在人员触电和金属短路的风险, 所有的励磁系统裸露金属铜排增加绝缘护套, 完善绝缘措施。绝缘间隙较小的晶闸管散热器的固定螺丝等位置, 应增加绝缘螺帽。

⑤ 修改励磁变过流保护动作时间, 在 200ms 的基础上进一步缩小。在主保护快速熔断器失效的情况下, 可通过调变组保护迅速跳开并网开关和磁场断路器, 以减少故障持续时间, 从而减小对电网和设备的影响。

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于协调方波惯性控制的并网双馈风机快速频率支撑研究

袁晗, 关翔友, 王德林

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

## Coordinated Stepwise Inertial Control for Fast Frequency Support of Grid-connected DFIG-based Wind Turbine

Han Yuan, Xiangyou Guan, Delin Wang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan, Chengdu 611756 China)

**ABSTRACT:** In low inertia power grids, the importance of fast frequency response (FFR) control for large-scale doubly-fed induction generator (DFIG) based wind turbines is rapidly increasing. Most power grids require wind farms operated in a de-loaded mode to provide long-term additional active power support for the grid. However, the existing FFR control can merely provide short-term additional active power support due to the maximum power point operation for DFIG. This paper firstly proposes a coordinated fast frequency control (CFFC) to coordinate DFIG with the grid under de-loaded mode. CFFC is based on a stepwise inertial control framework and a rotor side converter controller for fast additional active power control to increase the frequency nadir of the power grid. In the rotor speed recovery stage, a coordination term is introduced to avoid secondary frequency dips. Finally, simulations are conducted to demonstrate the effectiveness and superiority of CFFC.

**KEY WORDS:** fast frequency response, doubly-fed induction generator, stepwise inertial control, frequency nadir

**摘要:** 在大量接纳新能源的低惯性电网中, 快速频率响应(fast frequency response, FFR)控制对大规模双馈风机(doubly-fed induction generator, DFIG)并网的重要性日益突增。现在的FFR控制都是基于最大功率点运行, 大多数电网要求风电减载并网运行, 以此为电网提供长时间的额外有功支撑。本文基于协调方波惯性控制提出了减载运行下DFIG的协调快速频率控制(coordinated fast frequency control, CFFC)。CFFC通过转子侧控制回路控制器设计和采用方波惯性控制框架, 使得风机所存储的有功可在短时间内全部交付完成, 以此提升电网频率低点。在转速恢复阶段, 引入协调项减缓控制过程中功率的变化率, 避免频率的二次跌落。最后通过仿真对比分析, 展现出CFFC的有效性和优越性。

**关键词:** 快速频率响应, 双馈风机, 方波惯性控制, 频率

低点

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

随着经逆变器控制并网的新能源机组的大幅度增加, 电网的系统惯性随之不断降低。现在低惯性电网的运行是一个众所周知的难题<sup>[1]</sup>。文献[1-3]提出了一些低惯性电网的频率控制解决方法, 目前主要的3个解决方法: 频率变化率(rate of change of frequency, ROCOF)模拟惯性控制、虚拟同步控制和快速频率响应(fast frequency response, FFR)控制。虽然虚拟同步控制的构网策略比模拟惯性控制可以更有效的模拟传统同步机组惯性。但是目前新能源电网机组的常用控制策略是基于PLL的跟网型同步技术, 以虚拟同步控制的构网型机组较少, 研究跟网型同步技术下的频率控制解决方案非常重要。

随着并网双馈风机(doubly-fed induction generator, DFIG)的大幅度增多, 系统惯性和系统频率支撑能力将大大降低。低惯性系统频率的变化速度大幅度变快, 由于同步机一次调频响应较慢, 有功交付响应较慢, 低惯性系统有可能出现大的频率低点。大的频率偏差将引起电网的不稳定, 如2016年南澳大利亚大停电<sup>[4]</sup>和2019年英国大停电<sup>[5]</sup>。FFR技术通常是指快于一次调频的动作的频率支撑控制技术。英国传统同步机组的一次调频响应规定在事件后2s内激活, 且在10s内交付全部所存储有功, 现在无法满足低惯性系统的需求。在文献[1]的研究认为FFR应在事件发生后的500ms内激活, 有功交付需在1s内完成。为解决



由电网惯量降低带来的挑战, FFR 控制对大规模 DFIG 并网的重要性日益突增。

以上分析可知, FFR 技术对低惯性新能源电网的重要性不言而喻。现在常将方波惯性控制 (stepwise inertial control, SIC) 和转矩极限惯性控制 [6][7] 等方法用于 DFIG 的短期频率支撑, 以此实现 FFR。文献在转矩极限的约束下采用 ROCOF 和转子转速设计了 DFIG 的短期频率支撑, 以此提升频率低点。由于将 ROCOF 信号作为控制器输入, 其测量噪声以及滤波将造成响应延迟甚至不稳定。不同于模拟惯性控制, 方波惯性控制基于事件测量, 可以快速响应 DFIG 的有功输出, 因此 SIC 可以明显的改善频率低点。然而方波惯性控制和转矩极限惯性控制设计的 FFR 控制手段容易造成频率的二次跌落。文献 [6] 采用高斯分布确定方波惯性控制下 DFIG 的输出功率, 以及 DFIG 的稳态运行点, 避免频率二次跌落。但是 DFIG 运行在最大功率点 (maximum power point, MPP) 的左侧, 没有很好的进行转速的恢复。文献 [7] 将 ROCOF 和转速变化率引入方波惯性控制提出改进的三段式方波惯性控制, 在频率支撑阶段的频率低点和转速恢复阶段频率二次跌落进行折中。

现在很多电网都要求风电场及光伏电站必须具备一次调频能力, 就是说 DFIG 风电场需要运行在减载的条件下。

本文首次提出了 DFIG 减载运行下基于协调方波惯性控制的协调快速频率控制 (coordinated fast frequency control, CFFC)。CFFC 通过转子侧变流器 (RSC) 控制回路设计和采用方波惯性控制框架, 使得风机所存储的有功可在短时间内全部交付完成, 并可持续提供额外的稳定功率支撑, 故可有效提升频率低点。在转速恢复阶段, 通过引入协调项来避免控制过程中 DFIG 输出功率的急剧变化, 以此规避频率的二次跌落。最后通过仿真对比分析, 展现出 CFFC 控制的有效性和优越性。

## 1 DFIG 的数学模型

### 1.1 DFIG 模型

联网下双馈风机的结构如图 1 所示, 图中  $\omega_r$ 、 $\omega_1$ 、 $\beta$  和  $\theta_1$  分别表示转子速度、锁相环 (phase locked loop, PLL) 测量机端电压角频率、桨距角和机端电压相角。风机的单质量转子摆动方程为

$$J_m \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P_m - P_g}{\omega_r} \quad (1)$$

式中,  $J_m$  为风机惯性常数。

根据式 (1), 转差频率可表示为  $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$ , 以及转子角度为  $\theta_r = \omega_s \int \omega_r dt$ , 其中  $\omega_b = 2\pi f_0$ 。

假设 PLL 可以完美跟踪 DFIG 端电压频率和角度, 故电网角频率  $\omega_g = \omega_1$ , dq 坐标系为  $\omega_1$  旋转坐标系, dq 坐标系下定子电路方程为

$$\dot{U}_s = -R_s \dot{I}_s - \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_s}{dt} - j\omega_1 \psi_s \quad (2)$$

式中,  $R_s$  为定子电阻,  $L_m$  和  $L_s$  分别为互感和定子电感, 定子磁链方程为  $\dot{\psi}_s = -L_m \dot{I}_r + L_s \dot{I}_s$ 。dq 坐标系下转子侧电路方程为

$$\dot{U}_r = R_r \dot{I}_r + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_1 \psi_r \quad (3)$$

式中,  $R_r$  为转子电阻,  $L_r$  为转子电感, 转子磁链方程为  $\dot{\psi}_r = L_r \dot{I}_r - L_m \dot{I}_s$ 。

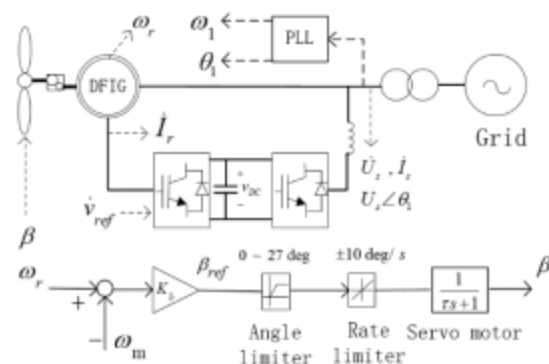


图 1 联网双馈风机

Fig.1 Grid-connected DFIG

机电时间尺度下, 可假设忽略定子电流的暂态过程, 转子侧电路方程 (3) 可简化为

$$U_r = R_r I_r + \frac{L_r}{\omega_b} \frac{dI_r}{dt} + j\omega_1 \psi_r \quad (4)$$

### 1.2 风机模型

风机 (WT) 的机械功率方程可表示为:

$$\begin{cases} P_m = c_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S}{2} v_w^3 \\ c_p(\lambda, \beta) = 0.5176(116/\lambda - 0.4\beta - 5)e^{-21/\lambda} + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P_m$  为风机机械功率,  $v_w$  为风速,  $\rho$  为空气密度,  $S$  为风机叶片扫过的面积,  $\lambda$  为叶尖速比,  $c_p$  为风机性能参数。

风机的最大功率输出  $P_{MPP}$ , 在  $c_p$  ( $c_{pmax}=0.48$ ) 为最大时取得, 而在  $\beta=0$  和  $\lambda=8.1$  时  $c_p$  为最大。采用超速减载的可为调频提供额外的稳定功率支撑, 此时平衡点为  $P_{m0}=P_{g0}=k_{de} \omega_{r0}^3$ ,  $P_g$  为 DFIG 输出有功功率,  $k_{de}$  为减载系数。

## 2 控制器设计



## 2.1 控制器结构设计

由式(2)在忽略 $R_s$ 和定子磁链变化的条件下可设计定子电压定向的矢量控制方式,且根据式(4)设计转子侧内电流环控制。要获得FFR控制,首先 $P_g$ 需要快速跟踪有功参考功率 $P_{ref}$ ,采用有功功率闭环控制,无功电压控制回路采用文献[8]结构,转子侧控制回路控制器设计如图2所示,参数设置如附录所示。RSC内电流环控制回路的阻尼比设置为0.707,电流环控制回路的带宽约为100Hz, RSC外环控制回路的带宽大于10Hz。因此所设计RSC有功功率控制回路可使 $P_g$ 快速跟踪 $P_{ref}$ ,机电时间尺度上可认为 $P_g \approx P_{ref}$ 。

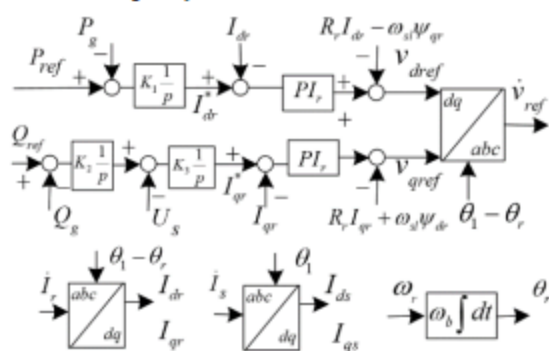


图2 RSC控制回路框架

Fig.2 RSC controller structure

## 2.2 控制器参考输入设计

转子侧有功功率闭环控制回路使得输出功率快速跟踪有功设定值,在机电时间尺度 $P_g \approx P_{ref}$ 。本节采用方波惯性控制框架,使WT所存储有功可在短时间内全部交付。扰动前,初始控制输入为 $P_{ref} = k_{ds} \omega_r^3$ ,其减载率为 $L_d\% = 100(1 - P_{DP}/P_{MPPT})\%$ ,其中DP最为减载功率点且 $P_{DP} = k_{ds} \omega_{r0}^3$ ,  $\omega_{r0}$ 为扰动前的平衡点。

本文减载率设定为20%,控制器参考输入如图3所示,图中 $P_A = P_{MPPT}$ 、 $P_B = P_{DP}$ 。在 $t_0$ 时刻负载扰动事件发生后,时刻 $t_1$ 进行快速功率控制,控制器输入 $P_{ref} = P_{MPPT}$ ,在机电时间尺度由控制器的快速响应 $P_g \approx P_{ref}$ ,此时 $P_g > P_m$ 使得WT转速开始下降由DP滑向MPP。在时刻 $t_2$ 进行转速恢复控制,为避免频率二次跌落,引入协调项 $(P_{MPPT} - P_{DP})/(pT_q + 1)$ 避免功率的快速波动,控制器输入为

$$P_{ref} = P_{MPPT} - \frac{1}{pT_q + 1} (P_{MPPT} - P_{DP}) \quad (6)$$

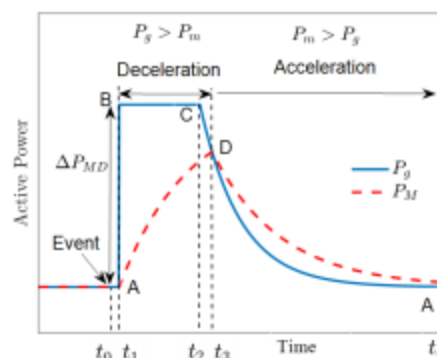


图3 CFFC的控制器参考功率输入曲线

Fig.3 Active power reference curve of CFFC controller

时刻 $t_2$ 开始后一小段时间内 $P_g > P_m$ , WT转速仍然下降,到时刻 $t_3$ 则有 $P_g = P_m$ ;在时刻 $t_3$ 后 $P_g < P_m$ ,使得WT转速开始上升逐渐滑向DP。由式(6)知 $T_q$ 可减缓控制器输入变化,故 $T_q$ 越大将使得DFIG输出功率的波动越缓慢,将使得时刻 $t_4$ 较长。

由式(5)可知,CFFC、SIC及改进后的MSIC功率-转速特性对比如图4所示<sup>[6]</sup>。DP向MPP移动过程,3种控制方法时一样的,在转速恢复阶段,SIC的输出功率下降波动最大由 $P_{MPPT}$ 直接变为 $k_{ds} \omega_r^3$ ,MSIC直接由 $P_{MPPT}$ 于 $P_{DP}$ ,这将对DFIG造成冲击,使得频率可能二次跌落。所提CFFC则使得输出功率下降波动比较平缓。由于最大功率限制为 $P_{MPPT}$ ,故所提控制方法不会由于风速波动造成不稳定影响。几条曲线中,所提CFFC的功率曲线和机械功率曲线相聚最近,将使得转速恢复是最慢的,但由于是超速减载控制,所以对转速恢复的时间要求没有MPPT运行下那么强。

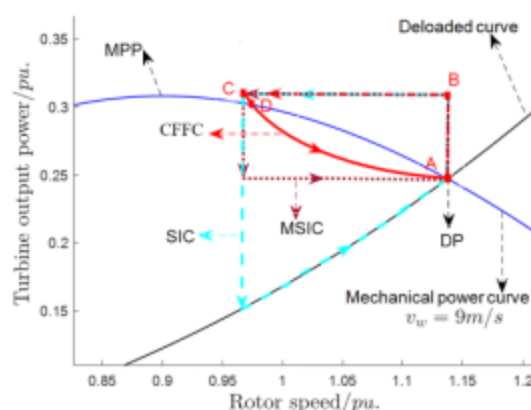


图4 转速-功率特性对比

Fig.4 Comparisons of power-speed characteristics

## 3 仿真分析

本节对各类控制方法进行数值仿真对比,以验证所提出的基于CFFC控制方法在电网中的有效性和优越性。接入风电后的IEEE-9节点系统如图5所示,在节点1处的发电机组为165台额定功率

1.5MW的DFIGs。在以下仿真中,在图10中的节点6处增加了从第0.5s开始的40MW的负载增量,并从第0.7s时启动FFR控制,在第30.5s时切换到转速恢复阶段。模型参数设置在附录中。

风速为9m/s时的电网频率响应、有功功率响应和转子速度响应分别如图6至图8所示,其中 $T_q=5s$ 和 $T_q=15s$ 为CFFC的不同控制模式。

从图6至图8中可知,在第30.5s前SIC、MSIC和CFFC的响应保持一致。图7显示无控制对比组没有额外的有功功率支撑。相反地,由于有功功率的快速控制,图7显示SIC、MSIC和CFFC在0.2s时间内控制DFIG增发所有存储的有功功率,实现了FFR控制。从图8中可看出,在系统频率响应方面,由于FFR控制提供的额外稳定有功功率,在第30.5s前,SIC、MSIC和CFFC对比无控制组大幅度改善了系统频率响应。在第30.5s后切换到转速恢复阶段,此时SIC、MSIC和CFFC的响应差异性体现了出来。由图8知转速下降较多,而对应图7中SIC的功率振荡减小幅度最大,从图6看出SIC的频率二次跌落幅度最大,但是其转速恢复速度最快。图6显示CFFC模式下 $T_q=5s$ 时大幅减小了频率二次跌落,而 $T_q=15s$ 时功率变得更加平缓使得没有二次频率跌落。

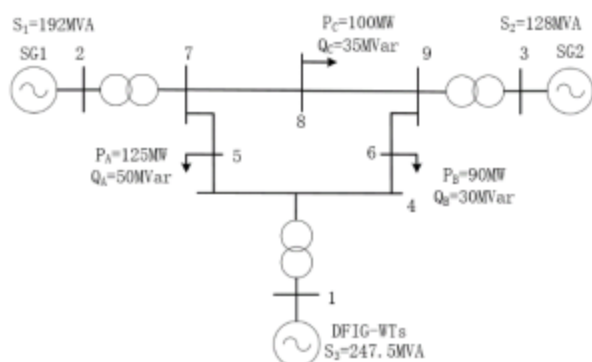


图5 测试系统  
Fig.5 A test system

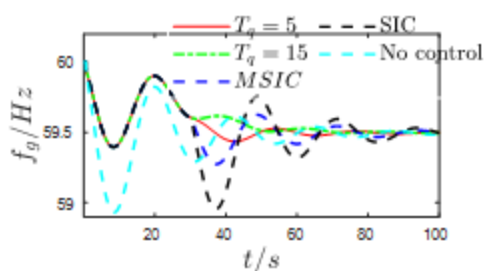


图6 风速为9m/s时的电网频率响应  
Fig.6 Grid frequency response when  $v_w=9m/s$

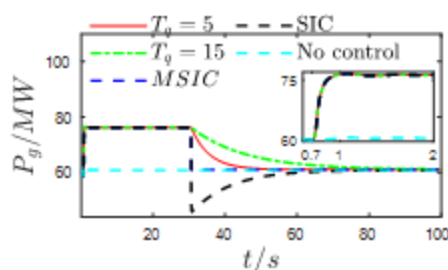


图7 风速为9m/s时的DFIG功率响应  
Fig.7 Active power response when  $v_w=9m/s$

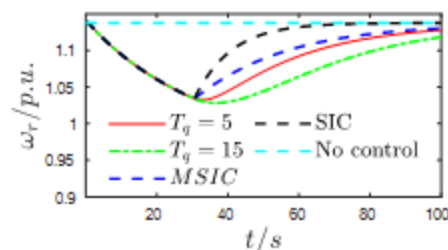


图8 风速为9m/s时DFIG转速响应  
Fig.8 Rotor speed response when  $v_w=9m/s$

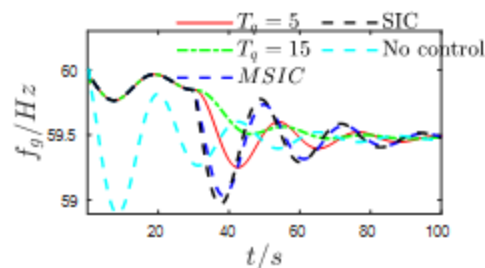


图9 风速为11m/s时的电网频率响应  
Fig.9 Grid frequency response when  $v_w=11m/s$

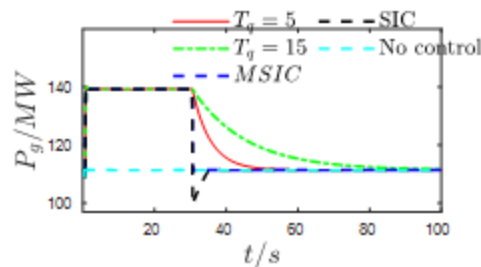


图10 风速为11m/s时的DFIG功率响应  
Fig.10 Active power response when  $v_w=11m/s$

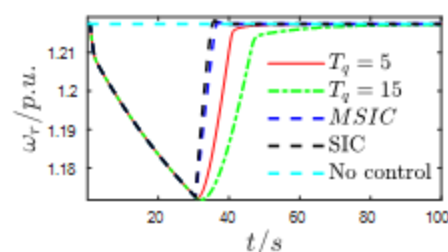


图11 风速为11m/s时的DFIG转速响应  
Fig.11 Rotor speed response when  $v_w=11m/s$

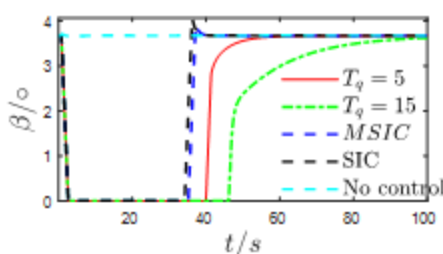


图 12 风速为 11m/s 时的 DFIG 桨距角响应

Fig.12 Pitch angle response when  $v_w=11\text{m/s}$ 

风速为 11m/s 时的电网频率响应、有功功率响应、转子速度响应和桨距角响应分别如图 9 至图 12 所示，其中  $T_q=5\text{s}$  和  $T_q=15\text{s}$  仍为 CFFC 的不同控制模式。图 11 和图 12 显示由于在较高风速下减载运行 DFIG，此时 DFIG 运行桨距角控制的状态下。在第 30.5s 前，图 10 展示了相比风速为 9m/s 时可以提供给电网的额外功率更多，故图 9 显示出系统频率响应的偏差更小。

在第 30.5s 后的转速恢复阶段，对比图 6、图 7 和图 9、图 10，由于风速为 11m/s 时额外功率提供较 9m/s 时高出很多，直接切换控制下 MSIC 的频率二次跌落幅度较大。CFFC 控制模式下，图 11 和图 12 显示转子转速和桨距角恢复过程较其他控制方法较慢，但由于减载控制模式，转速可以不用快速恢复。CFFC 控制模式下频率和功率控制仍然平缓，尤其  $T_q=15\text{s}$  时没有二次频率跌落。

## 4 结论

本文基于协调方波惯性控制对并网后双馈风机(DFIG)的快速频率支撑问题展开研究，提出了减载模式下 DFIG 的协调快速频率控制(CFFC)，得出结论如下：

1) 通过转子侧有功功率回路的设计，CFFC 快速释放风机中存储的能量，使得有功交付可在 0.2s 内完成，并为电网提供额外的稳定功率支持，从而改善电网频率低点；

2) 速度恢复阶段，协调项  $(P_{\text{DPT}}-P_{\text{DP}})/(pT_q+1)$  可避免控制过程中 DFIG 输出功率的急剧变化， $T_q$  越大 DFIG 输出功率的波动就越缓慢，以此可避免电网频率的二次跌落；

3) 通过系统仿真对比已有的方波惯性控制(SIC)及改进后的 MSIC，CFFC 比 SIC 和 MSIC 更有效地改善系统频率响应，尤其在高风速下频率低点的改善更为明显。

## 附录

表 1 DFIG 参数

Table 1 DFIG parameters

| 符号                       | 名称           | 取值          |
|--------------------------|--------------|-------------|
| $P_N$                    | 额定功率         | 1.5MW       |
| $V_N$                    | 额定定子电压       | 575V        |
| $f_0$                    | 额定频率         | 60Hz        |
| $R_s$                    | 定子电阻         | 0.00706p.u. |
| $L_s$                    | 定子电感         | 3.071p.u.   |
| $L_m$                    | 互感           | 2.9p.u.     |
| $R_r$                    | 转子电阻         | 0.005p.u.   |
| $L_r$                    | 转子电感         | 0.156p.u.   |
| $V_{DC}$                 | 直流母线电压       | 1200V       |
| $C_{DC}$                 | 直流母线电容       | 20mF        |
| $J_m$                    | 惯性常数         | 10s         |
| $K_p$                    | 桨距角控制器       | 500         |
| $K_p, K_i$               | 转子侧电流 PI 控制器 | 1, 50       |
| $K_f$                    | 有功控制器        | 20          |
| $K_2, K_3$               | 无功控制器        | 10, 20      |
| $K_{q1}, K_{q2}$         | 直流电压控制器      | 0.01, 0.2   |
| $K_{\omega}, K_{\omega}$ | 网侧电流 PI 控制器  | 1, 200      |

表 2 同步机参数

Table 2 Synchronous generator parameters

| 符号               | 名称       | 取值         |
|------------------|----------|------------|
| $J_{G1}, J_{G2}$ | 惯性常数     | 10s, 9s    |
| $K_{M1}, K_{M2}$ | 机械功率增量常数 | 1, 1       |
| $F_{H1}, F_{H2}$ | 高压气轮机系数  | 0.31, 0.3  |
| $T_{G1}, T_{G2}$ | 再热时间常数   | 7s, 6.5s   |
| $R_1, R_2$       | 速度调节器系数  | 0.08, 0.09 |

## 参考文献

- [1] 洪启麟, M. A. Khan, C. Henderson, 等. 解决未来低惯量电力系统的频率控制难题—英国视角[J]. Engineering, 2021, 7(08): 50-64.
- [2] N. R. Ullah, T. Thiringer, and A. D. Karlsson. Temporary primary frequency control support by variable speed wind turbines—Potential and applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 601-612.
- [3] 迟永宁, 江炳蔚, 胡家兵, 等. 构网型变流器: 物理本质与特征[J]. 高压技术, 2024, 50(2): 590-604.
- [4] 万勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 1-5.
- [5] R. Yan, N. A. Masood, T. K. Saha. The Anatomy of the 2016 South Australia Blackout: A Catastrophic Event in a High Renewable Network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018: 5374-5388.
- [6] M. Khashti, S. Lin, X. Zhao, et al. Gaussian Distribution-Based Inertial Control of Wind Turbine Generators for Fast Frequency Response in Low Inertia Systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(3): 1641-1653.
- [7] Y. N. Zhou, D. H. Zhu, X. D. Zou, et al. Adaptive Temporary Frequency Support for DFIG-based Wind Turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(3): 1937-1949.
- [8] W. He, X. M. Yuan, and J. B. Hu. Inertia provision and estimation of PLL-based DFIG wind turbines. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 510-521.



袁皓

收稿日期: 2024-07-25。

作者简介:

袁皓(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为新能源并网发电控制, E-mail: 191545876@qq.com;

王德林(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源并网发电和系统稳定与控制研究等,

E-mail: wdl@swjtu.edu.cn。

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于双层聚类算法的柔性可控负荷用电模式分析

王 鹏<sup>1</sup>, 白 迪<sup>2</sup>

(沈阳工程学院 研究生部, 沈阳 110000)

(沈阳工程学院 电力学院, 沈阳 110000)

## Analysis of power consumption mode of flexible controllable load based on bi-level clustering algorithm

Peng Wang<sup>1</sup>, Di Bai<sup>2</sup>

(Shenyang Institute of Engineering, Graduate School, Shenyang 110000)

(Shenyang Institute of Engineering, School of electric power, Shenyang 110000)

**摘要:** 由于电力系统中设备数量的增加, 电网产生了大量的数据。分析数据有助于了解用户的用电行为和需求, 从而能够向他们提供更好的服务。本文提出一种基于密度峰值聚类 (DPC)、核主成分分析 (KPCA) 和谱聚类 (SC) 进行双层聚类分析的方法来分析这种行为, 利用 DPC 对用户负荷本体因素进行聚类, 以分析用户的负荷特性; 使用 KPCA 对用户的用电调节认同意识因素进行降维, 以提高聚类效率; 使用 SC 对降维后的数据进行聚类, 将用户的用电行为划分为八个类别, 分别为双峰型、避风型、平稳型、单峰稳定型、单峰型、后峰型、波动型和前锋型, 最后针对聚类分析结果, 筛选出具有单峰型、单峰稳定型和双峰型并且用电量较大的用电客户为可控负荷用户, 对该类型用户分别制定了不同的错峰调控方案, 并比较了不同调控方案给用户带来的经济效益。

**关键词:** 双层聚类, 用电模式识别, 错峰效益, KPCA

**ABSTRACT:** Due to the increase in the number of smart meter devices, the power grid has generated a lot of data. The analysis of data helps to understand the user's electricity consumption behavior and needs, so as to provide them with better services. In this paper, a bi-level clustering analysis method based on density peak clustering (DPC), kernel principal component analysis (KPCA) and spectral clustering (SC) is proposed to analyze this behavior. Firstly, DPC is used to cluster the user load ontology factors to analyze the user's load characteristics. Then, KPCA is used to reduce the dimension of the user's electricity regulation identity consciousness factors to improve the clustering efficiency. Finally, SC is used to cluster the data after dimensionality reduction, and the user's electricity consumption behavior is divided into eight categories, which are bimodal type, wind-proof type, stable type, single-peak stable type,

single-peak type, post-peak type, fluctuation type and forward type. Finally, according to the results of cluster analysis, the electricity customers with single-peak type, single-peak stable type and double-peak type and large electricity consumption are selected as adjustable users. Different peak staggering regulation schemes are formulated for this type of users, and the economic benefits brought by different regulation schemes to users are compared.

**KEY WORDS:** two-level clustering, electricity consumption pattern recognition, peak staggering benefit, KPCA

## 0 引言

针对用户用电行为特征差异化严重的问题, 亟需对用户用电行为特征进行研究。通过负荷曲线聚类分析, 为电网侧和用户侧管理提供有效依据, 同时也可以作为负荷和电价预测的前期处理过程<sup>[1-2]</sup>。

在聚类算法方面, 传统的聚类算法主要包括基于层次、基于划分、基于密度、基于模型和基于网格的聚类算法<sup>[3]</sup>。文献<sup>[4]</sup>对以往负载场景下的聚类算法进行了全面总结, 通过电力负荷聚类有助于发现不同用户负荷模式, 为智能电网的研究和应用提供理论支持。文献<sup>[5]</sup>针对用户用电行为分析难度大的问题, 提出一种 K-means++ 的负荷分类方法, 根据用户用电特征进行用户用电行为分析。文献<sup>[6]</sup>提出一种优化 AP 聚类算法, 该方法对负荷曲线进行降维并提取有效直观的负荷特性, 能够有效的对用户用电行为进行分析。文献<sup>[7]</sup>采用密度聚类对异常用电量进行分析, 通过考虑用户用电特征和用电环境进行类似用户选择, 采用多用户密度聚类方法可以有效检测智能电网异常用电行为。

文献<sup>[8]</sup>针对用户用电行为模式准确提取问题,

提出一种基于核主成分分析(KPCA)和改进K-means的电力负荷曲线聚类方法,可以做到高效降维和精准聚类,并通过与多种非线性降维方法对比,得出KPCA降维速度最快。文献<sup>[9]</sup>针对数据降维和用户分类问题,提出了一种混合谱聚类方法,得到合理的负荷曲线分类。

## 1 聚类分析

### 1.1 密度峰值算法

密度峰值聚类算法是一种基于密度并结合距离划分思想的新型聚类算法,基于密度的思想以寻找样本数据的聚类中心,基于划分的思想来分配非中心点的归属。DPC算法核心思想是基于簇中心的两点前提假设:1)各类簇中心点在其局部邻域内样本密度最大;2)各类簇中心点之间的相对距离较远。因此,引出DPC算法的两个基本概念,样本点*i*的局部密度 $\rho_i$ ,以及各样本*i*到局部密度大于它并且距离其最近的样本*j*的相对距离 $\delta_i$ 。

$\rho_i$ 的计算有两种方式,基于截断核,如式(1.1)所示,基于高斯核,如式(1.2)所示。具体选择根据实际情况而定,当样本数据量很大时,一般选择截断核来计算局部密度。

$$\rho_i = \sum_j \chi(d_{ij} - d_c), \chi(x) = \begin{cases} 1, x < 0 \\ 0, x \geq 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

$$\rho_i = \sum_{j \neq i} \exp(-\frac{d_{ij}^2}{d_c^2}) \quad (1.2)$$

式中, $d_{ij}$ 是样本点*i*和*j*间的距离; $d_c$ 是截断距离也称邻域半径,一般提前设定使得样本式邻域内的平均邻居数占数据集总数的1%-2%<sup>[12]</sup>。由式(1.1)和式(1.2)可以知道局部密度值 $\rho_i$ 的大小对 $d_c$ 的设定很敏感。在的计算如式(1.3)所示

$$\delta_i = \begin{cases} \min(d_{ij}), \text{if } \exists j \text{ s.t. } \rho_j > \rho_i \\ \max(d_{ij}), \text{otherwise} \end{cases} \quad (1.3)$$

当求得所有样本的密度和相对距离后以密度为*x*轴相对距离为*y*轴建立决策图选择位于图中右上角点作为密度峰。DPC算法还可以利用样本决策值 $\gamma_i$ 选择密度峰:

$$\gamma_i = \rho_i \times \delta_i$$

利用决策值选择密度峰的具体做法为:将所有样本决策值降序排列,选择决策值较大样本为密度

峰。分配阶段是给密度峰赋予不同类标签,将剩余样本标签标记为比其密度大且离其最近样本所属标签完成聚类。

### 1.2 核主成分分析

由于居民参与用电调节数据集的维度较高,为提升聚类分析的时间效率,需要对该数据集进行降维。核主成分分析<sup>[10]</sup>(Kernel Principal Component Analysis, KPCA)是一种基于核函数的非线性降维技术,可以保留数据的全局特征,文献<sup>[8]</sup>对电力负荷数据进行降维分析,通过与多种形式核函数降维方法对比,得出KPCA降维效果最佳,因此采用KPCA对用户用电调节认同意识因素进行降维。

### 1.3 谱聚类算法

基于KPCA的降维结果,采用谱聚类对用户用电调节认同意识因素进行二次聚类。SC<sup>[11]</sup>是一种基于图划分理论设计的聚类算法,在数据降维、减少运算量的有效性和稳定性等方面起到较好效果。对于用户用电行为分析,本文采用SC对用户用电调节认同意识因素进行二次聚类。算法流程图如图1所示。其中包括基于用户负荷本体因素的一次聚类,采用DPC聚类方法将用户分为*n*类,获得*n*类具有相同负荷特性的用户类别和用户负荷曲线。针对每一类负荷特性相同的用户,利用KPCA降维方法对数据集进行降维。并将降维后的主成分作为考虑用户参与用电调节认同意识因素的二次聚类的输入,二次聚类采用SC聚类算法,利用离散程度表征可调节潜力高低,最终完成用户用电模式的识别其主要流程如图1所示。

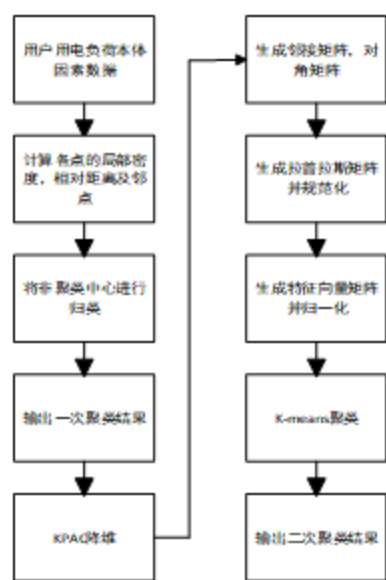


图1 双层聚类聚类 DPC-KPCA-SC 聚类算法流程图  
本文选取戴维森堡丁指数、卡林斯基—哈拉巴



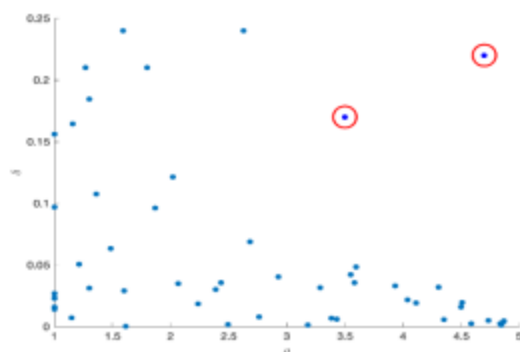
斯指数、轮廓系数作为各聚类算法的评价指标,能够精确的体现聚类的效果好坏。

DBI 值主要体现类内内聚度、类间离散度,其值越小反映出的聚类效果越好<sup>[13]</sup>。CH 值表征用更少的类别、更多的样本获得较好的聚类效果。CH 值越大,聚类的效果越好<sup>[14]</sup>。S 值综合考虑了聚类的凝聚度和分离度,S 取值范围是  $[-1,1]$ ,值越接近 1 表示聚类效果越好,越接近 -1 表示聚类效果越差。文中用所有样本 S 的平均值即整体聚类轮廓系数反映聚类效果<sup>[15]</sup>。

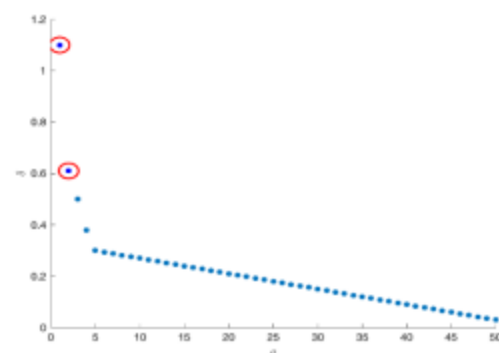
## 2 仿真实验与结果分析

### 2.1 聚类数确定

针对新疆地区用户典型日负荷数据,计算其居民用电负荷本体因素,包括日负荷最大值、最小值、均值、负荷率、峰谷差和峰谷差率。根据各用户的用电负荷本体因素进行 DPC 聚类,聚类决策图如图 2 所示,图(a)中同时具有较大  $\rho$  值和  $\delta$  值的点共有 2 个,图(b)中显示这 2 个点与其他点在  $r \approx 0.6$  处有明显跃变。所以聚类中心共有 2 个,聚类数为 2。



(a) 决策图



(b) 降序排列

图 2 DPC 聚类算法决策图

通过 DPC 聚类将 50 个用户聚为 2 类拥有不同负荷特性的用户群体,这 2 类用户具有类内紧凑性和类间分离性。基于 DPC 算法的一次聚类结果中的用户编号如表 3 所示,一次聚类将用户分为 2 类,类别 1 有 23 个用户,类别 2 有 27 个用户。

| 用户类别 | 用户编号                                                                         |
|------|------------------------------------------------------------------------------|
| 类别 1 | 3、4、7、9、12~15、<br>17、20、21、23、24、<br>26、33、37、38、40、<br>42、43、45、48、49       |
| 类别 2 | 1、2、5、6、8、10、<br>11、16、18、19、22、<br>25、27~32、34~36、<br>39、41、44、46、47、<br>50 |

表 1 基于 DPC 算法的一次聚类结果

### 2.2 对比分析

对两层聚类算法以及降维方法分别进行对比分析,确定聚类数为 2。一次聚类使用 DPC、K-means、SC、高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)、模糊 C 均值(Fuzzy C-means, FCM)算法进行对比,二次聚类使用 SC、K-means、GMM、FCM 算法进行对比,对比结果如表 2、表 3 所示

| 算法      | DBI    | CH      | S      |
|---------|--------|---------|--------|
| K-means | 0.8094 | 59.0294 | 0.6571 |
| SC      | 0.7875 | 58.7895 | 0.6173 |
| GMM     | 0.9493 | 5.8291  | 0.3493 |
| FCM     | 0.7943 | 60.6470 | 0.6374 |
| DPC     | 0.7792 | 61.5227 | 0.6358 |

表 2 一次聚类不同算法的性能比较

在表 2 中, DPC 的 DBI 数值为 0.7792, 优于其他聚类算法; DPC 的 CH 数值为 61.5227, 优于其他聚类算法; DPC 的 S 数值为 0.6358, 优于 GMM 聚类算法、SC 聚类算法, 略差于 K-means 和 FCM 聚类算法。根据以上分析, 在一次聚类中, DPC 聚类算法综合评价指标较优, 根据聚类算法的特点 DPC

聚类算法能够自动确定类簇中心,而聚类标准为不确定类簇中心的用户负荷本体因素数据集,因此一次聚类选取 DPC 聚类更为合适。

| 算法      | DBI    |        | CH      |        | S      |        |
|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
|         | 类别1    | 类别2    | 类别1     | 类别2    | 类别1    | 类别2    |
| K-means | 2.2342 | 2.5833 | 3.6305  | 3.4585 | 0.2417 | 0.1438 |
| GMM     | 2.6218 | 3.1536 | 2.1412  | 2.3954 | 0.0392 | 0.0846 |
| FCM     | 2.3839 | 2.4417 | 3.51699 | 3.8491 | 0.1827 | 0.1513 |
| SC      | 1.8555 | 1.6805 | 5.5292  | 4.3292 | 0.3212 | 0.1569 |

表3 二次聚类不同算法的性能比较

在表2中可以看到类别1用户、类别2用户在各对比算法下评价指标的大小。以K-means为例,类别1用户、类别2用户在SC的DBI数值比在K-means的DBI数值分别降低了16.95%、34.95%;类别1用户、类别2用户在SC的CH数值比在K-means的CH数值分别提升了52.30%、25.18%;类别1用户和类别2用户在SC的S数值比在K-means的S数值分别提升了32.89%、9.11%。用户在SC聚类上均具有较稳定的评价指标,从评价指标明显看出选择SC聚类算法作为二次聚类算法具有很强的优势,因此二次聚类选取SC聚类更为合适。

从降维方法出发,将采用KPCA与不采用降维方法的综合聚类结果从聚类指标DBI、CH、S进行综合对比,结果如图7所示。由图7所知,在一次聚类和二次聚类方法确定的基础上,采用KPCA降维比降维前具有更好的聚类质量。

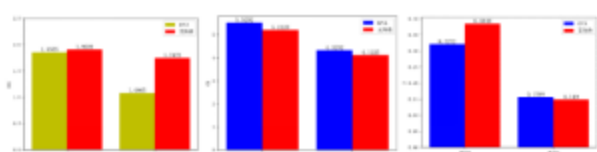


图3 考虑降维方法下聚类质量对比图

### 2.3 聚类结果分析

根据选定的聚类分析算法对负荷数据进行分析,将用户用电模式划分为8种典型模式,分别为双峰型、避风型、平稳型、单峰稳定型、单峰型、后峰型、波动型和前峰型,如图5所示。

双峰型负荷特征:该类型用电特征表现为一天24小时内有两个用电高峰,两个峰值发生时间

点在10时和16时附近,有时也存在一定的时间差偏移,两个峰值的大小不一致,且两个用电高峰时间长度和最大峰值大小也不一致。具有该类型的用电行为一般是政府、学校、写字楼等性质的单位。

避风型负荷特征:该类型用电特征表现为在白天7-18时为低负荷特征,用电量非常小,在其余的时段为高负荷特征。具有该用电特征的用户主要是一些在全网负荷较低的时段进行生产用电的专变用户。

平稳型负荷特征:平稳型负荷特征表现为在一天24小时内负荷较为稳定,没有较为明显的用电高峰和用电低谷。具有平稳型用电负荷特征的用户负荷率较高,该类型用户一般是处于连续生产、用电状态,该类型用户一般属于优保企业。

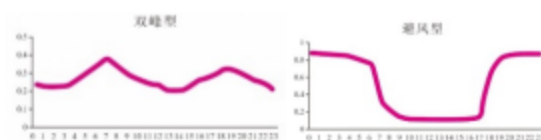
单峰稳定型负荷特征:该类型用电特征总体表现为从6时左右开始负荷曲线逐步上升,到10时左右负荷达到高峰,并且随后高峰期表现较为稳定,为持续的高负荷特征,到21时左右负荷下降到用电低谷期。具有单峰稳定型负荷特征的用户多属于生产型企业,该类型企业在白天进行生产,且生产时间较长,在进行错峰用电时,应适当降低错峰用电比例,以保证企业的正常运营。

单峰型负荷特征:该类型用户的用电模式特征表现为在上午10时左右出现一个用电高峰,不同于单峰稳定型的是该类型负荷特征的用电高峰持续时间较短,为尖峰特征。

后峰型负荷特征:该类型用户的用电模式特征在负荷曲线上表现为在17时左右开始出现用电高峰,用电高峰通常都在一天内的最后一段时间,在其余的时间,从0时到17时负荷均较低。

波动型负荷特征:该类型特征表现为在一天内负荷持续波动,为不稳定型,该类型负荷没有规律的用电高峰和用电低谷。

前峰型负荷特征:该类型特征表现为在0时到7时为用电高峰,其余时间用电负荷较低,为前高后低的用电类型。该类型用户多为高耗能生产企业,其用电时段主要集中在全网的用电低谷期。



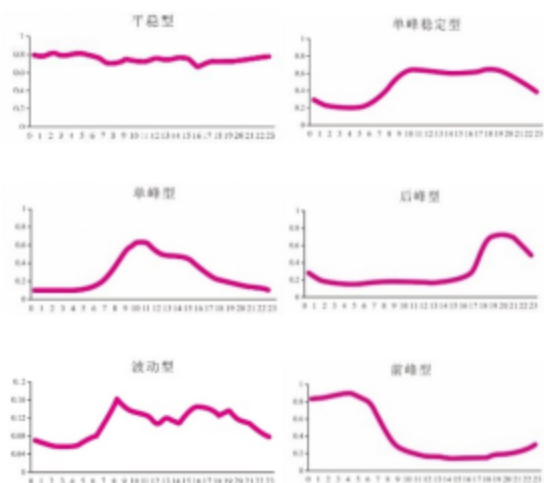


图4 典型用电行为分析

### 3 错峰调控分析

在对用户用电模式的特征进行挖掘分析后,筛选出可调控的用户,主要针对具有单峰型、单峰稳定型和双峰型并且用电量较大的用电客户,具有这种特征的用户主要采用一班制、二班制生产制度,同时因为其具有较大的用电量,相比于小用电量的用户,其在进行实际错峰时可以发挥较大的作用,以各用户聚类后的典型负荷曲线来代表各用户的负荷特征,分别计算每个用户的总电量<sup>[16]</sup>。在业务基础上,制定不同等级的错峰方案,分别按照企业用电总量的5%、10%、15%、20%和25%等五个等级进行错峰效益分析。在本方案中,主要考虑将峰期负荷错峰移至谷期,经过错峰,在每个用户总用电量不变的情况下,能够将部分的负荷推移至全网负荷的谷期,有助于减小全网负荷峰谷差,提高全网负荷的稳定。同时在实行峰谷电价策略的基础上,企业将生产运行时间部分调至用电低谷期,从大用电量企业自身的角度进行了一定程度的成本节约,能够给用户带来实际的经济效益<sup>[17-18]</sup>。

### 4 结论

(1) 本文探索了适用于大规模数据集的用电行为模式判别算法,对比不同聚类算法戴维森堡丁指数、卡林斯基—哈拉巴斯指数、轮廓系数作进行评估优选,最终选择DPC-KPCA-SC作为聚类成员生成算法集。

(2) 通过聚类分析,将用户用电行为分为8类,分别为双峰型、避风型、平稳型、单峰稳定型、单峰型、后峰型、波动型和前峰型。

(3) 针对聚类分析结果,筛选具有错峰调控可行性的用户,对该类型用户分别制定不同的调控方案,并比较不同方案产生的效益,以供企业选择

自主选择。

(4) 在算法理论方面,后续工作需要探索与其他算法相结合获得更高的聚类程度,发挥其他算法的优势,并深入了解负荷数据特性,在数据预处理方面,改进降维过程,提升算法的运行效率。

### 参考文献

- [1] 贺仁睦,王卫,蒋德斌,等.广东电网动态负荷 实测建模及模型有效性的研究[J].中国电机工程学报, 2002, 22(3): 78-82.
- [2] 姚建刚,陈亮,戴习军,等.混沌神经网络负荷建模的理论研究[J].中国电机工程学报, 2002,22(3):99-102.
- [3] CHICCO G, NAPOLI R, PIGLIONE F. Comparisons among clustering techniques for electricity customer classification[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(2):933- 940.
- [4] SI C, XU S, WAN C, et al. Electric load clustering in smart grid: Methodologies, applications, and future trends[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 237-252.
- [5] 韩明冲,钟建伟,陈静等.面向电力大数据的用电 负荷分类及用户用电行为分析[J].物联网技术,2022,12(3):113-115+119.
- [6] 李雪燕,蔡文悦,赵海生等.基于优化SAX和带 权负荷特性指标的AP聚类用户用电行为分析 [J].电工技术学报,2019,34(S1):368-377.
- [7] XIANG M, RAO H, TAN T, et al. Abnormal behavior analysis algorithm for electricity consumption based on density clustering[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(10): 7250- 7255.
- [8] 梁家豪,黄星舒,吴丽娟等.基于KPCA和改进 K-means的电力负荷曲线聚类方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(6):143-150.
- [9] 唐伟宁,李欣.适用于用户需求响应的负荷数据 混合谱聚类算法[J].计算机应用与软件,2022,39(10):307-314+321.
- [10] 李英顺,周宏达,王德彪等.一种基于KPCA WOA-SVM火控系统故障诊断方法[J].火炮发射与控制学报,2023,44(4):14-19.
- [11] 张建华,郭启迪,曹子微等.基于匹配度和谱聚类 的知识推荐研究 [J].郑州大学学报(理学版),202 3,55(4):1-7.
- [12] 谢娟英,高红超,谢维信. K近邻优化的密度峰值快速搜索聚类算法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46 (2): 258-280
- [13] 王继东,顾志成,葛磊等.改进萤火虫算法与 K-means算法结合的配电网负荷聚类特性分析 [J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(2):137-147.
- [14] 王艺霖,肖媛媛,左鹏飞等.基于改进聚类算法的 交通事故多发点识别方法[J/OL].计算机应用 研究: 2023(9): 1-8.https://doi.org/10.19734/j.iss n.1001-3695.2023.02.0086.
- [15] 邹克成,李鹏,苏适等.时序加权密度峰值聚类算 法及用电负荷特性分类模型[J/OL].云南大学 学报(自然科学版): 2023(9): 1-9.
- [16] SHI B, JING Z, YU H E, et al.Electricity consumption behavior analysis of single-phase power consumers in distribution network based on dynamic game theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14):87-91+139.
- [17] 蔡秋卿,刘思捷,陆秋瑜.基于GMM聚类和SVM的用户负 荷行业分类辨识方法 [J].广东电力, 2017, 30(12):91-96.
- [18] 崔立刚,贺伟军,田磊,等.基于K均值聚类算法的大客户用电行为分析 [J].浙江电力,2017, 36(12):47-52.

文章编号: 中图分类号: 文献标志码: 学科代码:

# 计及网络安全约束与新能源消纳的机组组合问题研究

张超杰<sup>1</sup>

(1. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

## Research on Unit Combination Problem Considering Network Security Constraints and New Energy Consumption

ZHANG Chaojie<sup>1</sup>

(1. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** This article investigates the Unit Commitment (UC) problem that takes into account network security constraints and new energy consumption. By optimizing unit scheduling and operation strategies, this paper explores how to effectively absorb large-scale new energy while considering network security constraints. A unit combination optimization model based on network security constraints is proposed, and effective optimization methods are used to solve it. The research results indicate that rational allocation of units can improve the safety and stability of the system, while maximizing the proportion of new energy consumption. Future research can further strengthen the integration and optimization of network security constraints and unit scheduling, consider the new energy consumption problem in multiple scenarios, and develop intelligent and adaptive scheduling and operation strategies. These research results are of great significance for the optimization and sustainable development of the power system.

**KEY WORDS:** Unit combination; safety constraints; and new energy consumption

**摘要:** 本文研究了计及网络安全约束与新能源消纳的机组组合(UC, Unit commitment)问题。通过优化机组调度和运行策略,探讨了如何在考虑网络安全约束的前提下有效消纳大规模新能源,提出了基于网络安全约束的机组组合优化模型,并采用了有效的优化方法进行求解。研究结果表明,合理配置机组可以提升系统的安全性和稳定性,同时最大化新能源消纳比例。未来的研究可以进一步加强网络安全约束与机组调度的集成优化,考虑多场景下的新能源消纳问题,并开发智能化、自适应的调度与运行策略。这些研究成果对于电力系统的优化和可持续发展具有重要意义。

**关键词:** 机组组合; 安全约束; 新能源消纳

**DOI:**

## 0 引言

随着我国经济持续快速发展,电力系统的负荷需求也在不断增长。为了应对这种增长,我国电力行业需要扩大用电需求,但是依靠这种方式将给电力系统建设带来巨大压力。因此需要在充分利用资源,提高利用率上多加重视。

机组组合问题可表示为:根据预测的负荷要求,在满足系统负荷约束、机组出力上下限约束、旋转备用容量约束、机组最小启停时间约束、爬坡约束的前提下,确定每台发电机组的启停状态和有功出力,从而达到最小成本(燃料成本+开机成本)。

合理的机组组合计划可以有效地节省能源的消耗,提高发电机组的运行效率和安全运行水平,延长机组使用寿命,带来可观的经济效益。因此为了实现电力经济的和谐发展,保证电力的有效供应,需要对机组组合问题予以重视。

现在 UC 问题的研究方向主要包括模型和算法两方面。就模型而言,研究者们希望通过改进 UC 问题的数学模型,以提高模型的求解效率。就算法而言,大量优化算法被用于求解 UC 问题,如:优先顺序法、动态规划法、割平面法、Benders 分解法、拉格朗日松弛法、半定规划法、内点法、分支定界法以及人工算法等<sup>[3]</sup>。

文献[1]通过分段线性近似(Piecewise Linear approximation, PLA)将非线性函数在区间内用多段线性函数进行近似,但是增加断点的数量会导致问题规模的增长;文献[2]采用拉格朗日松弛算法、改进梯度法和模糊次梯度法相协调的混合算法对机组进行优化调度;文献[3]应用正弦余弦算法改进

拉格朗日算法得到基于青蛙群算法和线性回归的 (SCA-LR) 算法应用于机组组合问题的求解, 但是该问题中约束条件只包含了爬坡约束、功率平衡约束、最小启停时间约束三种约束。

本文则通过启发式方法和根松弛方法对三机九节点系统机组组合问题进行了求解, 从而计算出某种负荷情况下机组的最优出力方式。

## 1 传统机组组合模型

### 1.1 目标函数

UC 问题的目标函数为最小成本 (火电机组运行成本), 其公式如(1)所示:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n [F_1(p_i(t))I_i(t) + cd_i(t) + cu_i(t)I_i(t)(1-I_i(t))] \quad (1)$$

式(1)中  $F$  为火电机组运行成本与弃风成本之和;  $T$  为整个机组组合调度周期的时段总数;  $n$  为火电机组的机组数量;  $F_1(p_i(t))$  为  $t$  时刻的燃料成本, 其表达式如式(2)所示,  $p_i(t)$  为火电机组  $i$  在  $t$  时刻的有功功率;  $I_i(t)$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的开关机状态, 其中 1 表示开机状态、0 表示关机状态;  $cu_i(t)$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的开机费用, 其表达式如式(4)所示;  $cd_i(t)$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的关机费用, 它一般与机组的开机时间长短无关, 这里将它近似为 0。

$$F_1(p_i(t)) = a_i + b_i p_i(t) + c_i p_i^2(t) \quad (2)$$

式(2)中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为机组  $i$  的燃料费用特性曲线参数。

机组的启动方式可分为热启动和冷启动方式, 这两种模式的成本是不一样的。如果机组停机长时间未重新启动, 则将其重新定义为冷启动。反之, 短时间重新启动则为热启动。

$$cu_i = \begin{cases} hc_i, X_i^{off}(t) \leq T_i^{cold} + T_i^{off} \\ cc_i, X_i^{off}(t) > T_i^{cold} + T_i^{off} \end{cases} \quad (3)$$

在式(3)中  $hc_i$ 、 $cc_i$  表示机组  $i$  的热、冷启动费

用;  $X_i^{off}(t)$  表示机组  $i$  在时段  $t$  上已经连续关机的

时间;  $T_i^{cold}$  代表机组  $i$  的冷启动时间;  $T_i^{off}$  表示机组  $i$  的最小关机时间。这里为简化变量计算, 将开机费用简化为机组从关机状态到开机状态的费用, 并且该值为一定值, 如式(4)所示。

$$cu_i = \begin{cases} K_i, I_i(t) - I_i(t-1) = 1 \\ 0, else \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中  $K_i$  表示机组  $i$  的开机成本。

### 1.2 约束条件

UC 问题本身包含了许多考虑实际发电场景的约束条件, 而 UC 问题必须在满足约束条件的情况下进行求解。

(1) 系统负荷约束: 任意时间段内, 机组负荷的发电量必须满足负荷需求。

$$\sum_{i=1}^n I_i(t) p_i(t) = D(t) \quad (5)$$

其中  $D(t)$  代表在时段  $t$  的负荷需求。

(2) 机组出力上下限约束: 主要考虑了每台机组的发电能力, 即每台机组的发电有上下限, 机组任意时刻的发电量应该在这个相应的上下限之间, 否则会对机组的寿命造成不利影响, 甚至会导致机组故障并影响电力系统的安全、稳定运行。

$$p_{i\min} I_i(t) \leq p_i(t) \leq p_{i\max} I_i(t) \quad (6)$$

其中  $p_{i\min}$ 、 $p_{i\max}$  分别表示机组  $i$  出力的上下限。

(3) 旋转备用容量约束: 为了维持电力系统的可靠性, 需要提供一定的旋转备用容量, 从而在部分发电机组出现故障或其他状况时, 能够继续维持正常供电。

$$\sum_{i=1}^n I_i(t) p_{i\max} \geq D(t) + R(t) \quad (7)$$

其中  $R(t)$  表示在时段  $t$  旋转备用的容量需求。

(4) 机组最小启停时间约束: 由于机组本身具有惯性, 因此在刚开机/关机的情况下, 必须经过一段时间才能继续关机/开机, 这叫做机组最小启停时间约束。

$$\begin{cases} I_i(t) = 1, 1 \leq X_i^{on}(t) < T_i^{on} \\ I_i(t) = 0, 1 \leq X_i^{off}(t) < T_i^{off} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $X_i^{on}(t)$  表示机组  $i$  在时段  $t$  已经连续开机的时间;  $T_i^{on}$  表示机组  $i$  的最小开机时间。

(5) 爬坡约束: 由于机组本身的限制使得发电机组在相邻时段内的有功出力变化量必须满足

一定的限制。

$$-DR_i \leq p_i(t) - p_i(t-1) \leq UR_i, I_i(t) - I_i(t-1) = 0 \quad (9)$$

其中  $UR_i$ 、 $DR_i$  分别表示机组  $i$  的爬坡、滑坡限制。

## 2 基于网络安全约束与新能源消纳的机组组合问题研究

### 2.1 计及网络安全约束的机组组合问题

电力是通过电力网络进行传输的,然而常规 UC 问题求得的调度周期内的启停策略如果计及线路及其它安全约束时往往是不可行的,因此有必要在机组组合问题中考虑网络安全约束。

计及网络安全约束的机组组合问题是常规 UC 问题的拓展。相比与常规 UC 问题,其将系统的网架结构纳入了其约束条件的考虑范围内。

(1) 电力平衡约束

$$\begin{cases} \sum_{k \in i} p_{Gk} - p_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \sum_{k \in i} Q_{Gk} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases}, i \in S_{NB} \quad (10)$$

式(10)中  $S_{NB}$  为电力系统网架中的所有节点的

集合;  $\sum_{k \in i} p_{Gk}$ 、 $\sum_{k \in i} Q_{Gk}$  分别为传输到节点  $i$  的所有

发电机有功、无功功率之和;  $p_{Di}$ 、 $Q_{Di}$  分别是连接节

点  $i$  的有功、无功负荷;  $V_i$  为节点  $i$  的电压幅值;  $G_{ij}$ 、

$B_{ij}$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  之间的电导、电纳;  $\theta_{ij}$  为

节点  $i$  和节点  $j$  之间的电压相角差。

由于上述电力平衡约束中增加了  $V_i$ 、 $V_j$  以及  $\theta_{ij}$

的变量,且需要求解网架中  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  的数据,从而

使得其在求解过程中数据准备的工作量变大,变量、约束数量大幅度增加,计算复杂度极高,因此可将该交流模型通过近似条件变为直流模型。近似条件如式(11)所示。

$$\begin{cases} V \approx 1.0 p.u. \\ \sin \theta_{ij} \approx \theta_{ij} \\ \cos \theta_{ij} \approx 1 \\ |b_{ij}| \gg |g_{ij}| \end{cases} \quad (11)$$

通过该近似条件,再根据交流传输线路的等效

电路图(如图1所示)可得支路  $i$  和  $j$  之间流过的功率如式(12)所示,再根据化简后的式子可得近似直流模型如图2所示。

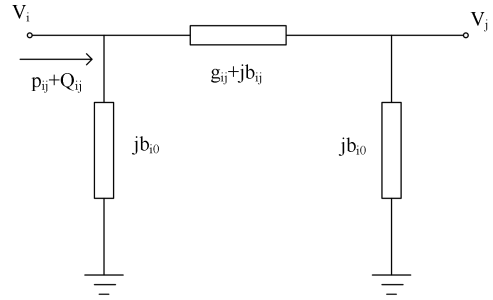


图1 交流传输线路的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of AC transmission lines

$$\begin{cases} p_{ij} = V_i^2 - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{ij} = -V_i^2 (b_{ij} + b_{i0}) + V_i V_j (b_{ij} \cos \theta_{ij} - g_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{cases} = \begin{cases} -b_{ij} \theta_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \\ 0 \end{cases} \quad (12)$$

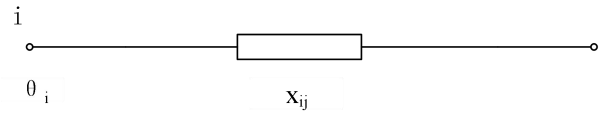


图2 直流模型图

Fig. 2 DC model diagram

式(12)中  $p_{ij}$ 、 $Q_{ij}$  分别表示支路  $i$  和  $j$  之间流过的

的有功功率和无功功率;  $g_{ij}$  为线路  $ij$  的电导;  $b_{ij}$  为

线路  $ij$  的电纳;  $b_{i0}$  为线路对地电纳;  $x_{ij}$  为线路  $ij$

的电抗。

根据节点功率等于和线路相连的所有线路的功率可得

$$\begin{cases} p_i = \sum_{k \in i} p_{Gk} - p_{Di} = \sum_{j \in i} p_{ij} = \sum_{j \in i} \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \\ Q_i = \sum_{k \in i} Q_{Gk} - Q_{Di} = \sum_{j \in i} Q_{ij} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中  $p_i$ 、 $Q_i$  分别表示节点  $i$  的有功功率和无功功率。

将式(12)、(13)的简化条件代入式(10)的电力平衡约束中可得式(14)



$$\sum_{k \in i} p_{Gk} - p_{Di} = \sum_{j \in i} B_{ij} \theta_{ij}, i \in S_{NB} \quad (14)$$

(2) 线路潮流约束

$$p_{ij \min} \leq p_{ij} \leq p_{ij \max} \quad (15)$$

式(15)中  $p_{ij \max}$ 、 $p_{ij \min}$  分别为线路有功潮流的最

大值和最小值。

## 2.2 计及新能源消纳的机组组合问题

随着全球气候变化和环境污染问题日益凸显,清洁能源的发展成为各国能源战略的重要方向。在众多清洁能源中,风能、太阳能等新能源因其取之不尽、用之不竭的特点,成为了绿色能源革命的主力军。然而,新能源的大规模并网给传统电力系统带来了一系列挑战,其中包括新能源波动性、间歇性以及电网的协调性等问题。在这一背景下,如何有效评估新能源的消纳水平同时考虑网络安全约束,成为了亟待解决的重要问题。

计及新能源消纳的机组组合问题是常规 UC 问题的拓展。相比与常规 UC 问题,其将新能源机组的参数纳入了其目标函数和约束条件的考虑范围内。

(1) 弃风率

根据所求出的传统机组组合模型火电机组的运行成本,求出计及网络安全约束与新能源消纳的火电机组运行成本与弃风成本之和等于该值时的新能源消纳水平(消纳水平用弃风率来表示)。弃风率表达式如式(16)所示

$$CR = \frac{\sum_{t=1}^T p_w(t)}{\sum_{t=1}^T p_{w \max}(t)} \quad (16)$$

式(16)中  $CR$  表示弃风率。

(2) 目标函数

以火电机组运行成本与弃风成本之和为目标函数

$$\min F = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [F_1(p_i(t))I_i(t) + cd_i(t)] + \sum_{t=1}^T G(p_w(t)) \quad (17)$$

式(17)中  $F$  为火电机组运行成本与弃风成本之和;  $T$  为整个机组组合调度周期的时段总数;  $n$  为火电机组的机组数量;  $F_1(p_i(t))$  为  $t$  时刻的燃料成本,其表达式如式(18)所示,  $p_i(t)$  为火电机组  $i$  在  $t$  时刻的有功功率;  $I_i(t)$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的开关机状态,其中 1 表示开机状态、0 表示关机状态;

$cu_i(t)$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的开机费用,其表达式如式(19)所示;  $cd_i(t)$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的关机费用,它一般与机组的开机时间长短无关,这里它近似为 0;  $G(p_w(t))$  为  $t$  时段的弃风成本,其表达式如式(20)所示,  $p_w(t)$  为  $t$  时段的弃风量。

$$F_1(p_i(t)) = a_i + b_i p_i(t) + c_i p_i^2(t) \quad (18)$$

式(18)中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为机组  $i$  的燃料费用特性曲线参数。

$$cu_i = \begin{cases} K_i, I_i(t) - I_i(t-1) = 1 \\ 0, else \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中  $K_i$  表示机组  $i$  的开机成本。

$$G(p_w(t)) = \rho_w p_w(t) \quad (20)$$

式(20)中  $\rho_w$  为单位弃风成本;

(3) 约束条件

计及火力发电、风力发电的旋转备用容量约束

$$\sum_{i=1}^n I_i(t) p_{i \max} + p_{w \max}(t) - p_w(t) \geq D(t) + R(t) \quad (21)$$

式(21)中  $R(t)$  表示时段  $t$  旋转备用的容量需要,一般可设为  $R(t) = 0.05D(t)$

风电机组的弃风约束

$$0 \leq p_w(t) \leq p_{w \max}(t) \quad (22)$$

式(22)中  $p_{w \max}(t)$  为风电机组在  $t$  时段的风电最大发电能力值;

## 3 算例分析

为了证明 UC 模型建立的有效性,该算例以三机九节点系统为例。

如图 3 所示为三机九节点系统的拓扑图,表 1 所示为火电机组参数,表 2 所示为负荷、风力发电参数,表 3 所示为拓扑图线路电抗参数。

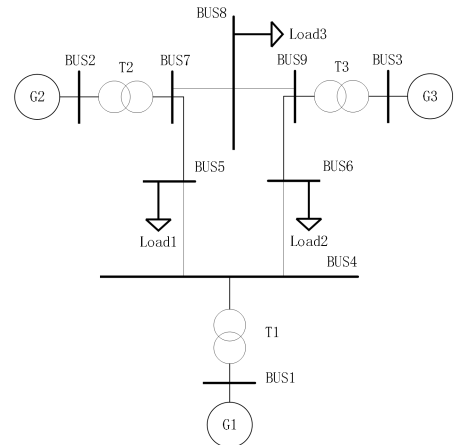


图 3 三机九节点系统的拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of a three machine nine node system

表 1: 火电机组参数

Table 1 Thermal power unit parameters

|                               | 发电机 1  | 发电机 2 | 发电机 3 |
|-------------------------------|--------|-------|-------|
| $p^{\max} \text{ (MW)}$       | 270    | 150   | 70    |
| $p^{\min} \text{ (MW)}$       | 140    | 60    | 60    |
| $a \text{ (\$)}$              | 176.9  | 129.9 | 137.4 |
| $b \text{ (\$/MW)}$           | 13.5   | 32.6  | 17.6  |
| $c \text{ (\$/MW}^2 \text{)}$ | 0.0004 | 0.001 | 0.005 |
| $T^{on} \text{ (h)}$          | 4      | 2     | 1     |
| $T^{off} \text{ (h)}$         | -4     | -3    | -1    |
| $Ini \text{ state (h)}$       | 4      | 2     | -1    |
| $K_i \text{ (\$)}$            | 100    | 300   | 0     |
| $UR_i \text{ (MW/h)}$         | 50     | 40    | 15    |

表 2: 负荷、风力发电参数

Table 2 Load and wind power generation parameters

| 时间(h) | 负荷 1(MW) | 负荷 2(MW) | 负荷 3(MW) | 风力发电量最大值(MW) |
|-------|----------|----------|----------|--------------|
| 1     | 154      | 49       | 16       | 44           |
| 2     | 65       | 115      | 55       | 70.2         |
| 3     | 152      | 14       | 68       | 76           |
| 4     | 28       | 104      | 104      | 82           |
| 5     | 228      | 4        | 7        | 84           |
| 6     | 142      | 23       | 79       | 84           |
| 7     | 204      | 18       | 51       | 100          |
| 8     | 146      | 100      | 44       | 100          |
| 9     | 251      | 30       | 2        | 283.56       |
| 10    | 153      | 18       | 110      | 281.20       |
| 11    | 49       | 72       | 207      | 328.61       |
| 12    | 275      | 14       | 39       | 328.10       |
| 13    | 264      | 15       | 47       | 326.18       |
| 14    | 299      | 9        | 15       | 323.60       |
| 15    | 64       | 65       | 194      | 323.86       |
| 16    | 176      | 53       | 58       | 287.79       |
| 17    | 91       | 140      | 29       | 260.00       |
| 18    | 143      | 57       | 46       | 246.74       |
| 19    | 133      | 7        | 15       | 255.97       |
| 20    | 178      | 44       | 15       | 237.35       |
| 21    | 92       | 86       | 65       | 243.31       |
| 22    | 22       | 15       | 246      | 283.14       |
| 23    | 150      | 103      | 30       | 283.05       |
| 24    | 230      | 3        | 15       | 248.75       |

表 3: 拓扑图线路电抗参数( $\Omega$ )

Table 3 Topology diagram line reactance parameter ( $\Omega$ )

| $x_{41}$ | $x_{45}$ | $x_{46}$ | $x_{57}$ | $x_{69}$ | $x_{27}$ | $x_{39}$ | $x_{78}$ | $x_{89}$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 30.5     | 45.0     | 48.7     | 85.2     | 89.9     | 33.1     | 31.0     | 38.1     | 53.3     |

将表中的数据带入 matlab 的代码中, 求解出不含风电的机组组合情况下火电机组的最小成本为 81224.76\$;

加入风力发电, 求得总成本达到 81224.76\$时, 弃风情况如表 4 所示。依据式(2.7), 可求出其弃风率为 3.18%;

表 4: 弃风情况

Table 4 Abandoned wind situation

| 时间(h) | $p_w(t) \text{ (MW)}$ |
|-------|-----------------------|
| 1     | 0                     |
| 2     | 0                     |
| 3     | 0                     |
| 4     | 0                     |
| 5     | 0                     |
| 6     | 84                    |
| 7     | 0                     |
| 8     | 0                     |
| 9     | 0                     |
| 10    | 0                     |
| 11    | 0                     |
| 12    | 0                     |
| 13    | 0                     |
| 14    | 0                     |
| 15    | 0                     |
| 16    | 0                     |
| 17    | 0                     |
| 18    | 7.7717                |
| 19    | 10                    |
| 20    | 5                     |
| 21    | 6                     |
| 22    | 0                     |
| 23    | 0                     |
| 24    | 52                    |

仿真表明, 计及网络安全约束的新能源消纳水平评估方法, 有助于提高系统稳定性, 避免输电网过载; 同时通过计算新能源消纳水平(弃风率), 有利于优化新能源消纳规划, 促进可再生能源发展。

#### 4 结语

在本文中深入探讨了计及网络安全约束与新能源消纳的机组组合问题。通过分析电力系统中的机组调度和运行策略, 发现考虑网络安全约束在内的新能源大规模消纳对电力系统的机遇和挑战。提出了基于网络安全约束的机组组合优化模型, 并采用了有效的优化方法进行求解。研究结果表明, 合理配置不同类型机组, 结合新能源预测信息和网络状态, 能够有效提升系统的安全性和稳定性, 同时最大化新能源消纳比例, 对于理解和解决计及网络安全约束与新能源消纳的机组组合问题具有一定的理论和实际意义, 为未来电力系统的优化和可持续发展提供了有益的参考和启示。

#### 参考文献

- [1] 全然,张幼毅.求解机组组合问题的分段线性近似方法[J].安阳工学院学报,2022,21(06):96-100.
- [2] 卢秉乾. 计及规模化风电接入的机组组合调度研究[D].长春工业大学,2020.

- [3] 谢毓广. 计及网络安全约束和风力发电的机组组合问题的研究[D].上海交通大学,2011.
- [4] 赵世豪. 计及新能源的机组组合优化调度研究[D].郑州大学,2022.
- [5] 简金宝,杨林峰,张晨.电力系统机组组合问题的模型与优化方法[J].运筹学学报,2020,24(02):87-102.
- [6] 陈磊.考虑风电爬坡特性的电力系统在线调度研究[D].华北电力大学,2018.
- [7] Alvarez E G ,Marcovecchio G M ,Aguirre A P .Security constrained unit commitment scheduling: A new MILP formulation for solving transmission constraints[J].Computers and Chemical Engineering,2018,115:455-473.
- [8] 周毅,李一晨,傅幼书,等.电网弹性备用参与下的机组组合优化决策研究[J].哈尔滨理工大学学报,2023,28(03):56-66.
- [9] 姜楠,戴赛,许丹,等.计及机组组合与线路重构协同的电热联合系统消纳弃风研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(14):105-113.
- [10] 谢应昭,卢继平.含风储混合系统的多目标机组组合优化模型及求解[J].电力自动化设备,2015,35(03):18-26.
- [11] Carrion M ,Arroyo M J .A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem[J].IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society,2006,21(3):1371-1378.
- [12] 蔡振华,李立雄.考虑弃风成本和深度调峰成本的弃风临界值计算[J].湖南城市学院学报(自然科学版),2021,30(01):65-69.
- [13] 李元汉.考虑任意分段爬坡机组组合问题研究[D].长春工业大学,2023.
- [14] 黄丽莹.含风电机组组合的机会约束法与分布鲁棒机会约束法[D].广西大学,2023.
- [15] 刘懂.考虑网络安全及风电不确定性的机组组合优化策略研究[D].湖南大学,2022.
- [16] 唐伦,姚力,肖畅,等.考虑风电不确定性和机组故障停运风险的两阶段鲁棒机组组合[J].智慧电力,2021,49(02):47-53.



张超杰

收稿日期:

作者简介:

张超杰(2001 年),男,硕士研究生,研究方向  
为 新 能 源 并 网 稳 定 性 , E-mail :  
17836945956@163.com

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 基于模糊无迹卡尔曼滤波的风光互补发电储能系统研究

张之平, 尹常永, 杨广东, 高泽祥

(沈阳工程学院 辽宁省 沈阳市 110136)

## Research on Wind-Solar Hybrid Power Generation Energy Storage System Based on Fuzzy Unscented Kalman Filter

ZHANG Zhiping, YIN Changyong, YANG Guangdong, GAO Zexiang

(Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** The energy output of wind-solar hybrid power generation system is greatly affected by external factors. Usually, battery pack is used to stabilize power by peak shaving and valley filling. In this paper, lithium-ion battery is used as the energy storage device of wind-solar hybrid system, and a control strategy for energy storage system based on fuzzy unscented Kalman filter is proposed. Taking the battery state of charge (SOC) as the target value, the fuzzy control strategy can effectively reduce the system's demand for battery capacity, keep the battery SOC value in a normal state, avoid overcharge and over-discharge of the battery, and smooth the output power fluctuations of wind-solar power field. The simulation results show that after the above smoothing strategy, the battery state of charge is effectively controlled, which improves the working accuracy and prolongs the life of the energy storage system.

**KEY WORDS :** wind-solar hybrid power generation; lithium-ion battery; fuzzy control; unscented Kalman filter; battery state of charge

**摘要:** 风光互补发电系统的能量输出受外界因素影响较大, 通常用蓄电池组削峰填谷, 稳定功率。本文以锂离子电池作为风光互补系统的储能装置, 提出了基于模糊无迹卡尔曼滤波的储能系统控制策略。以电池荷电状态(state of charge, SOC)为目标值, 通过模糊控制策略, 有效降低系统对于电池容量的需求, 使电池 SOC 值处于正常状态, 避免电池过充过放, 同时实现了风光电场输出功率波动的平滑。仿真结果表明经过上述平抑策略后, 电池荷电状态得到有效控制,

提高工作精度的同时也延长了储能系统的寿命。

**关键词:** 风光互补发电; 锂离子电池; 模糊控制; 无迹卡尔曼滤波; 电池荷电状态

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

随着全球对可再生能源需求的不断增加, 风能和太阳能已成为两种最重要的可再生能源。风能、太阳能分布、来源十分广泛, 储存容量庞大, 具有无限的潜力, 因而在新能源中极具有代表性。但是这两种能源的输出功率受气候和地理位置的影响, 存在着波动性和不可预测性。为了解决这个问题, 人们采取了风光互补发电的方案, 同时利用风能和太阳能进行发电, 使两者在空间和时间上进行互补。这种发电方式不仅可以提高能源的可靠性, 而且还可以有效地减少对环境的影响<sup>[1]</sup>。

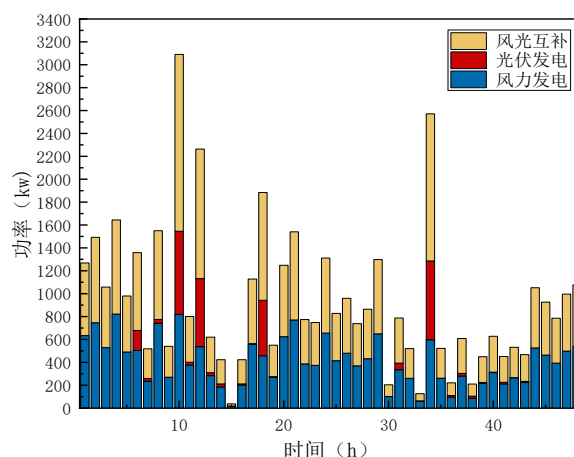


图1 风光互补发电对比图

Fig.1 Comparison Chart of Wind-Solar Hybrid Power Generation

项目名称: 钙钛矿薄膜太阳能电池驱动农村生活污水低成本智能一体化系统研发(2023JH2/10700009)。

Project Research and Development of Low-cost Intelligent Integrated System for Rural Domestic Sewage Treatment Driven by Perovskite Thin-film Solar Cells (2023JH2/10700009).

图1为内蒙古某地48小时内风光发电数据图,可以看出经过互补后的功率数值更加稳定。但是风光电能无法很好地大量储存,电网的消纳能力也同样有限,这导致了弃风、弃光等问题在新能源开发利用中时常出现。而储能系统往往是解决此类问题的关键手段。储能系统能保证能量的平稳输出,有效调节峰谷,使之成为稳定可靠的能源供应系统<sup>[2]</sup>。而且储能系统的介入能够提高电力系统的稳定性,减小新能源对电网的影响,促进新能源并网。还可以与风力发电、光伏发电等新能源发电机组协同优化运行,有效提升新能源发电的调节能力,增强电网的柔性和本地消化新能源的能力<sup>[3]</sup>。

目前适于大规模应用储能技术有机械储能、电化学储能、热储能和化学类储能<sup>[4]</sup>。电化学储能中的可充电电池储能具有绿色环保的特点,而其中的锂离子电池是一种具有储能密度高、寿命长、自放电率低、高功率承受能力强等特点的新型高能量二次电池,近年来以其独特的特性受到人们的关注与喜爱<sup>[5]</sup>。

电池的荷电状态估计对于电池的稳定性有着重要的意义,精确的SOC估计是储能系统SOC维持在正常区间的前提,通过控制策略调控充放功率避免损害电池,同时也可以间接稳定功率的输出<sup>[6]</sup>。基于模型的电池SOC估计法相比于数据驱动法不需要大量的计算或强大的计算能力,因而十分受研究人员欢迎。主要的模型驱动法为卡尔曼滤波法,它是一种非常重要的状态估计技术,通过对系统状态进行递归预测和递归更新,以获得最优预测结果,优点是简单易于实现,并且在大多数情况下具有较高的精度<sup>[7-8]</sup>。

扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter,EKF)通过一阶泰勒级数展开线性化观测方程,以实现状态估计。但是如果系统的非线性很强则容易引起误差<sup>[7]</sup>。

无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter,UKF)和EKF在处理非线性系统时有所不同。无迹卡尔曼滤波的原理是使用一组确定的点来代替扩展卡尔曼滤波进行数值积分,从而更准确地近似未知非线性函数的信息。它避免了扩展卡尔曼滤波的一阶展开带来的误差,具有更好的性能,特别是在高维、高非线性系统中表现更为优秀<sup>[8]</sup>。

储能系统功率调节对风光互补发电系统整体稳定性和电池寿命有很大影响,研究人员在功率优化控制方面做了大量研究。文献[9-10]在混合储能容量配置中使用VDM分解储能系统功率,有效实现了储能系统额定功率和容量的分配。文献[11]设

计了一种基于改进粒子群优化算法的模型求解算法,以实现风能和太阳能储能微电网的最优能量调度,取得了良好的经济运行效果。文献[12]采用了多元储能系统配置和优化运行方法,有效降低了综合能源的波动性对系统稳定性的影响,并且提高了经济性。文献[13]以储能系统经济型为目标计算风光互补系统的最优容量配置,有效减少系统的投资成本,提高了风光互补系统供电经济性。文献[14-16]为代表的混合储能功率分配策略,根据不同类型的储能特性,通过变分模态分解算法对混合储能系统进行功率分解并实现出力的合理分配,具有良好的风电平抑效果,并可以降低储能系统的容量配置需求。文献[17]使用小波包低通滤波算法控制策略,有效稳定了电池SOC的状态值,减小对电池的损害。但算法在储能系统的荷电状态估计上不够精准。文献[18]对混合储能功率进行小波包分解,分别进行平抑,实现混合储能内部的功率分配,使混合储能系统的使用时间更长。但并未考虑储能系统的SOC问题。文献[19]在考虑风光互补的情况下,利用模型预测控制算法进行分析,设计交直流电网中的储能优化配置。

现有的文献大多是从单方面进行优化,对电池荷电状态的精确估计和调优很少提及。锂离子电池具有能量密度高、充放电效率高、对环境友善等优点,适合风光储能系统。本文以锂离子电池为风光电场的储能单元,提出了一种基于模糊无迹卡尔曼滤波的控制策略,既能有效地平抑了风光波动,又能根据精确的SOC估计值及时调整充放电功率,使得电池SOC能够快速自动回复到正常状态,防止过充过放,从而有效地保护了储能电池,提高系统稳定性。

## 1 风光储联合系统结构

风光互补发电储能系统包含了风机、太阳能电池板、变换器、电池储能系统和电解槽。风光电场的出力由多台风电机组和光伏板的功率叠加而来,由于风光具有随机性和波动性的特点,风力发电和光伏发电功率波动较大,若直接接入电网会对电网稳定性造成负面影响。而风光互补能有效减少其各自的波动性,使整体功率输出更加稳定。虽然经过互补后的输出功率较单一功率更加稳定,但是波动性仍旧存在,输出功率会对电网造成很大的影响。为减少风光电场的的不稳定性对电网、负载的影响,加入储能系统来平抑风光电场功率波动。

本文以锂离子电池为储能系统,连接在风光电厂附近。风电和光电通过交直流变换将功率输送到

储能系统中再输送给电网。图2为风光互补发电储能流程图，系统的具体流程如下：

首先将风力发电和光伏发电的输出功率经无迹卡尔曼滤波器输入到储能系统中，通过储能系统来平抑发电波动，同时采用无迹卡尔曼滤波策略。

通过无迹卡尔曼滤波器对风光功率数据进行数据估计滤波，使得风光互补发电的输送到储能系统的功率波动更小，对储能系统的稳定性起到了很大的作用。

之后输送到储能系统的功率经平抑后稳定地输送到电网和负载，同时使用模糊无迹卡尔曼滤波对储能系统的荷电状态进行精准估计和自动调节，避免过充过放，延长储能系统的寿命同时达到使整体发电系统稳定的目的。

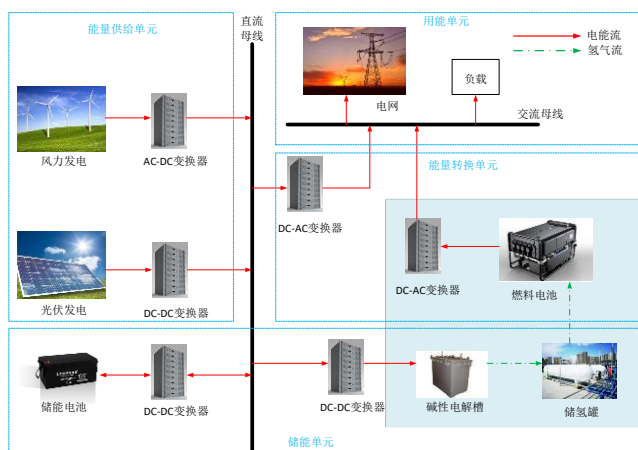


图2 风光互补发电储能流程图

Fig.2 Flowchart of Wind-Solar Hybrid Power Generation and Energy Storage

## 2 研究方法

### 2.1 无迹卡尔曼滤波算法

无迹卡尔曼滤波是一种先进的滤波技术，具有实用性强、精度高、实时性好等特点。扩展卡尔曼滤波局限性在于它只适用于较弱的非线性系统，对于强非线性系统可能会出现较大误差。无迹卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波相比，优点在于它不需要对非线性函数进行泰勒级数展开，因此可以适用于更广泛的非线性系统<sup>[20-21]</sup>。

EKF滤波在线性化过程中忽略了二阶及更高阶项，只能用于低阶非线性对象的估计，被估计对象的非线性特性增强会相应增大误差。此外，雅克比矩阵计算在线性化过程中会增加计算负担。

为解决以上两点问题，本文采用了无迹卡尔曼滤波算法。该算法不仅适用于线性对象，也能有效处理非线性对象的估计问题，并且能够减少计算量，充分展现出其优势。

无迹卡尔曼滤波公式流程如下：

1) 相比于一般的卡尔曼滤波，UKF算法增加了无迹变换。设非线性变换 $Y=f(X)$ 。状态向量 $X$ 为 $n$ 维随机变量， $n$ 为状态维数， $\bar{X}$ 为均值， $P$ 为方差，通过无迹变换来得到 $2n+1$ 个采样点和对应的权值 $w$ 来计算 $Y$ 的统计特征。

计算 $2n+1$ 个采样点(Sigma点集)

$$\begin{cases} X^0 = \bar{X}, i=0 \\ X^i = \bar{X} + \left( \sqrt{(n+\lambda)P} \right)_i, i=1 \sim n \\ X^i = \bar{X} - \left( \sqrt{(n+\lambda)P} \right)_i, i=n+1 \sim 2n \end{cases} \quad (1)$$

权重和方差计算公式为：

$$\begin{cases} w_m^0 = \frac{\lambda}{n+\lambda} \\ w_c^0 = (1-\alpha^2+\beta) + \frac{\lambda}{n+\lambda} \\ w_m^i = w_c^i = \frac{\lambda}{2(n+\lambda)}, i=1 \sim 2n \end{cases} \quad (2)$$

式中 $c$ 为协方差， $m$ 为均值， $\lambda$ 为缩放比例参数，可以降低预测误差。 $\alpha$ 控制采样点的分布状态， $\beta$ 为非负的权系数。

2) UKF算法的实现

$$\begin{cases} X(k+1) = f(x(k), W(k)) \\ Z(k) = h(x(k), V(k)) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $k$ 代表时间， $X$ 为随机变量， $Z$ 为观测变量， $W(k)$ 、 $V(k)$ 为相对应的高斯白噪声。 $f$ 为非线性观测方程函数。 $W(k)$ 具有协方差矩阵 $Q$ ， $V(k)$ 具有协方差矩阵 $R$ 。根据无迹变换公式获取一组采样点及其对应的权值。

$$X^i(k|k) = \begin{bmatrix} \hat{X}(k|k), \hat{X}(k|k) - \sqrt{(n+\lambda)P(k|k)}, \\ \hat{X}(k|k) + \sqrt{(n+\lambda)P(k|k)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

计算 $2n+1$ 个采样点集的一步预测

$$X^i(k+1|k) = f[k, X^i(k|k)], i=1 \sim 2n+1 \quad (5)$$

计算系统状态量的一步预测及协方差矩阵

$$\hat{X}(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n} w_m^i X^i(k+1|k) \quad (6)$$

$$P(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n} w_c^i \left[ \hat{X}(k+1|k) - X^i(k+1|k) \right] \quad (7)$$

$$\left[ \hat{X}(k+1|k) - X^i(k+1|k) \right]^T + Q$$



$w_m^i$ ,  $w_c^i$  分别是均值权重和协方差权重。

传统的卡尔曼滤波算法通过上一时刻的状态代入状态方程,通过一次计算得到状态的预测,得到的结果不够精准,而无迹卡尔曼滤波在利用一组采样点的预测的基础上进行加权求均值,得到系统状态量的一步预测。然后根据所得结果再次使用无迹变换,产生新的采样点集,带入预测方程得到预测的观测量。

$$X_1^i(k+1|k) = \begin{bmatrix} \hat{X}(k+1|k), \\ \hat{X}(k+1|k) + \sqrt{(n+\lambda)P(k+1|k)}, \\ \hat{X}(k+1|k) - \sqrt{(n+\lambda)P(k+1|k)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Z^i(k+1|k) = h(X_1^i(k+1|k)), i=1 \sim 2n+1 \quad (9)$$

由得到的 sigma 点观测预测值,通过加权求和得到系统预测的均值和协方差。

$$\begin{aligned} \hat{Z}(k+1|k) &= \sum_{i=0}^{2n} w_m^i Z^i(k+1|k) \\ P_{Z_k Z_k} &= \sum_{i=0}^{2n} w_c^i \left[ Z^i(k+1|k) - \hat{Z}(k+1|k) \right] \\ &\quad \left[ Z^i(k+1|k) - \hat{Z}(k+1|k) \right]^T + R \\ P_{X_k Z_k} &= \sum_{i=0}^{2n} w_c^i \left[ X_1^i(k+1|k) - \hat{Z}(k+1|k) \right] \\ &\quad \left[ Z^i(k+1|k) - \hat{Z}(k+1|k) \right]^T \end{aligned} \quad (10)$$

图 3 为无迹卡尔曼滤波的流程图

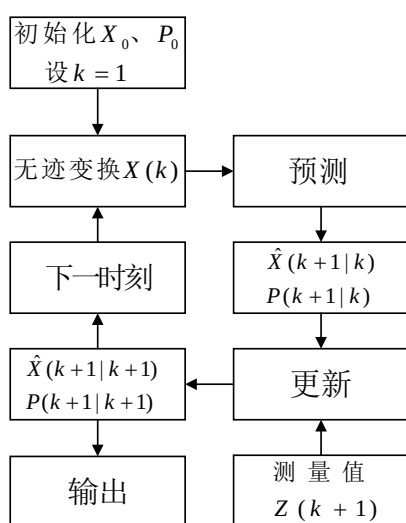


图 3 无迹卡尔曼滤波流程图

Fig.3 Flowchart of Unscented Kalman Filter

计算系统的更新状态变量和协方差矩阵

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1) \left[ Z(k+1) - \hat{Z}(k+1|k) \right]$$

$$K(k+1) = P_{X_k Z_k} P_{Z_k Z_k}^{-1}$$

$$P(k+1|k+1) = P(k+1|k) - K(k+1) P_{Z_k Z_k} K^T(k+1)$$

(11)

从上式可以看出,无迹卡尔曼滤波在处理非线性滤波时在采样点附近进行无迹变换即可,而不用做泰勒级数展开并进行前  $n$  阶近似。获得的采样点集的均值和协方差与原统计特性匹配并映射,得到状态概率密度函数,这是一种近似解。

## 2.2 储能电池荷电状态估计

在风光储能系统中,对储能电池的荷电状态(SOC)和健康状态(SOH)等参数的准确估计是保证系统稳定运行的关键。实时对电池状态的监测和控制非常重要,而无迹卡尔曼滤波器可以提供实时的状态估计和预测。保持电池容量处于安全范围对电池稳定性和寿命有很大影响,在过度放电或充电的情况下,储能电池的寿命可能会缩短。由于无迹卡尔曼滤波采用非线性变换处理非线性系统,并通过无迹变换将噪声的影响降至最小,因此在处理锂电池充放电特性的非线性时,无迹卡尔曼滤波可以更好地处理非线性特性,提高 SOC 估计的精度和可靠性。



图 4 储能电池工作流程图

Fig.4 Flowchart of Energy Storage Battery Operation

根据无迹卡尔曼滤波算法对储能电池的荷电状态估计,当储能电池处于不同工作状态即不同 SOC 范围时,需要对电池的充放电状况进行调整:

1) 储能电池 SOC 较高时,减少对电池的充电或不充电,将电池储能系统中存储的电量释放出来,直到电池状况稳定。

2) 储能电池 SOC 较小时,减少电池放电或不放电,将电能存放到电池储能系统中直至电池状态稳定。

3) 如果储能电池 SOC 处于极端状态如过高或过低时,应当停止工作,避免储能电池出现进一步损坏,降低寿命。

以上三种情况可以有效改善电池储能系统的稳定性,使其能够长时间维持正常工作,这能够提高了风能和光能的利用率,提高经济性。通过这三种调控策略可以有效对功率的把控,精确控制储能电池 SOC 数值,提高电池和系统稳定性。电池储能系统的工作流程如图 4 所示。

## 2.2 储能电池功率模糊控制策略

风光电场的输出功率经过风光互补后虽然一定程度上减小了波动性,但是功率骤变情况依旧存在,锂离子电池在长时间工作下难免会偏离正常工作状态,其 SOC 值处于较高或较低的水平。若此时储能电池仍通过无迹卡尔曼滤波的给定功率值来充电放电,不及时采取控制策略,将导致电池过充过放甚至过载。电池长期处于极端状态会对电池内部的化学物质造成损害,影响电池寿命。因此在极端状态下储能系统采取自动控制策略来调节 SOC 使其能够自动恢复是必要的,起到维持系统稳定性、延长储能电池寿命的作用。

图 5 中风光互补功率先通过无迹卡尔曼滤波器进行平滑,然后将功率平滑值输送到锂离子电池并进行 SOC 估计, SOC 值偏离正常值时,模糊控制器 1 将调整储能电池充放电功率,使其恢复到正常值。而当 SOC 处于极端状态时,通过模糊控制器 2 调节滤波参数值,避免电池过载。

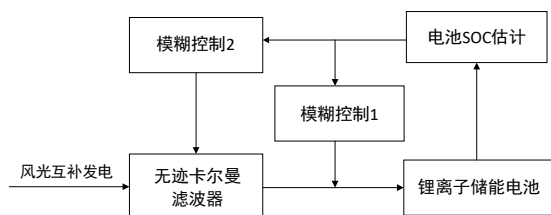


图 5 模糊控制结构图

Fig.5 Fuzzy control block diagram

无迹卡尔曼滤波中的量测噪声协方差矩阵  $R$  对滤波器的平滑值有很大影响,当风光功率骤变时,根据储能电池 SOC 估计值及时采取模糊控制策略,调整无迹卡尔曼滤波器参数值,有效防止突变功率损害电池。

当储能电池的荷电状态处于极端数值时,调节  $R$  值使公式(10)中  $R$  变为  $nR$ 。该策略能有效调节风光功率经过卡尔曼滤波器后输送到储能电池的功率,使其更加平滑,避免过强的功率波动损害电池。模糊调整量  $n$  的模糊规则如表 1 所示,模糊论域为

$\{1.5, 1, 0, -1, -1.5\}$ , 模糊变量语言变量为  $\{PB, PS, ZO, NS, NB\}$ 。

表 1 防功率骤变模糊控制规则表

Tab.1 Fuzzy Rule Table for Preventing Sudden Power

| Y(k) | PB   | PS  | ZO | NS  | NB   |
|------|------|-----|----|-----|------|
| n    | 0.05 | 0.1 | 1  | 0.1 | 0.05 |

为防止电池荷电状态值长期处于较高或较低水平,需根据电池 SOC 估计值通过模糊控制及时调整电池的充放电电量,严格控制输入输出功率。公式(11)变为公式(12):

$$\hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1)[Z(k+1) - \hat{Z}(k+1|k)] + mX_p \quad (12)$$

式中  $X_p$  为储能电池的充放电功率,  $m$  为模糊调整系数,由估计出的储能电池荷电状态值来对  $m$  值进行随时调整,达到控制电池功率输入输出量的目的,使电池电量处于正常水平。模糊调整量  $m$  的模糊规则如表 2 所示,模糊论域为  $\{1, 0.2, 0, -0.2, -1\}$ , 模糊语言变量为  $\{PB, PS, ZO, NS, NB\}$ 。

表 2 稳定 SOC 值的模糊控制规则表

Tab.2 Fuzzy Rule Table for Stabilizing SOC Values

| Y(k) | PB   | PS   | ZO | NS  | NB  |
|------|------|------|----|-----|-----|
| m    | -0.2 | -0.1 | 0  | 0.1 | 0.2 |

当电池 SOC 处于较高或较低水平时,给电池加上模糊调整功率来实现在高电量时少充电,在低电量是少放电,控制电池 SOC 水平。

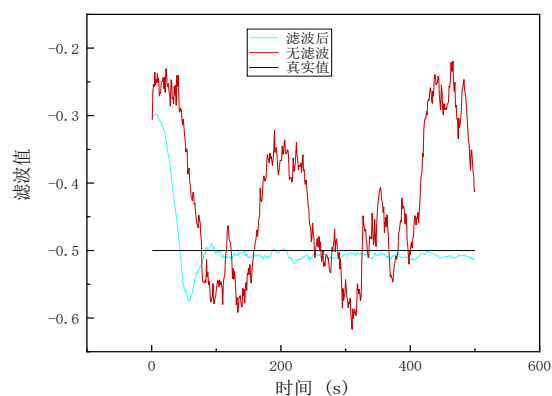
## 3 仿真分析

文中将电池储能系统与风光互补发电系统结合,将风光电场输出的波动功率经过无迹卡尔曼滤波器得到功率平滑值输入给储能电池,使电池储能的输入功率稳定,防止波动过大对电池容量造成影响。同时利用无迹卡尔曼滤波提高电池荷电状态的估计精度,并采用模糊控制策略通过改变储能电池充放电功率和滤波器参数来自动调节 SOC,保证了系统的稳定性和工作精度。在此对这三部分在仿真软件 MATLAB 中分别对其控制算法进行仿真验证,证明该方法的有效性。

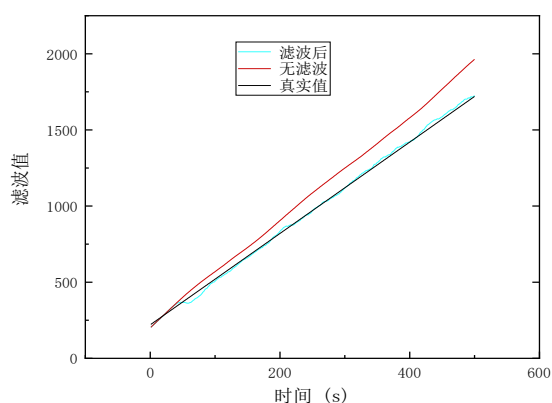
### 3.1 无迹卡尔曼滤波器平滑风光功率波动仿真

无迹卡尔曼滤波是根据后验概率密度进行近似计算的滤波算法,而并非近似非线性模型将其线性化,相对于传统滤波方法解决了延时性问题。图 6 分别是无迹卡尔曼滤波器在两种不同状态下的滤波情况,根据设定初值使用轨迹生成器模拟不同情况下的数据轨迹,并使用无迹卡尔曼滤波来平滑波

动，向真实值进行近似计算。



(1) 状态 A



(2) 状态 B

图 6 无迹卡尔曼滤波

Fig.6 Unscented Kalman filter

从图中可以看出经过滤波后的值贴近真实值，而无滤波的值则波动偏差较大。采用无迹卡尔曼滤波的平滑效果良好，可以减小风光发电功率波动对储能系统造成负面影响。

同时将 UKF 算法与 EKF 算法进行对比。从图 7 和图 8 中可以看出 UKF 算法的滤波效果要好于 EKF 算法，滤波值更贴近真实值，并且误差更小。这证明了采用 UKF 算法的可行性与优越性。

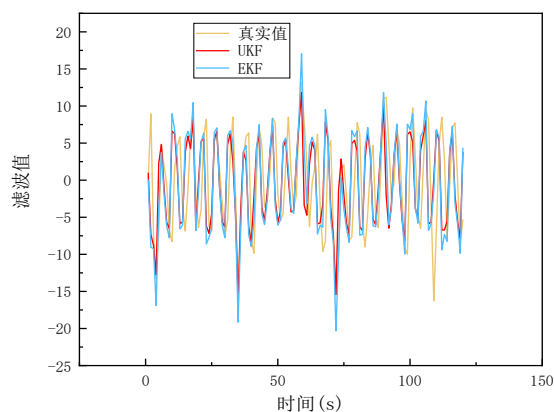


图 7 UKF 与 EKF 滤波对比  
Fig.7 Comparison of UKF and EKF Filtering

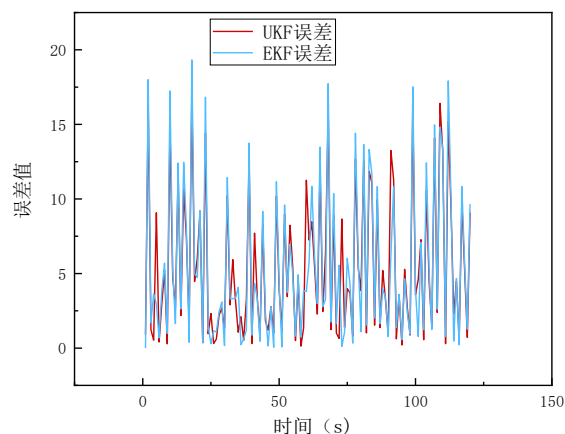


图 8 UKF 与 EKF 误差

Fig.8 Errors of UKF and EKF

### 3.2 电池储能系统 SOC 估计仿真

图 9 使用 UKF 算法对锂离子电池的荷电状态进行估计，储能电池在不同的环境温度和放电倍率下的参数有所不同，从而会影响荷电状态的估计，导致结果有偏差。

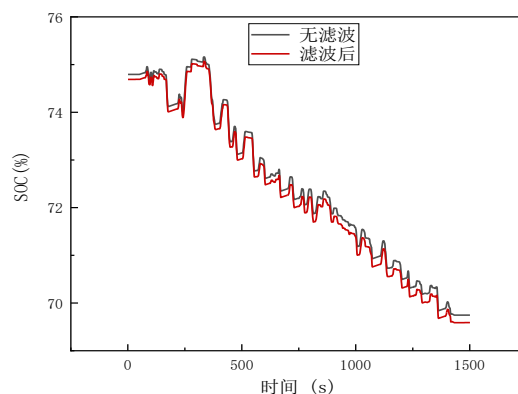


图 9 UKF 估计电池 SOC

Fig.9 UKF estimates battery SOC

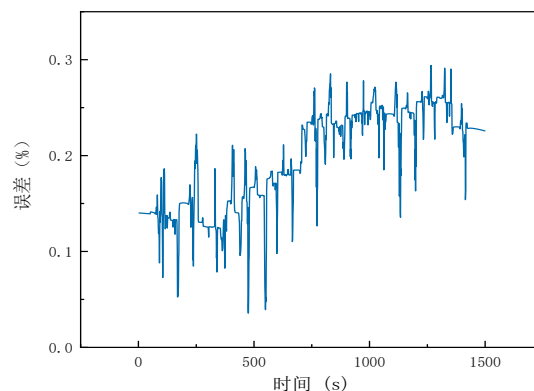


图 10 SOC 估计误差

Fig.10 SOC estimation error

这里设定电池的环境温度为 45°C，电池以 1 C

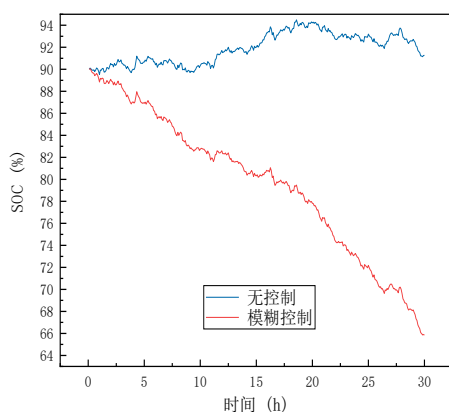
的放电倍率进行充放电,当储能电池的荷电状态达到上限或下限时结束运行。

从图 10 中可以看出,使用 UKF 算法估计储能电池荷电状态效果良好,滤波后的估计值和真实值相差较小,估计误差百分值始终在 0.3 以内,整个 SOC 跟踪流程十分稳定。使用 UKF 算法同时对风光功率进行平滑输送给储能电池并对储能电池的荷电状态进行估计这一策略具有很大的优势。输入平滑功率值的储能电池的荷电状态根据精确的估计值做出充放功率调整,将电源容量控制在合理的范围内,确保电池状态稳定的同时也稳定了功率输出。

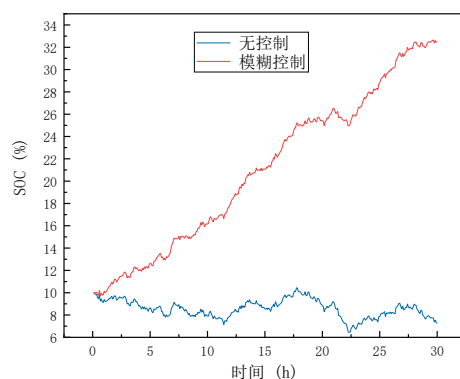
### 3.3 模糊无迹卡尔曼控制仿真

当电池 SOC 值处于偏高或偏低状态时,采取模糊控制策略对电池 SOC 值进行优化,使其调整到合理值。为证明本文的 SOC 控制策略的优越性,在仿真中采用电池在两种不同极端状态下的 SOC 情况,分别是处于高水平值的 90%和处于低水平值的 10%,并验证其 SOC 状态自主恢复能力。

状态 A: 当电池 SOC 为 90%时,采用模糊控制策略对电池 SOC 在高水平状态下的恢复能力进行仿真,并和不采取控制策略的情况进行对比,仿真结果如图 10(1)所示。



(1) 状态 A



(2) 状态 B

图 11 储能电池 SOC 值

Fig.11 SOC value of energy storage battery

当采用无控制策略时, SOC 值将保持在极端水平,无法自动恢复;采用模糊控制策略及时调整储能电池充放电功率,在 27h 时 SOC 值能够自主恢复到 70%以内,达到正常水平,避免损害电池。

状态 B: 当电池 SOC 为 10%时,采用模糊控制策略对电池 SOC 在低水平状态下的恢复能力进行仿真,并和不采用控制策略的情况对比,仿真结果如图 10(2)所示。采用无控制策略时, SOC 值将保持在低水平,无法恢复到正常状态;采用模糊控制策略储能电池 SOC 值能够在 26h 时自主恢复到 30%以上,达到正常水平,稳定功率输出。

## 4 结论

风光互补发电储能系统可以有效地消纳风电、光电并稳定输出功率缓解电网压力,其中荷电状态是电池储能系统的重要参数,它对储能电池的寿命长度和稳定性有着很大的影响。本文针对电池储能系统的荷电状态稳定性问题,提出了一种基于模糊无迹卡尔曼滤波的电池储能系统三步稳定。首先将风光互补发电功率用无迹卡尔曼滤波器对进行平滑,并将功率平滑值输入给储能电池,然后使用无迹卡尔曼滤波算法对储能系统的电池荷电状态进行精确估计,同时根据估计值采用模糊控制策略对电池进行充放电调整,及时调节电池 SOC 值。最后在 MATLAB 中进行了仿真验证,结果表明该策略不仅能平抑风光互补发电输出功率波动,还能有效调节电池的 SOC 并防止其过充和过放,延长电池寿命,确保电储能系统稳定的同时也稳定了对电网和负载的功率输出。今后会在稳定功率输出的基础上与并网和制氢储能方面相结合,使其能够更好地消纳利用。

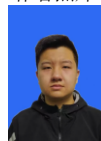
## 参考文献

- [1] Wei S, Wenjin Z, Qi L, et al. Capacity configuration optimization for green hydrogen generation driven by solar-wind hybrid power based on comprehensive performance criteria[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, 11.
- [2] Nehrir H, Wang C, Strunz K, et al. A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configuration, control and applications[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2012. DOI:10.1109/PESGM.2012.6344852.
- [3] S.B. W, M.A. H, Jern P K, et al. Techno-economic assessment of a hybrid renewable energy storage system for rural community towards achieving sustainable development goals[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2023, 50.
- [4] 龚一平, 王晨晖, 修晓青等. 大规模储能技术及多功能应用研究综述[J]. *供用电*, 2023, 40(02):68-77. DOI:10.19421/j.cnki.1006-6357.2023.02.010.
- [5] Mekonnen Y, Sundararajan A, Sarwat A I. A review of cathode and anode materials for lithium-ion batteries[C]//SoutheastCon 2016. IEEE, 2016. DOI:10.1109/SECON.2016.7506639.
- [6] 赵轩, 李美莹, 余强等. 电动汽车动力锂电池状态估计综述[J]. *中国公路学报*, 2023, 36(06):254-283. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.06.021.
- [7] 陈明亮, 朱诗倩, 王卢阳. 自适应扩展卡尔曼滤波在不同噪声情况下的SOC估计[J]. *机电工程技术*, 2023, 52(08):64-67.
- [8] Rezaei O, Wang Z, Rahdan A, et al. A fuzzy robust two-stage unscented Kalman filter method for uncertainty and state of charge estimation of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023.
- [9] 黄利祥, 张新燕, 梁帅等. 一种用于平抑风光功率波动的混合储能容量配置方法[J]. *现代电子技术*, 2023, 46(09):173-177. DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2023.09.032.
- [10] 吴倩, 王洋, 王琳媛等. 计及波动平抑与经济性的风光储系统中混合储能容量优化配置[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(04):112-119. DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2022.04.017.
- [11] Jing H, Kui W. Energy Optimal Scheduling Method of Microgrid with Wind and Solar Storage Based on Demand Response[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2503(1):.
- [12] 高明非, 张策, 解彤等. 考虑风光消纳的综合能源系统多元储能优化配置方法[J]. *动力工程学报*, 2023, 43(06):796-804. DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2023.06.017.
- [13] 李伟, 刘立, 王豪琦等. 基于两阶段模型的风光互补系统储能容量配置优化方法[J]. *水电与新能源*, 2023, 37(01):74-78. DOI:10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2023.01.017.
- [14] 王镇林, 陈麒宇, 张雅静等. 基于混合储能减小平抑功率滞后性的风电平抑策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(09):149-159.
- [15] 蒋新科, 刘春, 张雪松等. 基于双储能的风电功率波动平抑策略研究[J/OL]. *电测与仪表*:1-8[2023-11-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230322.1512.006.html>.
- [16] 黄利祥, 张新燕, 梁帅等. 平抑风光功率波动的混合储能功率分配策略[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(25):10825-10834.
- [17] 李征, 陈佳瑜, 石坤. 风电功率波动频率域分析及储能平滑功率算法优化[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(04):184-193. DOI:10.19912/j.0254-0096.2020.04.027.
- [18] 陈裕, 张怡, 谢俊峰. 自适应滑动平均与小波包分解平抑风电波动[J]. *控制工程*, 2021, 28(07):1281-1288. DOI:10.14107/j.cnki.kzgc.20210196.
- [19] 陈泽西, 孙玉树, 张妍等. 考虑风光互补的储能优化配置研究[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(S1):145-153. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190536.
- [20] 李争, 张蕊, 秦岩等. 基于自适应反演滑模的电池储能系统的能量管理[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(10):67-74. DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2022.10.010.
- [21] 王春, 李强. 基于无迹卡尔曼滤波的超级电容SOC估计[J]. *电源技术*, 2021, 45(12):1624-1627.

收稿日期:

作者简介:

作者照片



张之平

张之平(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源及其发电技术, E-mail: 3527207518@qq.com;

尹常永(1970), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电气设备故障检测与诊断, E-mail: 909081370@qq.com.



文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于主从博弈的多区域综合能源系统电能共享运行优化策略

刘 姝<sup>1</sup>, 管晓科<sup>2</sup>

(1. 沈阳工程学院新能源学院, 辽宁省沈阳市 110136; 2. 沈阳工程学院电力学院, 辽宁省沈阳市 110136)

**Multi-area integrated energy system power energy based on master-slave game**LIU Shu<sup>1</sup>, GUAN Xiaoke<sup>2</sup>

(1. College of New Energy, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 2. School of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

**ABSTRACT:** In order to promote the energy complementarity of multi-regional integrated energy system and improve the utilization efficiency of renewable energy, an optimization scheme of power sharing operation based on master-slave game theory is proposed. Firstly, a step-by-step carbon trading mechanism is considered, and carbon capture and power-to-gas technologies are integrated into the CHP model to reduce carbon emissions. Secondly, an iterative model of dynamically adjusted compensation price is constructed to stimulate the active participation of the user side in the flexibility interaction of the power grid. Then, a two-level game framework with the minimum comprehensive cost of the system is proposed, in which the system operator is the dominant, and the load aggregator of each park is the participant, and the alliance relationship is included in the game behavior. Finally, the feasibility of the method is verified by simulation. The results show that the proposed strategy can not only optimize the economic objectives of the multi-agent integrated energy system, but also effectively promote wind energy consumption and reduce carbon emissions.

**KEY WORDS:** multi-agent integrated energy system; electricity to gas; carbon capture; electric energy interaction; demand response; master-slave game

**摘要:** 为推动多区域综合能源系统的能源互补, 提升可再生能源的使用效率, 提出了基于主从博弈理论的电力共享运行优化方案。首先, 考虑了阶梯式碳交易机制, 并在热电联产模型中整合了碳捕集和电转气技术, 以减少碳排放量; 其次, 构建了动态调整的补偿价格迭代模型, 激发用户侧对电网灵活性互动的积极参与; 然后, 提出了提出以系统综合成本最小的双层博弈框架, 其中系统运营商作为主导, 各园区的负荷聚合商作为参与者, 进行联盟关系被纳入博弈行为; 最后, 通过仿真验证了该方法的可行性。结果显示, 所提策略不仅能实现多元主体综合能源系统的经济目标优化, 还能有效促进风能消耗和降低碳排放。

**关键词:** 多主体综合能源系统; 电转气; 碳捕集; 电能交互; 需求响应; 主从博弈

## 0 引言

“碳达峰 碳中和”目标的推动下, 大规模接入可再生能源以实现清洁、高效和灵活的新型能源系统的安全和稳定运行是当前能源领域的迫切问题<sup>[1]</sup>。综合能源系统(Integrated Energy System, IES)通过能源耦合设备, 实现了不同能源之间的充分互补和替代, 为清洁能源的高比例消纳和能源结构的转型提供了解决途径<sup>[2]</sup>。同时多主体 IES 之间的点对点(peer to peer, P2P)能源交易, 可以有效提高新能源消纳率, 降低系统的用电成本和碳排放<sup>[4]</sup>。

博弈论在综合能源系统的应用研究正日益深入。文献[5]构建了一个针对多元负载型微电网的模型, 旨在优化各微网之间的电能交换和设备协同输出, 提升了整体调度效率。文献[6]引入了主从博弈理论, 设计了考虑综合需求响应和电能交易的双层优化策略, 实验结果表明, 增强了系统的协同效应, 也提高了联盟的整体经济效益。文献[7]进一步探讨了电能共享的多 IES 运行优化, 利用纳什议价博弈理论提升了多 IES 的收益潜力。文献[8]考虑了可再生能源的不确定性, 通过交替方向乘子法处理博弈模型, 多主体联合运行促进了可再生能源的接纳, 并共同提升了收益。文献[9]在电能交易的基础上, 扩展到热能交易, 通过合作博弈理论优化了服务商的运营成本结构。而文献[10]提出了一种电力-天然气综合能源系统的多主体博弈联合规划方法, 解决了网络的规划需求。文献[11]以纳什谈判合作博弈理论为基础, 提出了一种创新的联合规划策略。仿真结果证实, 其有效降低了各参与方的规划成本, 同时确保了规划方案的经济性、合理性和可靠性。

基于上述研究和分析, 首先, 本文考虑低碳运行需求, 构建了耦合碳捕集和电转气设备的 CHP



机组模型；其次，鉴于多区域综合能源系统在优化调度中未充分考虑综合需求响应（integrated demand response, IDR）的作用，建立了一个动态迭代修订补偿价格的 IDR，目标是最大化激发需求侧参与电网灵活性互动的主动性。然后，提出了一种以系统运营商为主导，各个园区负荷聚合商作为参与者，考虑联盟关系的博弈行为的两层博弈模型，以系统总体成本最小化为目标。为激励互联 RIES 积极参与集中调度，从而在多主体博弈互动中实现系统的最优经济效益。

## 1 多主体综合能源系统结构

RIES 由上级电网、天然气网和风电机组（Wind Turbines, WT）；热电联产机组（Combined Heating and Power, CHP）、燃气锅炉（Gas Boiler, GB）、电转气设备（Power-to-Gas, P2G）、碳捕集（Carbon Capture Storage, CCS）技术、蓄电池（Batteries, BT）、蓄热槽（Heat Storage Tank, HST）等部分构成，可通过上级电网和气网进行能源交易，实现区域资源的统一调度。

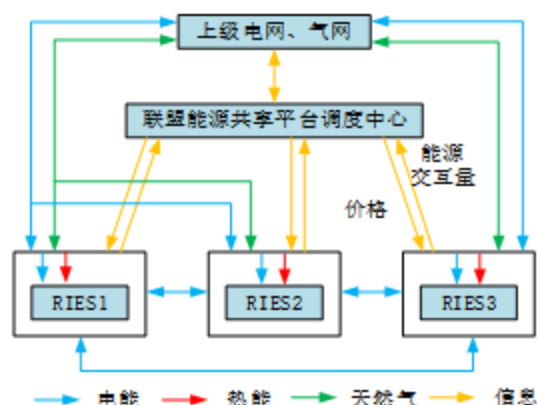


图1 多 RIES 能源共享架构

Fig.1 Multi-RIES energy sharing architecture

## 2 多主体综合能源系统模型

### 2.1 设备模型

#### (1) 含碳捕集和电转气系统的 CHP 模型

1) 在 CHP 模型中包含 P2G 和 CCS，CHP 出力组成可由 3 部分组成：

$$P_{j,t}^{CHP} = P_{j,t}^E + P_{j,t}^{CCS} + P_{j,t}^{P2G} \quad (1)$$

式中： $P_{j,t}^E$  为 CHP 机组供给电力需求的电力； $P_{j,t}^{P2G}$  为供给 P2G 消耗的电力； $P_{j,t}^{CCS}$  为供给 CCS 的电力。

#### 2) P2G 产生天然气的功率：

$$V_{j,t}^{P2G} = \beta P_{j,t}^{P2G} \quad (2)$$

式中： $\beta$  是 P2G 产气功率的电转换效率。

#### 3) P2G 消耗 $CO_2$ 量：

$$V_{j,t}^{CO_2} = \alpha P_{j,t}^{P2G} \quad (3)$$

式中： $\alpha$  是 P2G 消耗  $CO_2$  量。

#### 4) CCS 捕获 $CO_2$ 消耗的电功率：

$$P_{j,t}^{CCS} = \gamma V_{j,t}^{CO_2} \quad (4)$$

式中： $\gamma$  是 CCS 消耗电能的转化效率。

#### 5) CCS、P2G 和 CHP 的电功率功率上下限范围：

$$P_{\min}^{CCS} \leq P_{j,t}^{CCS} \leq P_{\max}^{CCS} \quad (5)$$

$$P_{\min}^{P2G} \leq P_{j,t}^{P2G} \leq P_{\max}^{P2G} \quad (6)$$

$$P_{\min}^{CHP} \leq P_{j,t}^{CHP} \leq P_{\max}^{CHP} \quad (7)$$

式中： $P_{\min}^{CCS}$ 、 $P_{\max}^{CCS}$  分别是 CCS 消耗电功率的下限和上限； $P_{\min}^{P2G}$ 、 $P_{\max}^{P2G}$  分别是 P2G 消耗电功率的上下限； $P_{\min}^{CHP}$ 、 $P_{\max}^{CHP}$  分别是 CHP 发电功率的上下限。

#### 6) 由式 (2) 和式 (4)，得到含 P2G 和 CCS 的 CHP 系统的电热耦合特性方程：

$$\begin{aligned} & \max \{ P_{\min}^E - x_1 H_{j,t}^{CHP} - P_{j,t}^{P2G} - P_{j,t}^{CCS}, \\ & x_m (H_{j,t}^{CHP} - H_{j,0}) - P_{j,t}^{P2G} - P_{j,t}^{CCS} \} \\ & \leq P_{j,t}^E \leq P_{\max}^E - x_2 H_{j,t}^{CHP} - P_{j,t}^{P2G} - P_{j,t}^{CCS} \end{aligned} \quad (8)$$

#### 7) 将约束式 (8) 和式 (9) 代入式 (11)，得到写的电热耦合特性方程：

$$\begin{aligned} & \max \{ P_{\min}^E - x_1 H_{j,t}^{CHP}, x_m (H_{j,t}^{CHP} - H_{j,0}^0) - P_{\max}^{P2G} - P_{\max}^{CCS} \} \\ & \leq P_{j,t}^E \leq P_{\max}^E - x_2 H_{j,t}^{CHP} - P_{\min}^{P2G} - P_{\min}^{CCS} \end{aligned} \quad (9)$$

### (2) 电、热负荷模型

$$P_{j,t}^{load} = P_{j,t}^f + P_{j,t}^{tran} + P_{j,t}^{cut} \quad (10)$$

$$\left| \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{tran} \Delta t \right| = \kappa^{tran} P_{i,t}^{load} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{cut} \leq P_{i,t,\max}^{cut} \quad (12)$$

式中： $P_{j,t}^{load}$  为 RIES 内时段  $t$  的电负荷； $P_{j,t}^f$  为 RIES 内时段  $t$  的固定电负荷； $P_{j,t}^{tran}$  为 RIES 内时段  $t$  的可平移电负荷； $P_{j,t}^{cut}$  为 RIES 内时段  $t$  的可削减电负荷。

$$H_{j,t}^{load} = H_{j,t}^f - H_{j,t}^{cut} \quad (13)$$

$$0 \leq H_{j,t}^{cut} \leq H_{j,t,\max}^{cut} \quad (14)$$

式中： $H_{j,t}^{load}$  为 RIES 内时段  $t$  的热负荷； $H_{j,t}^f$  为 RIES 内时段  $t$  的固定热负荷； $H_{j,t}^{cut}$  为 RIES 内时段  $t$  的可削减热负荷。

### (3) 碳排放模型

#### 1) 实际碳排放模型

$$\begin{cases} E_{IES,a} = E_{e,buy,a} + E_{total,a} - E_{CCS,a} \\ E_{e,buy,a} = \sum_{t=1}^T (a_1 + b_1 P_{e,buy}(t) + c_1 P_{e,buy}^2(t)) \\ E_{total,a} = \sum_{t=1}^T (a_2 + b_2 P_{total}(t) + c_2 P_{total}^2(t)) \\ P_{total}(t) = P_{CHP,e}(t) + P_{CHP,h}(t) + P_{GB,h}(t) \\ E_{CCS,a} = \sum_{t=1}^T \omega P_{CCS,g}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $E_{IES,a}$  表示 IES 产生实际碳排放量;  $E_{e,buy,a}$  表示上级购电产生实际碳排放量;  $E_{total,a}$  表示 GB 和 CHP 总计产生的实际碳排放量;  $E_{MR,a}$  表示 MR 吸收  $CO_2$ ;  $P_{total}(t)$  表示  $t$  时刻 CHP、GB、MR 输出功率;  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  和  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  分别表示燃煤、天然气的碳排放计算系数;  $\omega$  表示 MR 吸收  $CO_2$  系数。

## 2) 阶梯式碳排放交易模型

$$E_{IES,t} = E_{IES,a} - E_{IES} \quad (16)$$

式中:  $E_{IES,t}$  表示 IES 碳排放交易量。

$$C_j^E = \begin{cases} \lambda E_{IES,t} & 0 \leq E_{IES,t} \leq l \\ \lambda(1+\alpha)(E_{IES,t} - l) + \lambda l & l < E_{IES,t} \leq 2l \\ \lambda(1+2\alpha)(E_{IES,t} - 2l) + \lambda(2+\alpha)l & 2l < E_{IES,t} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $C_j^E$ 、 $\lambda$ 、 $l$  和  $\alpha$  分别表示 IES 阶梯式碳交易成本、基价、区间长度、价格增长率以及奖励系数。

(4) 燃气机组、燃气锅炉和储能等数学模型可见文献[6]。

## 2.2 目标函数

基于各设备的运行模型建立了多 RIES 的联盟合作电能共享的优化模型:

$$\begin{aligned} C_j^{RIES} &= C_j^{CHP} + C_j^{buy} + C_j^{ESS} + C_j^E \\ &+ C_j^{DR} + C_j^{tran} + C_j^{P2P} \end{aligned} \quad (18)$$

式中:  $C_j^{RIES}$  为第  $j$  个 RIES 的总体运行成本。

### (1) CHP 机组运行成本

$$C_j^{CHP} = \sum_{t=1}^T \left[ a_1 P_{j,t}^{CHP} + a_2 (P_{j,t}^{CHP})^2 + a_3 P_{j,t}^{CCS} + a_4 P_{j,t}^{P2G} + b_1 \right] \quad (19)$$

式中:  $a_1$  和  $a_2$  为 CHP 机组运行成本系数;  $a_3$  和  $a_4$  分别为 CCS 和 P2G 的运维成本系数;  $b_1$  为运行成本常数。

### (2) 购能成本

$$C_j^{buy} = \sum_{t=1}^T \left[ (\delta_{j,t}^{CH_4} V_{j,t}^{buy}) + (\delta_{j,t}^{buy} P_{j,t}^{buy} - \delta_{j,t}^{sell} V_{j,t}^{sell}) \right] \quad (20)$$

式中:  $C_j^{buy}$  为天然气和外部电网购能成本;  $\delta_{j,t}^{CH_4}$  为天然气购价;  $V_{j,t}^{buy}$  为 CHP 系统在时段  $t$  的总购气量;  $\delta_{j,t}^{buy}$ 、 $\delta_{j,t}^{sell}$  分别为购售电价。

### (3) 电池储能系统运行成本

$$C_j^{ESS} = \sum_{t=1}^T \omega (P_{j,t}^{Bch} + P_{j,t}^{Bdis}) \quad (21)$$

式中:  $C_j^{ESS}$  为 ESS 的退化成本;  $\omega$  为充放电单位能量的退化成本。

### (4) 阶梯式碳交易成本 $C_j^E$ (见式(22))

### (5) 需求响应成本

$$C_j^{DR} = \sum_{t=1}^T (m_e^{cut} P_{j,t}^{cut} + m_e^{tran} P_{j,t}^{tran} + m_h^{cut} H_{j,t}^{cut}) \quad (22)$$

式中:  $C_j^{DR}$  为需求响应成本;  $m_e^{cut}$ 、 $m_e^{tran}$  和  $m_h^{cut}$  分别为负荷转移和负荷削减的补偿单价。

### (6) 电能传输成本

$$C_j^{P2P} = \sum_{i=1}^I c_{i-j}^{P2P} P_{i-j,t}^{P2P} \quad (23)$$

式中:  $C_j^{P2P}$  为第  $i$  RIES 与第  $j$  RIES 在时段  $t$  的传输成本;  $P_{i-j,t}^{P2P}$  为第  $i$  RIES 与第  $j$  RIES 在时段  $t$  的电能交易量。如果  $P_{i-j,t}^{P2P} > 0$ , RIES  $i$  从 RIES  $j$  获取电能; 反之, RIES  $j$  从 RIES  $i$  获取电能。  $c_{i-j,t}^{P2P}$  为 RIES  $i$  需要为交互电量  $P_{i-j,t}^{P2P}$  单位电能价格。

## 2.4 主从博弈机制

本文构建了一主多从的 RIES 双层策略模型, 其操作流程如图 2 所示。该模型的互动分为两层次, 相互之间存在时间顺序和迭代影响。在上层, 系统运营商扮演主导角色, 旨在最小化总体成本, 其决策变量包括发布的能源销售价格、需求响应的补贴费率以及园区内能源转换设备的功率输出。而各个园区的负荷聚合商则处于从属地位, 目标是 minimized 购能成本, 其决策涉及如何调整各类负荷以实现需求响应。在上层决策中, 主导者设定能源价格和补贴率, 并公布于各园区用户。园区用户依据这些价格执行需求响应, 由此计算出的用户购能成本被视为联盟的总成本。下层决策中, RIES 的收入部分被固定, 然后根据外部电网的能源价格和各种能源供应限制, 调整内部的能源转化设备功率、储能电池的充放电功率及风力发电量, 以优化 RIES 的成本结构。这一过程不断迭代, 直到找到最优解决方

案,标志着达到了平衡状态。综上所述,本文探讨的是在形成合作关系时的利益分配问题,研究对象是在园区间联盟框架下的典型主从博弈模式。

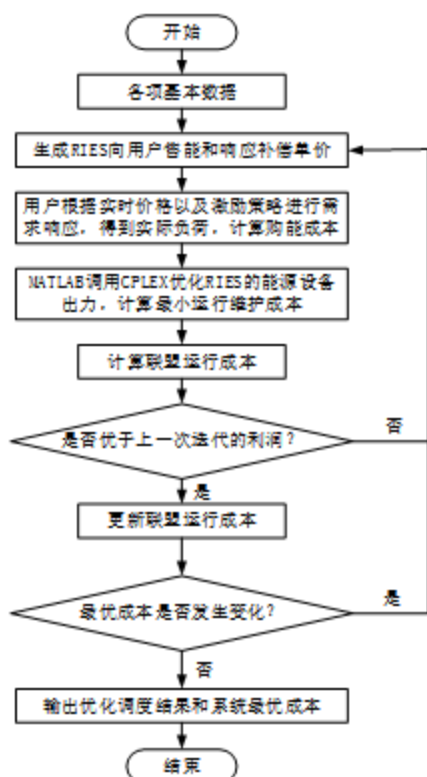


图2 模型求解流程  
Fig. 2 Model solving process

### 3 算例分析

本文案例在 Matlab2018a 中的 Yalmip 上建模,使用 CPLEX 求解成本最小化问题仿真验证。

#### 3.1 仿真结果分析

##### 3.1.1 多主体综合能源系统 P2P 电能交易优化结果分析

如图3所示,各RIES之间的P2P电力交换在不同时间调度结果。在00:00至10:00和16:00至24:00期间,RIES1由于风力发电过剩,能够向电能需求增加、夜间无发电能力的RIES2和RIES3供应电力。相反,在10:00至16:00,由于RIES1的日间电力负荷骤增,它自身出现电力短缺,这时RIES2和3的光伏发电处于高峰,它们能够向RIES1提供支持。这种电能共享策略不仅增强了风能和太阳能的利用效率,减少了对联盟主网电力的依赖,更具经济效益。

分析数据显示,在参与P2P电力合作前,RIES1、2、3的新能源利用率分别为82%、81%和65%。然而,实施P2P电力共享后,这三个RIES的新能源利用率均提升至100%。证明了P2P电力交易对于提升新能源利用率具有显著效果。

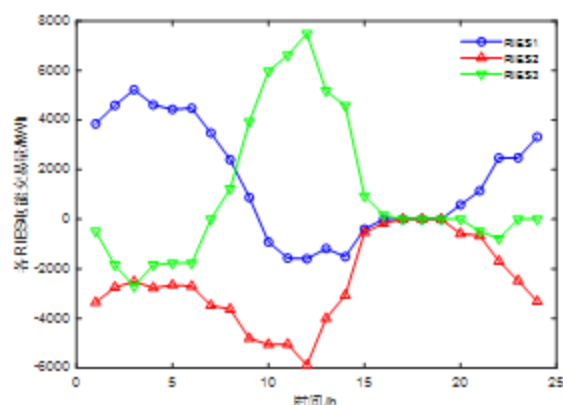


图3 RIES间电能交互结果  
Fig.3 Power interaction results between RIESs  
3.1.2 RIES2 能量调度结果与分析

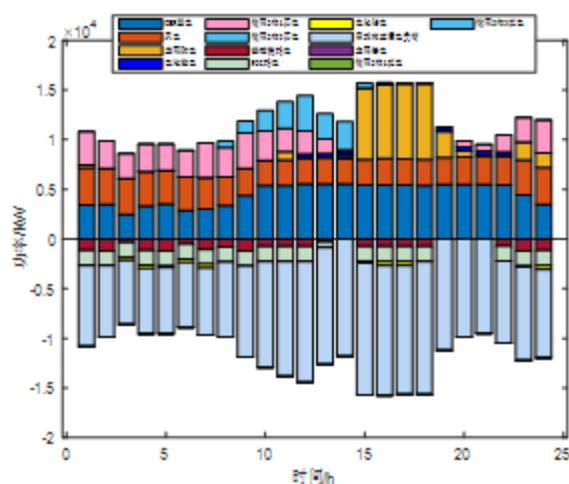


图4 含CCS和P2G的RIES电能调度结果  
Fig.4 RIES power scheduling results with CCS and P2G

图4为RIES2电功率调度平衡结果。在00:00—08:00和20:00—24:00时段,风能资源丰富,DG(主要包括RIES1剩余部分和RIES2两部分)作为系统主要供电来源,同时借助CHP来满足用户用电需求,大降低了整个联盟弃风水平,同时还能减少电网购电量,降低成本;08:00—11:00和15:00—18:00时段,风电出力相对较低,而购电价格较高。此时,系统主要由DG和单位碳排放水平较低的CHP机组、RIES3电能交互及电网购电来满足用电需求。同时将富余的电能存储和通过P2G、碳捕设备进行利用;12:00—14:00和19:00—20:00时段,用电处于高峰期,此时段分时电价最高。CHP机组的出力增加,与DG、ES存储的电量、RIES3电能交互及电网购电协同工作,以满足用电平衡。该综合调度策略有效地平衡了电能需求和不同电源的利用,降低了碳排放,减小了系统运行成本。其他RIES的内部电能优化规律与此相同。

##### 3.1.3 收益和成本分析

表1 多主体综合能源系统联盟收益分配结果

Table 1 Income distribution results of multi-agent integrated energy system alliance

| 微网编号  | 联盟前成本  | 联盟后成本 | 按贡献度分配成本 |
|-------|--------|-------|----------|
| RIES1 | 24215  | 18568 | 20359    |
| RIES2 | 27560  | 16531 | 16770    |
| RIES3 | 51864  | 47246 | 45216    |
| 总     | 103639 | 82345 | 82345    |

由表1可知,联盟电能共享运算结束后,RIES1的运行成本由24215元降低到18568元,RIES2的运行成本由27560元降低到16531元,RIES3的运行成本由51864元上涨到47246元,各个RIES虽然尽皆获利,但是依旧存在分配不均的问题。因此,将3个RIES联盟收益再分配,首先将电能共享结果交互信息带入非对称能量映射贡献度函数中求取得到RIES1、2、3的贡献度占比;继而,按各主体的贡献度比例分发到各RIES,实现利益再分配。最终,RIES1的运行成本由24215元降低到20359元,RIES2的运行成本由27560元降低到16770元,RIES3的运行成本由51864元降低到45216元,说明各个RIES按劳所得,证实了分时非对称利益再分配的必要性更优性。

### 3.2 碳排放情况分析

表2 RIES引入P2G碳排放对比

Table 2 Comparison of P2G carbon emissions introduced by RIES

|     | P2G 消纳<br>CO <sub>2</sub> 量/kg | 实际碳排放<br>量/kg | 碳交易成本/元 | 总运行成本/元 |
|-----|--------------------------------|---------------|---------|---------|
| 改造前 |                                | 41898         | 2717    | 28621   |
| 改造后 | 18870                          | 29436         | 1826    | 27560   |
| 优化量 | /                              | 29.74%        | 32.79%  | 3.71%   |

表2为RIES1引入P2G进行低碳化改造前后对比分析表,没有改造前实际碳排放为41898kg,碳交易成本为2717元,总运行成本为28621元。改造后,引入的P2G可以对CO<sub>2</sub>进行碳捕集和甲烷化处理,消纳18870kg,实际碳排放降为29436kg,相比于改造前优化了29.74%;碳交易成本为1826元,降低了32.79%;系统总运行成本为27560元,降低3.71%。可见对RIES个体进行改造后,碳排放、碳交易成本和总运行成本都有了不同程度的降低。

## 5 结论

本文提出基于主从博弈的多区域综合能源系统电能共享运行优化策略,主要结论如下:

1) 通过引入碳捕集和电转气装置对多区域综合能源系统结构进行改造,降低了微网独立运行时的碳排放、碳交易成本。

2) 通过整合异质能源流并区分不同类型的多负载需求响应,使得用户能在可控范围内实现电力

和热力需求的灵活调度,通过反复调整激励定价机制,显著提升了用户参与度,同时优化了整个系统的经济效益。

3) 多主体的综合能源系统中,推动点对点(P2P)的电力交易模式,相较于独立运行且未参与能源共享的IES,各个IES的运营成本减少,同时极大地促进了可再生能源的大规模消纳和利用率提升。

在以后的研究中,会进一步研究在碳交易背景下的电、热共享双层调度,可进一步促进弃风消纳、进一步促进经济低碳,以最大化限度充分挖掘电热交互的潜力。

## 参考文献

- [1] 熊宇峰,司杨,郑天文等.基于主从博弈的工业园区综合能源系统氢能优化配置[J].电工技术学报,2021,36(03):507-516.
- [2] 刁涵彬,李增强,王继飞等.考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J].电工技术学报,2020,35(21):4532-4543.
- [3] Zhong W, Xie S, Xie K, et al. Cooperative P2P Energy Trading in Active Distribution Networks: An MILP-Based Nash Bargaining Solution[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, PP(99):1-1.
- [4] 盛万兴,吴鸣,李宇,等.分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J].中国电机工程学报,2019,39(08):2175-2186+1.
- [5] 林顺富,刘持涛,李东东,等.考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J].中国电机工程学报,2020,40(05):1409-1421.
- [6] 吴锦锐,楼平,曾敏源,等.基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略[J].电网技术,2022,46(07):2711-2723.
- [7] 耿琪,胡炎,何建宗,等.基于纳什谈判的区域综合能源系统运行优化[J].电力建设,2020,41(01):114-125.
- [8] Wei C, Shen Z, Xiao D, et al. An optimal scheduling strategy for peer-to-peer trading in interconnected microgrids based on RO and Nash bargaining[J]. Applied Energy, 2021, 295(5):117024.
- [9] 林顺富,刘持涛,李东东,等.考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J].中国电机工程学报,2020,40(05):1409-1421.
- [10] 杨楠,黄禹,董邦天,等.基于多主体博弈的电力-天然气综合能源系统联合规划方法研究[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6521-6533.
- [11] 李瑞勇,赵新哲,郑一飞,等.基于纳什谈判考虑能源共享的区域综合能源系统优化配置[J].电力系统保护与控制,2023,51(05):22-32.

收稿日期:2024-05-27.

作者简介:



刘 杰

刘 杰(1973),女,副教授,研究生导师,研究方向为分布式发电与微电网技术等, E-mail: ls\_jhl@163.com;

曾晓科(1999),男,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化, E-mail: 2112370735@qq.com.

(编辑 五号楷体,居右,段前空6pt)

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 混合卷尾猴差分进化算法的光伏电池参数辨识

王湘军, 王东昊, 张旭瑞, 张文硕, 苏勋文

(黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 哈尔滨 150022)

## Parameter identification of photovoltaic cells based on hybrid capuchin differential evolution algorithm

Wang Xiangjun, Wang Donhao, Zhang Wenshuo, Zhang Xurui, Su Xunwen

(School of Electrical &amp; Control Engineering, Heilongjiang University of Science &amp; Technology, Harbin 150022, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the problems of Capuchin search algorithm (CapSA) in photovoltaic cell parameter identification, such as low global search ability, slow convergence speed and easy to fall into local optimum, a hybrid algorithm based on Capuchin search algorithm and differential evolution algorithm (ICapSA-DE) was proposed. In order to verify the effectiveness of the improved algorithm, it was tested by using the data of RTC France photovoltaic module, and compared with several good performance algorithms. The results show that ICapSA-DE is superior to the above comparison algorithms in algorithm convergence speed, identification accuracy and stability.

**KEY WORDS:** Photovoltaic cell; Parameter identification; Levy flight; Capuchin search algorithm; Differential evolution algorithm

**摘要:** 针对卷尾猴搜索算法(CapSA)在光伏电池参数辨识中全局搜索能力低、收敛速度慢、易陷入局部最优等问题,提出了一种基于卷尾猴搜索算法和差分进化算法的混合算法(ICapSA-DE)。为了验证改进算法的有效性,利用 RTC France 光伏组件的数据对其进行测试,通过和几种性能良好的算法进行对比,结果证明了 ICapSA-DE 在算法收敛速度,辨识精度和稳定性上均优于上述对比算法。

**关键词:** 光伏电池; 参数辨识; Levy 飞行; 卷尾猴搜索算法; 差分进化算法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号(小五号 Times New Roman 字体加黑)

## 0 引言

当前随着全球能源需求不断增长,传统化石能源如煤、石油和天然气等的短缺问题日益

凸显。可再生能源因其取之不尽、清洁无污染的特点正逐渐取代化石能源[1]。太阳能作为一种无污染的可再生能源,相较于其他能源具有诸多优势,然而在光伏能源的应用中仍存在许多挑战。通过对光伏组件的参数辨识可得到更为精准的数学模型,来用于对光伏电站的研究以及通过仿真的光伏电站发电数据对现实的光伏电站进行预测和管理。

近年来,为了对光伏电池进行参数辨识,主要采用的识别策略可划分为三类,分别是数值法、解析法和元启发式算法。数值法主要有迭代辨识方法[2]、递阶辨识方法[3]和多新息辨识理论[4]。解析法有最小二乘法、采用 LambertW 函数显式化等方法。通常解析法求解精度不高而数值法求解适应性差且对初值敏感因而这两种方法使用都较少。近年来,元启发式算法因其简单、高效和对目标函数要求不严格被越来越多的研究者应用到了参数辨识中,比如:哈里斯鹰优化算法[5]、蚁狮优化算法[6]、海鸥算法[7]等。然而这些算法在求解光伏组件的参数辨识问题时,出现了收敛速度慢、过早陷入局部最优的问题。特别地,文献[8]提出了一种新算法 CapSA,相比于其他算法,由于 CapSA 本身可以多策略并行运算,并且全局寻优能力强的优点,因而在求解光伏参数辨识这种多参数问题上具有独特的优势。但是, CapSA 在光伏参数辨识的问题上也遭遇了初始种群分布不均、开发和探索能力不平衡、收敛速度慢等问题。

近年来,已经有多位学者对 CapSA 进行改进,并利用改进的 CapSA 算法取得了不错的成果。文献[9]将梯度搜索算法与 CapSA 混合,提出了一种新的算法(HICSA),平衡了 CapSA

的搜索能力,实现了合理的搜索性能,但收敛速度较慢。文献[10]提出了一种结合变色龙群算法的混合卷尾猴搜索算法(HCSA),使整体卷尾猴种群的分布更加多样化,可以有效确定全局最优并避免局部最优,但该算法在处理高维问题上性能欠佳。

本文提出了一种基于卷尾猴搜索算法和差分进化算法的混合算法(ICapSA-DE)。首先,引入精英混沌反向学习策略,增加了种群的多样性;其次,增加差分更新机制和Levy飞行策略,借助Levy飞行的随机性探索和差分更新机制可以跳出局部最优并极大加快了算法的收敛速度;最后,融入差分进化算法提高了算法的收敛精度和收敛稳定性。

## 1 光伏电池数学模型

近年来人们提出了三种光伏参数模型来描述光伏的输出特性,分别为单二极管模型<sup>[11]</sup>、双二极管模型<sup>[12]</sup>和三二极管模型<sup>[13]</sup>。其中单二极管模型因其结构简单、计算量少而被广泛使用;双二极管模型则考虑了在较低的温度或辐照度偏差带来的误差;三二极管模型则考虑了泄漏电流对模型参数的影响<sup>[14]</sup>。本文主要使用光伏电池单二极管模型作为辨识对象。

### 1.1 单二极管模型

光伏电池的单二极管模型等效电路如图1所示,其数学表达式如式(1)所示。

$$I_c = I_{ph} - I_{sd} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_c + I_c R_s)}{nKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_c + I_c R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式(1)中,  $I_c$  为输出电流;  $I_{ph}$  为光生电流;  $I_{sd}$  为二极管反向饱和电流;  $q$  为电子电荷量;  $V_c$  为输出电压;  $R_s$  为串联电阻;  $n$  为二极管理想因子;  $T$  为热力学温度;  $K$  为玻尔兹曼常数;  $R_{sh}$  为并联电阻。

### 1.2 单二极管光伏组件模型

将多个单二极管光伏组件经过串并联可以得到单二极管光伏组件模型,如图2所示。光伏电池的光伏组件单二极管模型的数学表达式如式(2)所示。

$$I_c / N_p = I_{ph} - I_{sd} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_c / N_s + R_s I_c / N_p)}{nKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_c / N_s + R_s I_c / N_p}{R_{sh}} \quad (2)$$

式(2)中,  $N_p$  为并联电阻数;  $N_s$  为串联电阻数。其中有5个待辨识的参数:  $I_{ph}$ 、 $I_{sd}$ 、 $R_s$ 、 $n$ 、 $R_{sh}$ 。

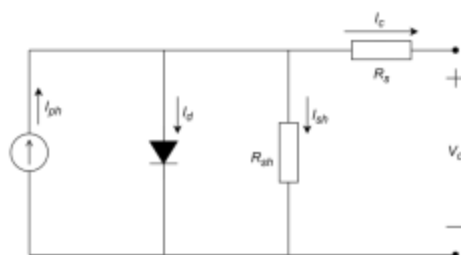


图1 单二极管模型等效电路

Fig.1 Equivalent circuit for the single diode model

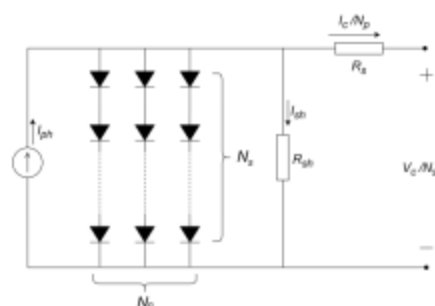


图2 光伏组件单二极管模型

Fig.2 Single diode model of PV module

### 1.3 目标函数

由式(2)可知通过给定已知参数可计算出输出电流  $I_c$ , 通过实际测量电流与计算电流的差值得到误差函数  $f(V, I, x)$ , 误差函数公式如式(3)所示。本文使用均方根误差(RMSE)作为评价指标。

均方根误差公式如式(4)所示:

$$f(V, I, x) = I_{ph} - I_{sd} \left\{ \exp \left[ \frac{q(V_c / N_s + R_s I_c / N_p)}{nKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_c / N_s + R_s I_c / N_p}{R_{sh}} - I_c / N_p \quad (3)$$

式(3)中,  $V$  为实际测量电压;  $I$  为实际测量电流;  $x$  为待辨识的5个参数。

$$RMSE(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(V, I, x)^2} \quad (4)$$

式(4)中,  $N$  为数据测量次数。

通过式(3),(4)可知, 当参数辨识的结果越精确, 通过等效模型输出的电流越靠近测试电



流,那么均方根误差的值就越小,则参数辨识结果越精确。

## 2 混合卷尾猴差分进化算法

### 2.1 卷尾猴搜索算法

CapSA 是一种 2021 年提出的模拟巴西及南美洲地区的卷尾猴群体的觅食行为的新元启发式算法<sup>[9]</sup>。卷尾猴在搜索食物时,会表现出树上跳跃、树下跳跃、摇摆运动、攀爬运动的行为。

#### 2.1.1 初始化种群

CapSA 算法初始在搜索范围内随机生成种群,公式如式(5)所示:

$$x_{i,j} = ub_j + r \times (ub_j - lb_j) \quad (5)$$

式(5)中, $x_{i,j}$ 为第  $i$  只卷尾猴在  $j$  维的位置; $ub_j$ 为卷尾猴搜索范围的上界; $lb_j$ 为卷尾猴搜索范围的下界; $r$ 为 0 到 1 之间的随机数。

#### 2.1.2 生命周期

卷尾猴生命周期函数 $\tau$ ,以在全局和局部搜索过程中实现探索和开采之间的平衡,更新公式如式(6)所示:

$$\tau = \beta_0 e^{-\beta_1 \left(\frac{k}{K}\right)^{\beta_2}} \quad (6)$$

式(6)中, $k$ 为算法当前迭代次数; $K$ 为最大迭代次数; $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 分别为生命周期参数,值分别为 2、21、2。

#### 2.1.3 速度更新

卷尾猴速度更新公式如式(7)所示:

$$V_{i,j} = \rho V_{i,j} + \tau a_1 (x_{i,j}^{best} - x_{i,j}) + \tau a_2 (F_j - x_{i,j}) \quad (7)$$

式(7)中, $V_{i,j}$ 为第  $i$  只卷尾猴在  $j$  维的速度; $\rho$ 为惯性系数,值为 0.7; $F_j$ 为全局最优; $x_{i,j}^{best}$ 为历史最优; $a_1$ 、 $a_2$ 为加速因子,一般都取值 1。

#### 2.1.4 树上跳跃

$\alpha$ 卷尾猴可以从一棵树跳到另一棵树上,此时,卷尾猴位置如式(8)所示:

$$x_{i,j} = F_j + \frac{P_{bf} V_{i,j}^2 \sin 2\theta}{g}, i < \frac{n}{2}; 0.1 < \varepsilon \leq 0.2 \quad (8)$$

式(8)中, $\theta$ 为跳跃角度, $\theta = 1.5 * r$ , $r$ 是 0 到 1 之间的随机数; $P_{bf}$ 为平衡概率; $g$ 为重力加速度,值为 9.81; $\varepsilon$ 为 0 到 1 之间的随机数。

#### 2.1.5 地上跳跃

$\alpha$ 卷尾猴也会在地上行走寻找食物,其位置更新公式如式(9)和式(10)所示:

$$x_{i,j} = F_j + \frac{P_{bf} V_{i,j}^2 \sin 2\theta}{g}, i < \frac{n}{2}; 0.2 < \varepsilon \leq 0.3 \quad (9)$$

$$x_{i,j} = x_{i,j} + V_{i,j}, i < \frac{n}{2}; 0.3 < \varepsilon \leq 0.5 \quad (10)$$

式(9)中, $P_{bf}$ 为卷尾猴地面行走时的弹性概率,值为 11。

#### 2.1.6 随机迁移

某些情况下卷尾猴会分裂成几类更小的群体来寻找食物。更新公式如式(11)所示:

$$x_{i,j} = \tau \times [lb_j + \varepsilon \times (ub_j - lb_j)], i < \frac{n}{2}; \varepsilon \leq 0.1 \quad (11)$$

#### 2.1.7 摇摆运动

一些 $\alpha$ 卷尾猴会在树枝的尖端进行局部搜索来寻找食物,更新公式如式(12)所示:

$$x_{i,j} = F_j + \tau P_{bf} \times \sin 2\theta, i < \frac{n}{2}; 0.5 < \varepsilon \leq 0.75 \quad (12)$$

#### 2.1.8 攀爬运动

一些卷尾猴会重复上下树来搜索食物,其更新公式如式(13)所示:

$$x_{i,j} = F_j + \tau P_{bf} (V_{i,j} - V_{i,j-1}), i < \frac{n}{2}; 0.75 < \varepsilon \leq 1 \quad (13)$$

式(13)中, $V_{i,j-1}$ 为第  $i$  只卷尾猴在  $j-1$  维的速度。

#### 2.1.9 跟随者位置更新

跟随者位置更新公式如式(14)所示:

$$x_{i,j} = \frac{1}{2} (x_{i,j} + x_{i-1,j}), \frac{n}{2} \leq i \leq n \quad (14)$$

式(14)中, $x_{i-1,j}$ 为上一个卷尾猴的第  $j$  维位置。

## 2.2 差分进化算法

差分进化算法是 Price 在 1995 年提出的一种元启发式算法<sup>[17]</sup>。它的本质是模拟自然界优胜劣汰适者生存的丛林法则,主要分为差分变异、交叉、选择三个步骤,具有较好的鲁棒性和全局寻优能力。

#### 2.2.1 种群初始化

DE 算法初始在搜索范围内随机生成种群,公式如式(15)所示:

$$x_{i,j} = ub_j + r \times (ub_j - lb_j) \quad (15)$$

式(15)中, $x_{i,j}$ 为第  $i$  个个体  $j$  维的位置; $ub_j$ 为算法搜索范围的上界; $lb_j$ 为算法搜索范围的下界; $r$ 为 0 到 1 之间的随机数。

#### 2.2.2 差分变异操作

DE 算法的常见五种变异策略如式(16)所示:

$$\begin{aligned}
 v_{i,j} &= x_{r_1,j} + F \times (x_{r_2,j} - x_{r_3,j}) \\
 v_{i,j} &= x_{best,j} + F \times (x_{r_1,j} - x_{r_2,j}) \\
 v_{i,j} &= x_{r_1,j} + F \times (x_{r_2,j} - x_{r_3,j}) + F \times (x_{r_4,j} - x_{r_5,j}) \quad (16) \\
 v_{i,j} &= x_{best,j} + F \times (x_{r_1,j} - x_{r_2,j}) + F \times (x_{r_3,j} - x_{r_4,j}) \\
 v_{i,j} &= x_{i,j} + F \times (x_{best,j} - x_{i,j}) + F \times (x_{r_1,j} - x_{r_2,j})
 \end{aligned}$$

式(16)中,  $v_{i,j}$  为 DE 算法新产生的种群个体;  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$  为 1 到种群总数间的随机的 5 个互异的整数;  $F$  为缩放因子, 值为 0 到 1 之间的随机数。

差分变异操作后, DE 算法会判断种群的新个体是否在搜索范围内, 如果不在搜索范围内则需要进行边界处理, 边界处理公式如式(17)所示:

$$v_{i,j} = \begin{cases} ub_j, & v_{i,j} > ub_j \\ lb_j, & v_{i,j} < lb_j \end{cases} \quad (17)$$

### 2.2.3 交叉操作

DE 算法对种群个体进行交叉操作如式(18)所示:

$$v_{i,j} = \begin{cases} v_{i,j}, & \text{if } rand \leq CR \text{ or } j = j_{rand} \\ x_{i,j}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中,  $CR$  为交叉概率;  $j_{rand}$  为 1 到  $j$  中随机一个整数。

### 2.2.4 选择操作

将新产生的个体和原个体适应度作比较, 若适应度更小则取代之, 反之, 不进行操作。选择操作的公式如式(19)所示:

$$x_{i,j} = \begin{cases} u_{i,j}, & f_{u_{i,j}} \leq f_{x_{i,j}} \\ x_{i,j}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中,  $f_{u_{i,j}}$  为第  $i$  个新个体的适应度值;  $f_{x_{i,j}}$  为原第  $i$  个个体的适应度值。

## 2.3 混合卷尾猴差分进化算法

### 2.3.1 精英混沌反向学习策略

针对 CapSA 在光伏参数辨识的收敛速度过慢和过早陷入局部最优问题, 使用精英混沌反向学习策略增加初始种群的多样化。精英混沌反向学习策略分为两部分, 分别是使用 logistic 混沌映射初始化种群和采用精英反向学习策略对初始化种群进行处理。

混沌映射具有随机性, 遍历性, 非线性等特点, 使用混沌映射进行种群初始化可以增加算法的随机性和多样性, 混沌映射初始化公式

如式(20)所示:

$$\begin{aligned}
 X_{i+1} &= \alpha \times X_i \times (1 - X_i) \\
 x_{i,j} &= ub_j + X_{i+1} \times (ub_j - lb_j) \quad (20)
 \end{aligned}$$

精英反向学习是通过当前问题的可行解构造反向解, 在可行解和反向解中选取最优解作为下一代的个体, 反向个体生成公式如式(21)所示:

$$\begin{aligned}
 x_{i,j}^* &= K \times (\alpha_j + \beta_j) - x_{i,j} \\
 \alpha_j &= \min(x_{i,j}) \\
 \beta_j &= \max(x_{i,j}) \quad (21)
 \end{aligned}$$

式(21)中,  $x_{i,j}^*$  为反向个体;  $\alpha_j$  为种群中值最小个体;  $\beta_j$  为种群中值最大个体。

### 2.3.2 差分更新机制和 Levy 飞行策略

CapSA 中跟随者的位置更新极大程度上依赖于各个  $\alpha$  领导者的位置更新。为了改善跟随者的位置更新策略, 引入 Levy 飞行策略和差分更新机制。

Levy 飞行策略的公式如式(22)所示:

$$\begin{aligned}
 \delta_s &= \left[ \frac{\Gamma(1+\alpha) \times \sin \frac{\pi\alpha}{2}}{\Gamma\left(\frac{1+\alpha}{2}\right) \times \alpha \times 2^{\frac{\alpha-1}{2}}} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \\
 \delta_s &= 1 \\
 r_1 &= \text{normrnd}(0, \delta_s) \\
 r_2 &= \text{normrnd}(0, \delta_s) \\
 \text{levy}(r_1, r_2, \alpha) &= \frac{r_1}{|r_2|^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (22)
 \end{aligned}$$

式(22)中,  $\text{normrnd}$  为产生正态随机数的函数;  $\alpha$  为值为 1.5。

差分机制通过变异、交叉和选择的操作来进行更新, 具有更新速度快、收敛稳定性高的优点, 将差分更新机制应用于跟随者的位置更新公式中可以有效地提高 CapSA 的收敛速度。原跟随者的位置更新公式(14)现更改为式(23)如下:

$$\begin{aligned}
 x_{i,j} &= F_j + 2 \times (x_{r_3,j} - x_{i,j}) \times \text{levy}(r_1, r_2, \alpha) + \\
 & 2 \times (x_{i,j} - x_{r_4,j}) \times \text{levy}(r_1, r_2, \alpha) \quad (23) \\
 x_{i,j} &= \frac{1}{2} (x_{i,j} + x_{r-1,j}), \frac{n}{2} \leq i \leq n
 \end{aligned}$$

式(23)中,  $x_{r_3,j}$ 、 $x_{r_4,j}$  为卷尾猴种群中的随机的两个个体;

### 2.3.3 差分进化算法与卷尾猴算法的结合

由于卷尾猴算法在寻优过程中对种群数量

有较大的依赖,将差分进化算法融入可以有效改善卷尾猴算法种群数量较低时的性能。在卷尾猴算法对种群进行迭代更新后,使用差分进化算法对其作进一步的处理。

#### 2.3.4 混合卷尾猴差分进化算法流程图

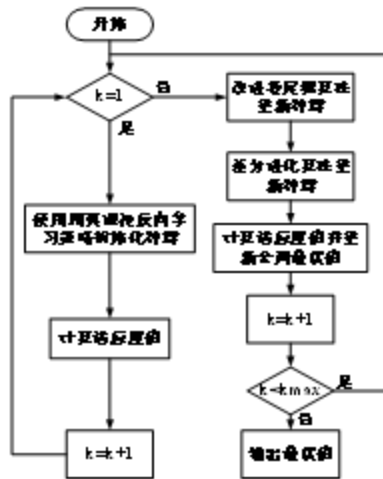


图3 混合卷尾猴差分进化算法流程图

Figure 3 Flowchart of the hybrid capuchi differential evolution algorithm

混合卷尾猴差分进化算法的流程图如图3所示。

### 3 光伏组件参数辨识

本文将 ICapSA-DE 应用于光伏组件参数辨识,通过算法辨识得到的参数计算出的电流

值与实际值的均方根差值作为误差函数,其公式见第一章的式(4)。本文辨识所用的光伏电池模型为单二极管模型,需要辨识的参数为  $I_{ph}$ 、 $I_{sd}$ 、 $R_s$ 、 $n$ 、 $R_{sh}$ 。

为验证 ICapSA-DE 在光伏参数辨识中的可靠性,选取其他 4 种性能良好的智能优化算法(原始卷尾猴搜索算法 CapSA<sup>[8]</sup>、差分进化算法 DE<sup>[17]</sup>、改进 JAYA 算法 IJAYA<sup>[18]</sup>、性能导向 JAYA 算法 PGJAYA<sup>[16]</sup>)进行对比。为消除算法辨识过程中的偶然误差,将上述所有算法的初始种群数设为 20,迭代次数设为 2000,每种算法独立运行 30 次。

本文选用参考文献[15]中型号 RTC France 的光伏组件中测得的数据进行参数辨识,这组数据是在辐照度为  $1000\text{W/m}^2$ 、温度为  $33^\circ\text{C}$  的情况下测得的。

光伏组件测得数据的不同算法的辨识结果如表 1 所示。从表 1 中结果可知,ICapSA-DE 和 DE 在 30 次迭代中误差函数最优值都是  $9.8602188\text{e-}04$ ,远远小于其他算法的误差函数最优值,然而 ICapSA-DE30 次迭代最差值与最优值相同,这代表 ICapSA-DE 迭代了 2000 次就达到了稳定。ICapSA-DE 辨识结果的标准差为  $1.8853\text{e-}16$  远小于其他算法,这说明了 ICapSA-DE 在光伏参数辨识上的稳定性。

表 1 RTC France 光伏组件不同算法的 RMSE 统计结果

Table 1 Statistical results of RMSE of different algorithms for PV modules in RTC France

| 算法        | 最优值           | 最差值           | 均值            | 标准差        |
|-----------|---------------|---------------|---------------|------------|
| ICapSA-DE | 9.8602188e-04 | 9.8602188e-04 | 9.8602188e-04 | 1.8853e-16 |
| CapSA     | 4.5549856e-03 | 2.2286140e-01 | 3.7026665e-02 | 6.4441e-02 |
| DE        | 9.8602188e-04 | 2.0961261e-01 | 1.3896330e-02 | 3.7441e-02 |
| IJAYA     | 1.7349465e-03 | 3.0956110e-03 | 2.3846250e-03 | 2.8692e-04 |
| PGJAYA    | 9.8605399e-04 | 1.2898199e-02 | 2.1878539e-03 | 3.6312e-03 |

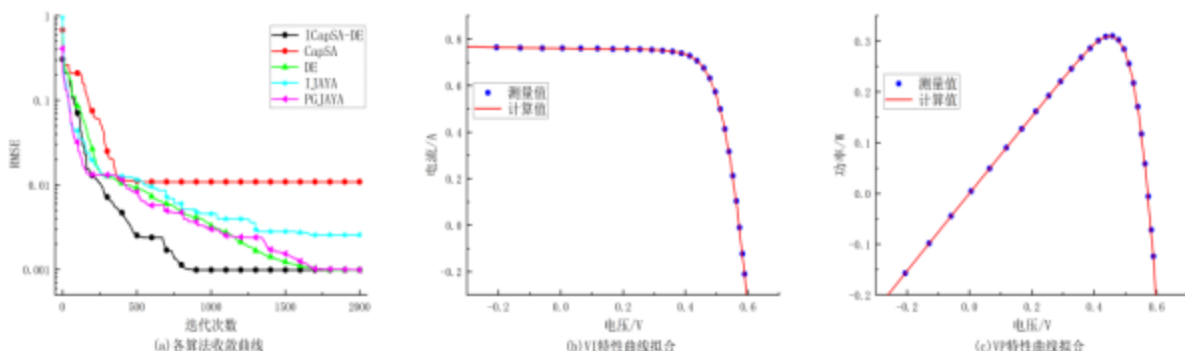


图4 RTC France 光伏组件不同算法迭代曲线及 I-V 曲线拟合图

Fig.4 RTC France PV module iteration curves of different algorithms and I-V curve fitting diagram

图4是 RTC France 光伏组件实验数据的不同算法辨识的迭代收敛曲线以及使用 ICapSA-DE 辨识得到的数据代入光伏公式计算出的模拟值与原测量现实数据的拟合曲线。从算法迭代图可以看出 ICapSA-DE 的收敛速度是最快的,在辨识中迭代了 800 次左右就达到了辨识最优值,从光伏组件 V-I 特性拟合图和 V-P 特性拟合图可知通过算法辨识得到的计算值与实际测量值基本一致。综上可知,在对光伏组件数据进行参数辨识时,ICapSA-DE 在算法收敛速度,辨识精度和稳定性上均优于其他算法。

#### 4 结论

针对卷尾猴搜索算法在光伏电池参数辨识中出现的收敛速度慢、辨识精度低和稳定性差的问题,本文提出了一种基于卷尾猴搜索算法和差分进化算法的混合算法(ICapSA-DE)。引入精英混沌反向学习策略,通过使用混沌映射和产生反向种群增加了种群的多样性;增加差分更新机制和 Levy 飞行策略,有效的避免算法陷入局部最优并极大加快了算法的收敛速度;融入差分进化算法平衡算法的开发和寻优能力提高算法的收敛精度和收敛稳定性。为验证算法在光伏参数辨识求解的有效性,将 ICapSA-DE 应用到 RTC France 光伏组件的参数辨识中,并与几种在光伏参数辨识上表现优秀的算法作对比,结果表明 ICapSA-DE 在收敛速度、辨识精度和稳定性方面更加优越。

#### 参考文献:

- [1] 刘彦辉. 含光伏发电的电力系统功率预测和动态环境经济调度研究[D]. 东北农业大学, 2022.
- [2] Wan L, Liu X, Ding F, et al. Decomposition least-squares-based iterative identification algorithms for multivariable equation-error autoregressive moving average systems[J]. *Mathematics*, 2019, 7(7): 609.
- [3] 葛政伟. 多元方程误差系统的递阶迭代辨识方法[D]. 江南大学, 2020.
- [4] Fan S, Xu L, Ding F, et al. Correlation analysis-based stochastic gradient and least squares identification methods for errors-in-variables systems using the multi-innovation[J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2021, 19: 289-300.
- [5] Chen H, Jiao S, Wang M, et al. Parameters identification of photovoltaic cells and modules using diversification-enriched Harris hawks optimization with chaotic drifts[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 244: 118778.
- [6] 吴志强, 谢崇圣, 刘重阳等. 基于混沌搜索的改进狮群算法及其在光伏电池参数辨识中的应用[J]. *计量学报*, 2021, 42(04): 415-423.
- [7] 盛四清, 关皓闻, 曾业涛等. 基于混沌海狮优化算法的含光伏发电系统负荷模型参数辨识[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(07): 64-72.
- [8] Braik M, Sheta A, Al-Hiary H. A novel meta-heuristic search algorithm for solving optimization problems: capuchin search algorithm[J]. *Neural computing and applications*, 2021, 33(7): 2515-2547.
- [9] Braik M, Awadallah M A, Al-Betar M A, et al. A hybrid capuchin search algorithm with gradient search algorithm for economic dispatch problem[J]. *Soft Computing*, 2023, 27(22): 16809-16841.
- [10] Qtaish A, Braik M, Albashish D, et al. Optimization of K-means clustering method using hybrid capuchin search algorithm[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2023: 1-60.
- [11] Cárdenas-Bravo C, Barraza R, Sánchez-Squella A, et al. Estimation of single-diode photovoltaic model using the differential evolution algorithm with adaptive boundaries[J]. *Energies*, 2021, 14(13): 3925.
- [12] Nicaire N F, Steve P N, Salome N E, et al. Parameter estimation of the photovoltaic system using bald eagle search (BES) algorithm[J]. *International Journal of Photoenergy*, 2021, 2021: 1-20.
- [13] Lei W, He Q, Yang L, et al. Solar photovoltaic cell parameter identification based on improved honey badger algorithm[J]. *Sustainability*, 2022, 14(14): 8897.
- [14] 韩小明. 基于 LFCOOT 算法的光伏电池参数辨识及光伏组件故障诊断[D]. 天津理工大学, 2023.
- [15] Easwarakhanthan T, Botin J, Bouhouch I, et al. Nonlinear minimization algorithm for determining the solar cell parameters with microcomputers[J]. *International journal of solar energy*, 1986, 4(1): 1-12.
- [16] Yu K, Qu B, Yue C, et al. A performance-guided JAYA algorithm for parameters identification of photovoltaic cell and module[J]. *Applied energy*, 2019, 237: 241-257.
- [17] Storn R, Price K. Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. *Journal of global optimization*, 1997, 11: 341-359.
- [18] Yu K, Liang J J, Qu B Y, et al. Parameters identification of photovoltaic models using an improved JAYA optimization algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 150: 742-753.

收稿日期: 2024-07-29.

作者简介:

王湘军(2000). 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏电池参数辨识. E-mail: 2423673891@qq.com;

王东昊(1997). 男, 硕士研究生, 研究方向为风核打捆暂态稳定性分析. E-mail: w785553839@163.com;

张旭瑞(1998). 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏组件参数辨识. E-mail: 1067678196@qq.com;

张文硕(1999). 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网容量配置和经济运行. E-mail: ss15948531383@163.com;

苏勋文(1976). 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为风电场等值建模、风电场次同步振荡等. E-mail: suxunwen@163.com.



王湘军

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 燃料电池对于综合能源系统平抑风电波动的影响研究

兴仁捷<sup>1</sup>, 刘莉<sup>1</sup>

(1. 电力学院 沈阳工程学院, 沈阳 110136)

E-mail: xrj166@outlook.com

## Research on the impact of fuel cells on the suppression of wind power fluctuations in the integrated energy system

Renjie Xing<sup>1</sup>, Li Liu<sup>1</sup>

(1. Electric Power College, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136)

E-mail: xrj166@outlook.com

**ABSTRACT:** In view of the instability of the power system caused by the fluctuation and intermittency of wind power output, this paper constructs a comprehensive energy system model including wind power, CHP, heat pump, electric boiler, electrolyzer and fuel cell, and uses MATLAB software to simulate and use CPLEX solver to study the effect of fuel cells with different capacities on suppressing wind power fluctuations, and the results show that 20MW fuel cells can effectively stabilize the uncertainty of wind power output compared with 10MW and 15MW. It can ensure that the equipment operates within reasonable constraints, which provides a useful research value for promoting better consumption of renewable energy and energy transition. In view of the curtailment problem after the introduction of large-scale wind power, the paper built a comprehensive energy system model including wind power, CHP, heat pump, electrolyzer and fuel cell, and studied the effect of fuel cells with different capacities on suppressing wind power fluctuations through MATLAB modeling and CPLEX simulation, and the results show that the 20MW fuel cell can effectively reduce the uncertainty of wind power output compared with 10MW and 15MW, and ensure that the equipment operates within a reasonable constraint range. It provides useful research ideas for promoting better consumption of renewable energy and energy transition.

**KEY WORDS:** Fuel cells, integrated energy systems, wind power fluctuations, wind power consumption

**摘要:** 针对风电出力的波动性和间歇性对电力系统带来的不稳定性, 本文构建了一个包含风电、CHP、热泵、电锅炉、电解槽和燃料电池的综合能源系统模型, 通过使用 MATLAB 软件仿真, 并使用 CPLEX 求解器求解, 研究了不

同容量的燃料电池对抑制风电波动的效果, 结果表明 20MW 的燃料电池相比于 10MW 和 15MW 更能有效平抑风电出力的不确定性, 可以确保各设备在合理约束范围内运行, 为促进可再生能源更好消纳和能源转型提供了有益的研究价值。

**关键词:** 燃料电池, 综合能源系统, 风电波动, 风电消纳

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号

## 0 引言

随着全球面临能源枯竭危机, 新能源发展迫在眉睫, 以风电为代表的新型清洁能源正逐步得到发展。然而, 风电因其不确定性、随机性、波动性的特点, 在大规模风电出力并网中严重影响电网的正常运转, 给电网的电能品质和稳定性带来严峻的挑战<sup>[1-2]</sup>。利用储能技术充/放电能够灵活调节功率不平衡的特点, 平滑光伏出力波动, 是有效降低光伏功率波动对电网的冲击、提高电网稳定性的重要手段<sup>[3-4]</sup>。

氢气是一种具有广阔应用前景的新型能源。氢气具有能量密度高、对环境无污染等优点, 是一种极具潜力的清洁新能源。将风力发电和氢能结合在一起, 将风力发电系统中不适合接入电网的风能转化为氢能, 不仅能够降低弃风量, 还能够提升风能利用率, 提升并网风力发电系统的供电质量。所生成的氢也可以由燃料电池/来提供电力供应到电力网。

文献<sup>[5]</sup>将氢储能装置纳入到该地区的综合能源系统中, 并根据其能量流动特征和冷、热负荷特点, 进行冷热电联合发电方式的研究。仿真结果表



明氢储能装置的加入使系统经济成本有所减少。文献<sup>[6]</sup>将风电与由电解槽、储氢罐和燃料电池组构成的氢储能装置耦合供电,通过对比发现氢储能装置使得耦合时的收益高于系统中仅有风力发电的情况,而当电解槽装置容量继续增加时,风电能够完全被消纳。文献<sup>[7]</sup>构建了含电解槽、燃料电池装置的综合能源系统运行模型,结果表明,该系统减少了大量的弃风,经济运行成本优于原始方案。文献<sup>[8]</sup>针对孤岛型直流微网,以发电成本最低和储能状态均衡为基础,提出了一种新型的电-气混合储能技术,该技术可大幅减少系统的经济运行成本。然而,大多数研究只考虑了氢储能加入后对系统中风电消纳率提升效果,而并没有进一步考虑其容量的大小对弃风效果的影响程度。

综上所述,本文通过实现对综合能源系统的仿真优化,加入燃料电池和电转氢等氢储设备,证实燃料电池对于平抑风电波动的影响,并分析不同容量的燃料电池在平抑风电波动的效果好坏,最后得出结论。

## 1 综合能源系统设备的数学模型

### 1.1 综合能源系统结构

综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是一个多能互补、高效利用各种能源的系统。它通过集成风电、太阳能光伏、燃气轮机、热泵、电转氢技术、燃料电池、储热、储能等多种能源技术,实现电力、热力、气体等多种能量形式的互联和优化配置,提高能源利用效率,减少环境污染。其主要特点为,高效,通过能源互联和集成,优化能源流向和转换流程,减少能量损失;环保,促进清洁能源的利用,降低碳排放,改善环境质量;经济性,提高能源利用效率,降低能源成本,提升经济效益;稳定性和可靠性,多元能源互补,能量存储和多渠道供能提高了系统的韧性和可靠性。

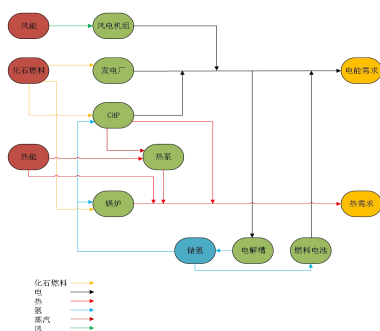


图1 综合能源系统结构图

Fig.1 Structural diagram of the integrated energy system

综合能源系统通过高度集成和优化这些技术组件,实现能源的高效利用和管理。风电产生的电力可用于驱动电转氢设备生产氢气,氢气又可以在燃料电池中释放能量,供电或供热。热泵和 CHP 设施可根据系统需求提供热能和电能,增加系统的灵活性和可靠性。储热和储能装置帮助平衡供需,提高系统对可再生能源波动性的适应性。

综合来看,使用燃料电池来平抑风电波动是一种可行但需要慎重考虑的解决方案。在实际应用中,需要综合考虑技术、经济、环境等多方面因素,确保系统的稳定性、可靠性和经济性。

## 2 系统目标函数及约束条件

### 2.1 目标函数

常规综合能源系统优化调度的目标函数通常为经济性,但本文论述的是电转氢设备在综合能源系统中平抑风光波动的作用分析,因此目标函数设置为弃风量和风电光滑功率差。

$$\min f = f_1 + f_2 \quad (1)$$

风电功率的最大变化量是指在特定时间段内,风电功率的最大值和最小值之间的差值。这一差值反映了该时间段内风电功率的波动范围。在单位时间内,功率变化的幅度越大,对整个系统运行的干扰和影响也就越明显。

#### 2.1.1 弃风量

$$P_{wind,t}^r \leq P_{wind,t}^{plan} \quad (2)$$

式中,  $P_{wind,t}^r$  为  $t$  时刻风电的预测发电量,  $P_{wind,t}^{plan}$  为  $t$  时刻风电的实际发电量。

两者之差为  $t$  时刻风电的弃风量:

$$f_1 = \sum_{t=1}^T P_{wind,t}^{plan} - P_{wind,t}^r \quad (3)$$

式中,  $f_1$  为系统总的弃风量。

#### 2.1.2 风电光滑功率差

这里提出一个新的指标,为风电光滑功率差值,用以衡量风电出力的光滑度。

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{t=1}^{L-1} (P_{flu,t} - P_{flu,t-1})^2} \quad (4)$$



其中  $f_2$  为风电平滑功率差值,  $P_{flu,t-1}$  和  $P_{flu,t}$  分别为  $t-1$  时刻与  $t$  时刻的平滑后的风电出力。

$$\begin{cases} P_{flu,t} = P_{wind,t} + P_{fc,t} \\ P_{flu,t-1} = P_{wind,t-1} + P_{fc,t-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P_{wind,t}$  和  $P_{fc,t}$  分别为  $t$  时刻的风电出力与燃料电池发出的电功率,  $P_{wind,t-1}$  和  $P_{fc,t-1}$  分别为  $t-1$  时刻的风电出力与燃料电池的电功率。

## 2.2 约束条件

本文中的 IES 模型中, 约束条件主要包括电功率平衡约束, 风电出力约束, CHP 热电耦合运行约束, 热泵出力上下限约束, 电锅炉出力上下限约束, 燃料电池出力上下限约束, 电转氢出力上下限约束以及储氢约束。

### 2.2.1 电功率平衡约束

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n P_{chp(t)}^i + \sum_{j=1}^m P_{wind(t)}^{r,j} + P_{fc}(t) &= \sum_{k=1}^x P_{eb(t)}^k + \\ \sum_{h=1}^y P_{hp(t)}^h + P_{el(t)} + P_{grid(t)}^{loss} + L_t^e \end{aligned} \quad (6)$$

其中,  $P_{chp(t)}^i$  表示在  $t$  时刻第  $i$  台 CHP 实际的发电量,  $P_{wind(t)}^{r,j}$  表示在  $t$  时刻第  $j$  台风机实际的发电量,  $P_{fc}(t)$  表示燃料电池的发电量,  $P_{eb(t)}^k$  和  $P_{hp(t)}^h$  分别表示在  $t$  时刻第  $k$  台电锅炉和第  $h$  台和热泵的耗电量,  $P_{el(t)}$  表示电解槽的耗电量,  $P_{grid(t)}^{loss}$  表示  $t$  时刻网损,  $L_t^e$  表示参与需求响应后的电负荷需求。

### 2.2.2 热功率平衡约束

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n Q_{chp(t)}^i + \sum_{k=1}^x Q_{eb(t)}^k + \sum_{h=1}^y Q_{hp(t)}^h + Q_{fc(t)} &= \\ \sum_{g=1}^z Q_{s(t)}^g + Q_{grid(t)}^{loss} + L_t^h \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $Q_{chp(t)}^i$  表示第  $i$  台 CHP 的产热量,  $Q_{eb(t)}^k$  和  $Q_{hp(t)}^h$  分别表示第  $k$  台电锅炉和第  $h$  台热泵的产

热量,  $Q_{fc(t)}$  表示燃料电池的产热量,  $Q_{s(t)}^g$  表示第  $g$  台储热的吸放热量,  $Q_{grid(t)}^{loss}$  表示  $t$  时刻热损,  $L_t^h$  参与需求响应后的热负荷需求。

### 2.2.3 电锅炉约束

电锅炉通过消耗电能来产生热量, 电锅炉是一种将电能转化为热能的热电加热装置。根据转换方式不同, 分为电阻式电锅炉和电极式电锅炉。电锅炉可以安装在电厂侧、用户侧等不同位置。根据电锅炉工作原理, 电锅炉模型为:

$$\begin{cases} Q_{eb\min} \leq Q_{eb(t)} \leq Q_{eb\max} \\ Q_{eb(t)} = \eta_{eb} \times P_{eb(t)} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $Q_{eb\min}$  和  $Q_{eb\max}$  表示了电锅炉热输出的下限和上限,  $Q_{eb(t)}$  表示  $t$  时刻电锅炉的热输出,

$P_{eb(t)}$  表示电锅炉的电功率。  $\eta_{eb}$  为电锅炉的热效率。

### 2.2.4 燃料电池约束

燃料电池组运行过程中, 其总输出功率为各模块输出功率之和:

$$P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N = P_{out} \quad (9)$$

其中,  $P_1 - P_N$  分别为第 1— $N$  块燃料电池输出功率;  $P_{out}$  为燃料电池组所需承担的输出功率。

燃料电池在运行过程中受其容量与爬坡功率的限制, 燃料电池的输出功率约束及其爬坡功率:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{fc}^n(t) \leq P_{fc\max} \\ 0 \leq P_{fcup}^n(t) \\ P_{fcup}^n(t) \leq \min(P_{fc\max}^{up}, P_{fc}^n(t) - P_{fc}^n(t-1)) \\ 0 \leq P_{fcdown}^n(t) \\ P_{fcdown}^n(t) \leq \min(P_{fc\max}^{down}, P_{fc}^n(t) - P_{fc}^n(t-1)) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $P_{fc\max}$  为燃料电池模块最大输出功率;

$P_{fcup}^n$ 、 $P_{fcdown}^n$  分别为  $t$  时段第  $n$  块燃料电池模块

向上、向下爬坡功率； $P_{fc\max}^{up}$ 、 $P_{fc\max}^{down}$  分别为燃料

电池模块向上、向下爬坡功率最大值。

### 2.2.5 风电出力约束

$$P_{wind}(t) \leq P_{wind}^{plan}(t) \quad (11)$$

其中， $P_{wind}(t)$  为  $t$  时刻风电的实际发电量，

$P_{wind}^{plan}(t)$  为  $t$  时刻风电的预测发电量，

### 2.2.6 CHP 热电耦合运行约束

CHP 热电耦合运行时受到电出力和热出力的容量限制及为保证安全运行而设立的最小运行下限限制。此外，当热出力一定时，电出力可在一定范围内变化。

$$\begin{cases} P_{CHP_{min}} \leq P_{CHP}(t) \leq P_{CHP_{max}} \\ Q_{CHP_{min}} \leq Q_{CHP}(t) \leq Q_{CHP_{max}} \\ \max \left( \begin{matrix} C_v \times Q_{chp(t)} + P_{chp(D)} \\ C_m \times Q_{chp(t)} + P_{chp(C)} \end{matrix} \right) \leq P_{chp(t)} \\ P_{chp(t)} \leq (C_v \times Q_{chp(t)} + P_{chp(A)}) \end{cases} \quad (12)$$

其中， $P_{CHP}(t)$  和  $Q_{CHP}(t)$  表示  $t$  时刻 CHP 的

电功率和热功率； $P_{CHP_{min}}$  和  $P_{CHP_{max}}$  表示 CHP 电功

率的下限和上限， $Q_{CHP_{min}}$  和  $Q_{CHP_{max}}$  表示 CHP 热功

率的下限和上限。 $C_v$ 、 $C_m$  为 CHP 的热电耦合参

数， $P_{chp(A)}$ 、 $P_{chp(C)}$  和  $P_{chp(D)}$  分别表示 CHP 运行

工况下 A 点、B 点和 D 点的电功率。

### 2.2.7 热泵约束

由热泵工作原理，性能系数 COP 公式可得：

$$Q_{hp(t)} = COP \times P_{hp(t)} \quad (13)$$

其中， $Q_{hp(t)}$  表示  $t$  时刻热泵的热功率， $P_{hp(t)}$  表

示热泵的电功率。热泵的性能系数  $COP$  定义了它的热功率和电功率之间的比值。需要注意的是， $COP$  的数值高度依赖于工作条件，例如环境温度和热负荷。

热泵的容量约束为

$$Q_{hp\min} \leq Q_{hp(t)} \leq Q_{hp\max} \quad (14)$$

其中， $Q_{hp\min}$  和  $Q_{hp\max}$  表示热泵热输出的下限

和上限。

### 2.2.8 电解槽约束

电解槽是氢储能系统中的电氢转换设备，可将富余电能转化为氢能存储，电氢转换模型为：

$$M_{el}(t) = \eta_{el} P_{el}(t) \quad (15)$$

电解槽在运行过程中，会受到最大容量与最大爬坡功率限制，具体约束为：

$$\begin{cases} 0 \leq P_{el}(t) \leq P_{el\max} \\ 0 \leq P_{elup}(t) \\ P_{elup}(t) \leq \min(P_{el\max}^{up}, P_{el}(t) - P_{el}(t-1)) \\ 0 \leq P_{el\downarrow}(t) \\ P_{el\downarrow}(t) \leq \min(P_{el\max}^{down}, P_{el}(t) - P_{el}(t-1)) \end{cases} \quad (16)$$

其中， $M_{el}(t)$  为  $t$  时段电解槽的产氢功率；

$\eta_{el}$  为电解槽效率； $P_{el\max}$  为电解槽最大容量；

$P_{elup}(t)$ 、 $P_{el\downarrow}(t)$  分别为  $t$  时段电解槽向上、向

下爬坡功率； $P_{el\max}^{up}$ 、 $P_{el\max}^{down}$  分别为电解槽向上、向

下爬坡功率最大值。

### 2.2.9 储氢约束

储氢罐为氢气存储设备，两端分别连接电解槽与燃料电池，任一时刻储氢罐内能量为上时刻储氢罐内能量与这一时段内储氢罐与电解槽、燃料电池组交互结果之和，具体模型为：

$$\begin{cases} V_{Hst}(t) = V_{Hst}(t-1) + \left( \eta_s^{Hst} M_{el}(t) - \frac{M_{fc}(t)}{\eta_r^{Hst}} \right) \Delta t \\ V_{Hst\min} \leq V_{Hst}(t) \leq V_{Hst\max} \end{cases} \quad (17)$$

除此之外，储氢罐与正常高压罐体类似，均存在最大、最小容量约束。其中， $V_{Hst}(t)$  为  $t$  时段

储氢罐的储氢量； $V_{Hst\min}$ 、 $V_{Hst\max}$  分别为储氢罐储

氢量的最小值和最大值;  $\eta_s^{Hst}$ 、 $\eta_r^{Hst}$  分别为储氢罐的储氢和放氢效率。

### 3 仿真分析

本文中的数据来源为辽宁某市的电热负荷以及风电数据, 本文建立了综合能源系统的数学模型, 在原本的综合能源系统的基础上加入了电转氢设备, 并通过 matlab 软件使用 yalmip 工具包和 cplex 求解器对系统优化模型进行仿真求解。

#### 3.1 燃料电池对于综合能源系统调度结果影响分析

##### 3.1.1 风电曲线平滑优化结果分析

如下图所示, 分别展示了优化前和优化后的风电出力曲线, 总体来说风电出力曲线有着明显变得平缓, 从 (01:00-08:00) 这段时间来看, 电力需求相对较低, 而风电资源较为丰富。此时, 电转氢系统可以将多余的风电功率转化为氢能储存, 为后续高峰时段提供补充电力。而在 (08:00-11:00) 这段高峰时段, 电负荷需求骤增, 而此时风电出力相对较低。这时, 燃料电池系统就可以将之前储存的氢能转换为电力, 补充电网缺口, 起到“填谷”的作用, 协调电力供给与需求的平衡。在 (18:00-20:00) 这段时间, 电力需求再次下降, 而风电资源却相对丰富。这时, 燃料电池和电转氢设备又开始发挥作用, 通过“削峰填谷”的方式, 进一步优化风电出力曲线, 减小曲线的波动幅度。

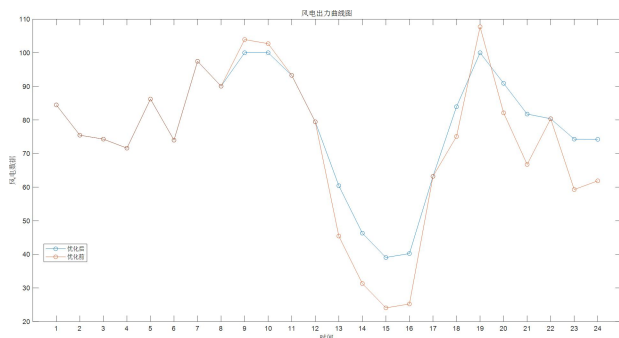


图2 优化后风电出力曲线对比图

Fig.2 Comparison of the optimized wind power output curve

##### 3.1.2 日内出力调度优化结果分析

下图分别为优化后日内的系各设备的电平衡和热平衡的出力图。

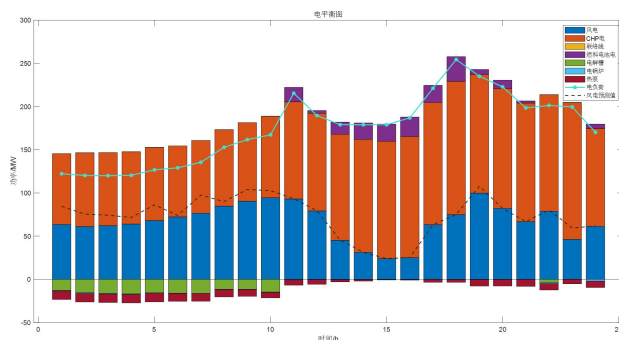


图3 各设备电平衡出力图

Fig.3 Electrical balance output diagram of each device

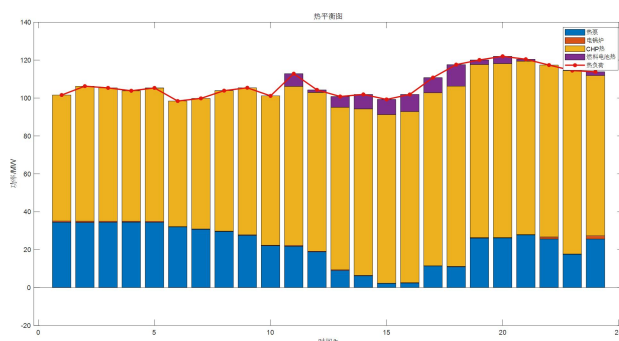


图4 各设备热平衡出力图

Fig.4. Thermal equilibrium output diagram of each device

如上图所示, 分别展示在电负荷需求低谷的 (01:00-08:00) 时段, 风电出力处于高峰状态。为了避免弃风损失, 该系统利用电转氢设备将多余的风电转化为氢能储存。同时, 这个时段热负荷需求较高, CHP 机组、电锅炉和热泵等热力设备出力较高, 既满足了热力需求, CHP 机组还向电网提供了部分电力输出。这样不仅降低了电力系统的波动, 还提高了能源的综合利用效率。在电力需求高峰的 (08:00-11:00) 时段, 电转氢设备仍然发挥了削峰作用, 消纳了多余的风电资源, 避免了电网的不稳定运行, 而在下午 (15:00-18:00) 和晚上 (21:00-23:00) 这些风电资源较少、电负荷需求较高的时段, 电转氢设备不再工作, 但是燃料电池启动, 发出电功率, CHP 和风电机组一起满足系统的电负荷, 在风电低谷的时候起到“填谷”作用。

从热力平衡图可以看出, 与电力平衡相比, 热力平衡图波动较小, 各热力设备如 CHP、热泵等的出力相对较为平稳。尤其是在 (01:00-08:00) 这个电力需求低、热力需求高的时段, 这些热力设备发挥了关键作用, 满足了当时段的热力需求。CHP 作为热电联产设备, 不仅可根据电力需求调节电力输出, 还能根据热力需求灵活调整热力输出, 发挥了重要的调节作用, 而在 (5:00-18:00) 和晚上 (21:00-23:00) 时段, 燃料电池由于发出电功率去

“填谷”，也发出了一部分的热功率，缓解了系统的热负荷需求。

综合来看，该系统通过对电力和热力设备的优化调度，有效消纳了间歇性可再生能源(风电)的波动，提高了能源利用效率。电转氢和燃料电池在系统中发挥“削峰填谷”的作用，为高比例可再生能源并网提供了保障。同时燃料电池的产热，确保了热力需求的稳定供给，实现了电热耦合的高效利用，体现了清洁、高效、灵活的未来能源系统特点。总之，综合能源系统通过优化调度各设备，有效消纳了波动较大的风电资源，保证了电力和热力供给的稳定性，并实现了能源利用的最优化。

### 3.1.3 不同容量燃料电池接入对于系统风电波动平抑效果的影响分析

如下图所示，图中分别是用不同容量燃料电池去优化风电机组出力的曲线，其中，橙色曲线是未投入燃料电池优化的风机出力曲线；蓝色曲线是投入 10MW 燃料电池优化风电机组出力曲线；黄色曲线是投入 15MW 燃料电池优化风电机组出力曲线；紫色曲线是投入 20MW 燃料电池优化风电机组出力曲线。

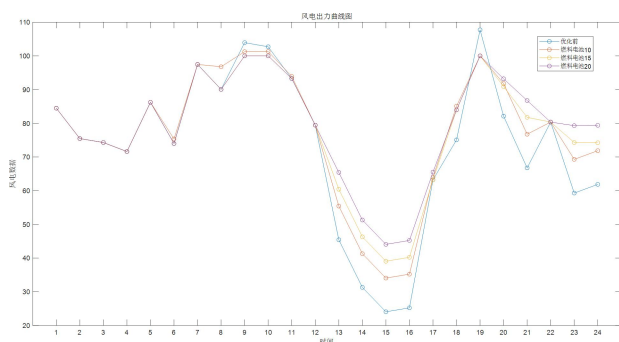


图 5 风电出力曲线对比图

Fig.5 Comparison of wind power output curves

从图中可知，我们可以得知，在不使用燃料电池的时间段内，三种经过燃料电池优化的风力发电机组的输出情况与未经过燃料电池优化的风力发电机组的输出情况大体上一致。然而，当燃料电池开始介入时，这三种经过燃料电池优化的风电机组的输出明显比未经过优化的风电机组更加稳定和平稳。这一结果进一步验证了我们之前的观点，即燃料电池在改善风电机组输出稳定性方面具有显著作用。

为了直观地看出，电转氢对于风电出力曲线的影响，下图分别用三个指标去量化电转氢设备对风电出力的影响。

表 1 不同容量的燃料电池指标对比

Tab. 1 Comparison of fuel cell indicators with different capacities

| 燃料电池容量  | 10MW    | 15MW    | 20MW    |
|---------|---------|---------|---------|
| 弃风量     | 14.3388 | 14.3388 | 14.3388 |
| 风电出力平滑度 | 13.1826 | 12.4870 | 11.6451 |

从表中可以得到，从整体来看 10MW, 15MW, 20MW 的燃料电池在保持相同的弃风量 14.3388 时，它们三者对应的风电光滑度分别是 13.1826, 12.4870, 11.6451，显然，20MW 的燃料电池优化风电机组出力效果更佳，出力更平稳。

从整体平稳性角度分析，20MW 燃料电池的出力曲线表现优于 15MW 和 10MW 的燃料电池。这表明 20MW 的燃料电池在适应风力资源波动和保证系统全天均衡与稳定方面具有明显的优势。即便在风力资源供应不均的情境下，20MW 燃料电池仍能维持稳定的输出，使风电机组的发电曲线更加平滑。

综上所述，无论是从指标和风电出力曲线的角度来看，配置容量更大的燃料电池对于平抑系统风电出力的作用更好。

## 4 结论

本文的结论总结如下：

(1) 燃料电池在风电系统中能够有效平滑风电输出，提高系统的稳定性。这主要得益于燃料电池自身具有快速响应和高效调节输出的能力。当风电功率出现剧烈波动时，燃料电池可以在数秒内迅速作出响应，调节自身输出以补偿电力缺口，维持系统的动态平衡。通过这种动态补偿作用，燃料电池能够有效降低风电功率输出的波动幅度，使整体电力输出更加平稳可靠。这对于提升风电系统的稳定性和安全性至关重要。

(2) 此外，燃料电池还可以与风电等可再生能源相结合，优化整个综合能源系统的运行策略。通过协调调度，燃料电池能够促进多种能源源的高效协同利用，提高系统的整体能源利用效率。例如，在风力资源丰富时，系统可以利用燃料电池等设备来吸收多余的风电，避免浪费；在风电不足时，燃料电池可快速提供所需补充电力。这种能源优化调度有助于提升综合能源系统的整体性能。

(3) 除了技术优势，燃料电池在经济和环境效益方面也具有显著优势。一方面，采用燃料电池

能够降低系统的运行成本,提高经济效益。另一方面,燃料电池的使用能够大幅减少火电的排放,显著降低温室气体和污染物排放,从而带来良好的环境效益。这种双重优势使燃料电池在未来可再生能源发展中具有重要价值。

总的来说,燃料电池在风电系统中扮演着关键的平衡和优化角色。其能够有效平滑风电输出、提高系统稳定性,同时还能优化系统运行策略、提升能源利用效率,并带来良好的经济环境效益。这些优势使燃料电池在可再生能源大规模应用中具有重要地位和广阔前景。

## 参考文献

- [1] 郇宁,张慧媛,王子琪,等. 区域电网分布式储能选址定容规划 [J]. 高压电器, 2020, 56(8):52-58.
- [2] 桑丙玉,王德顺,杨波,等. 平滑新能源输出波动的储能优化配置方法 [J]. 中国电机工程学报, 2014,34(22): 3700-3706.
- [3] 郭壮志,洪俊杰,孟安波. 基于多维度动态协调的大规模并网风电储能容量多指标优化配置策略 [J]. 电力自动化设备,2016,36(2):161-168.
- [4] 刁涵彬,李培强,王继飞,等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报,2020, 35(21): 4532-4543.
- [5] 裴煜,宋天昊,袁铁江,等. 计及燃料电池热电联供的区域综合能源系统经济运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 142-150.
- [6] 杨金刚,刘维秒,李顺昕,等. 风氢耦合发电系统优化运行策略与效益分析[J]. 电力建设, 2017, 38(1):106-115.
- [7] 郭梦婕,严正,周云,等. 含风电制氢装置的综合能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 115-123.
- [8] 蒲雨辰,李奇,陈维荣,等. 计及最小使用成本及储能状态平衡的电-氢混合储能孤岛直流微电网能量管理[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 918-927.

收稿日期: 2024-06-15。

作者照片



作者简介:

兴仁捷(2000),男,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化运行与控制, E-mail: ;  
xrj166@outlook.com

刘莉(1963),女,教授,硕士生导师,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等, E-mail:  
liuli@sic.edu.cn



文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 平抑风电波动的综合能源系统电氢优化运行研究

兴仁捷<sup>1</sup>, 刘莉<sup>1</sup>

(1. 电力学院 沈阳工程学院, 沈阳 110136)

E-mail: xrj166@outlook.com

## Research on the optimal operation of electric-hydrogen in the comprehensive energy system to suppress the wind power fluctuation

Renjie Xing<sup>1</sup>, Li Liu<sup>1</sup>

(1. Electric Power College, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136)

E-mail: xrj166@outlook.com

**ABSTRACT:** In this paper, the optimal scheduling model of integrated energy system based on water lysis is studied and established. This paper puts forward the system architecture with hydrogen production by electrolytic water as the core, analyzes the role of hydrogen production by electrolysis of water in abandoning wind consumption and suppressing wind power fluctuation, and establishes a comprehensive optimization model of electric energy system with electric energy balance, heat energy balance and equipment capacity constraint conditions with the penalty cost of wind abandon and the smoothness of wind power. The matlab software is used to analyze the predetermined scenario. The simulation results show that the model can improve the stability of wind power in the system and ensure the stable supply of electric load and heat load.

**KEY WORDS:** Integrated energy system, electric hydrogen production, wind abandon punishment, wind power fluctuation calm

**摘要:** 本文研究并建立了基于电解水制氢技术的综合能源系统优化调度模型。提出了以电解水制氢为核心的系统架构,分析了电解水制氢在弃风消纳以及平抑风电波动的作用,并建立了以弃风惩罚成本以及风电平滑度为目标,建立了电能平衡、热能平衡和设备容量约束条件的综合能源系统电氢优化模型。使用 matlab 软件对预定的场景进行仿真分析,仿真结果显示,该模型能提升系统风电的平稳性,确保电负荷和热负荷的稳定供应。

**关键词:** 综合能源系统, 电制氢, 弃风惩罚, 风电波动平抑

## 0 引言

我国“双碳”战略目标的实施, 积极鼓励可再生能源的大规模利用<sup>[1]</sup>。其中, 风力发电具有零消耗、无污染的特点, 在电力系统中的渗透率不断提高, 预计 2035 年, 我国风电装机容量将达到 1107GW。由于风电随机、波动的本质属性, 风电消纳问题制约着综合能源系统的利用效率, 亟待解决<sup>[2]</sup>。因此, 研究储电、储热、储氢等多元化新型储能技术是发展可再生能源的关键<sup>[3]</sup>。在诸多储能方式中, 电转氢 (Power-to-Hydrogen, P2H) 技术能有效提高可再生能源渗透率。利用 P2H 设备吸收富余能量电解制氢, 可缓解弃风问题<sup>[4]</sup>, 且氢气方便储存, 可以通过运输到其他地区, 也可直接售卖。

文献<sup>[5]</sup>以最小运行成本, 最小限风量和最小综合成本为目标, 提出了一种具有 P2H 的电热氢耦合的风能发电非线性优化模型。文献<sup>[6]</sup>提出了综合能源系统的统一潮流模型建模和求解方法, 对于目前 IES 的规划、调度、最优潮流计算等方面进行了一定的归纳总结。文献<sup>[7]</sup>研究多余风能电解制氢过程, 对建立的含 P2H 的综合能源系统进行了评估。文献<sup>[8]</sup>以系统各类成本之和最小为目标, 提出了含电转气的 IES 优化调度模型。文献<sup>[9]</sup>从东北某区域风力分布情况和风电接纳能力出发, 通过将系统无法消纳的过剩风电通过电解制氢储存来提高系统对于风电的消纳能力, 提出风电、氢储能的综合系统。文献<sup>[10]</sup>在降低系统弃风率基础上, 建立了综合能源系统日前经济调度模型, 以系统经济、环境成



本最小为目标, 通过对比系统制氢参与前后系统运行结果, 分析弃风电量、经济、环境成本变化量, 验证所提模型的有效性以及制氢对系统运行产生的积极影响。

综上所述, 目前电转氢在综合能源系统中的研究只在弃风消纳, 而并未考虑在平抑风电波动方面的分析, 因此本文建立兼顾消纳弃风以及平抑风电波动出力的目标函数, 得出电转氢在不同容量配置时, 对弃风和平抑风电波动皆有影响。

## 1 系统结构

本文的 IES 模型结构主要由供给侧, 中间能源转化环节和需求侧构成, 首先供给侧是由风电机组和 CHP 机组联合供电, 其次中间能源转化环节包括能源转换装置, 电热能输出装置, 主要有热泵, 电锅炉, 还有消纳装置 P2H, 最后的需求侧中包含有电负荷和热负荷。基本结构如图所示。

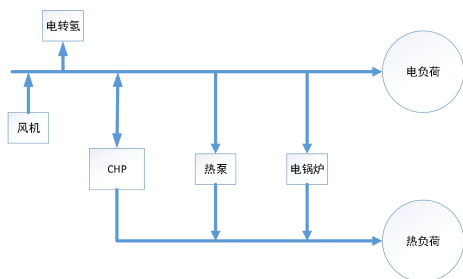


图1 综合能源系统结构图

Fig.1 Structural diagram of the integrated energy system

## 2 综合能源系统优化调度模型

### 2.1 目标函数

常规综合能源系统优化调度的目标函数通常为经济性, 但本文论述的是电转氢设备在综合能源系统中平抑制风光波动的作用分析, 因此目标函数设置为弃风量和风电光滑功率差。

$$\min f = f_1 + f_2 \quad (1)$$

#### 2.1.1 弃风量

$$P_{wind,t}^r \leq P_{wind,t}^{plan} \quad (2)$$

式中,  $P_{wind,t}^r$  为  $t$  时刻风电的预测发电量,  $P_{wind,t}^{plan}$  为  $t$  时刻风电的实际发电量。

两者之差为  $t$  时刻风电的弃风量:

$$f_1 = \sum_{t=1}^T P_{wind,t}^{plan} - P_{wind,t}^r \quad (3)$$

式中,  $f_1$  为系统总的弃风量。

#### 2.1.2 风电光滑功率差

这里提出一个新的指标, 为风电光滑功率差值, 用以衡量风电出力的光滑度。

$$f_2 = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{t=1}^{L-1} (P_{flu,t} - P_{flu,t-1})^2} \quad (4)$$

其中  $f_2$  为风电平顺光滑功率差值,  $P_{flu,t}$  和  $P_{flu,t-1}$  分别为  $t-1$  时刻与  $t$  时刻的平抑后的风电出力。

$$\begin{cases} P_{flu,t} = P_{wind,t} + P_{el,t} \\ P_{flu,t-1} = P_{wind,t-1} + P_{el,t-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P_{wind,t}$  和  $P_{el,t}$  分别为  $t$  时刻的风电出力与电转氢的耗量功率,  $P_{wind,t-1}$  和  $P_{el,t-1}$  分别为  $t-1$  时刻的风电出力与电转氢的耗量功率。

### 2.2 约束条件

本文中的 IES 模型中, 约束条件主要包括电热功率平衡约束, 风电出力约束, CHP 热电耦合运行约束, 热泵, 电锅炉约束和电转氢上下限约束。

#### 2.2.1 电功率平衡约束

$$\sum_{i=1} P_{CHP,t}^i + \sum_{j=1} P_{wind,t}^{r,j} = \sum_{k=1} P_{eb,t}^k + \sum_{h=1} P_{hp,t}^h + P_{el,t} + P_{grid,t}^{loss} + L_t^e \quad (6)$$

其中,  $P_{CHP,t}^i$  表示在  $t$  时刻第  $i$  台 CHP 实际的发电量,  $P_{wind,t}^{r,j}$  表示在  $t$  时刻第  $j$  台风机实际的发电量,  $P_{eb,t}^k$  和  $P_{hp,t}^h$  分别表示在  $t$  时刻第  $k$  台电锅炉和第  $h$  台和热泵的耗电量,  $P_{el,t}$  表示电解槽的耗电量,  $P_{grid,t}^{loss}$  表示  $t$  时刻网损,  $L_t^e$  表示系统电负荷需求。

#### 2.2.2 热功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^n Q_{CHP,t}^i + \sum_{k=1}^x Q_{eb,t}^k + \sum_{h=1}^y Q_{hp,t}^h = Q_{grid,t}^{loss} + L_t^h \quad (6)$$

式中,  $Q_{CHP,t}^i$  表示第  $i$  台 CHP 的产热量,  $Q_{eb,t}^k$  和  $Q_{hp,t}^h$  分别表示第  $k$  台电锅炉和第  $h$  台热泵的产热量,  $Q_{grid,t}^{loss}$  表示  $t$  时刻热损,  $L_t^h$  参与需求响应后的热负荷需求。

### 2.2.3 风电出力上下限约束

$$P_{wind,t}^r \leq P_{wind,t}^{plan} \quad (7)$$

式中  $P_{wind,t}^r$  为  $t$  时刻风电的预测发电量,  $P_{wind,t}^{plan}$  为  $t$  时刻风电的实际发电量。

### 2.2.4 CHP 热电耦合运行约束

基于热电机组的运行状态进行研究, 图 2.5 明确了 CHP 电热输出的工作范围, 并指出 CHP 热电耦合的运行限制可以通过以下公式来描述[17]。

$$\begin{cases} P_{CHP} \leq P_{CHP,t} \leq \overline{P_{CHP}} \\ Q_{CHP} \leq Q_{CHP,t} \leq \overline{Q_{CHP}} \\ \max \left( C_v \cdot Q_{CHP,t} + P_{CHP,D}, C_m \cdot Q_{CHP,t} + P_{CHP,C} \right) \leq P_{CHP,t} \\ P_{CHP,t} \leq (C_v \cdot Q_{CHP,t} + P_{CHP,A}) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $P_{CHP}$  和  $\overline{P_{CHP}}$  分别表示 CHP 机组电功率的下限和上限,  $Q_{CHP}$  和  $\overline{Q_{CHP}}$  表示 CHP 机组热功率的下限和上限,  $C_v$  和  $C_m$  分别为 CHP 的热电耦合参数,  $P_{CHP,A}$ 、 $P_{CHP,C}$  和  $P_{CHP,D}$  分别表示 CHP 运行工况下 A 点、B 点和 D 点的电功率。

### 2.2.5 热泵约束

热泵是汲取余热而发出热量的设备, 相比于电锅炉设备模型并不相同, 其数学模型如下所示:

$$Q_{hp,t} = COP \cdot P_{hp,t} \quad (8)$$

式中,  $Q_{hp,t}$  表示  $t$  时刻热泵的热功率,  $P_{hp,t}$  表示热泵的电功率。

热泵的效能系数  $COP$  决定了其热功率与电功率的比率, 本文取值 3.5。且热泵的功率上下限约束为:

$$Q_{hp} \leq Q_{hp,t} \leq \overline{Q_{hp}} \quad (9)$$

式中,  $\underline{Q_{hp}}$  和  $\overline{Q_{hp}}$  分别表示热泵热输出功率的下限和上限。

### 2.2.6 电锅炉约束

与热泵有相似之处, 电锅炉也是通过电能消耗来生成热能的, 它是一种能够将电能转换为热能的热电加热设备。根据转换方式不同, 分为电阻式电锅炉和电极式电锅炉。电锅炉有多种安装位置, 包括电厂侧和用户侧等。根据电锅炉工作原理, 电锅炉模型为:

$$\begin{cases} Q_{eb} \leq Q_{eb,t} \leq \overline{Q_{eb}} \\ Q_{eb,t} = \eta_{eb} \cdot P_{eb,t} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\underline{Q_{eb}}$  和  $\overline{Q_{eb}}$  表示了电锅炉热输出的下限和上限,  $Q_{eb,t}$  表示  $t$  时刻电锅炉的热输出,  $P_{eb,t}$  表示电锅炉的电功率,  $\eta_{eb}$  为电锅炉的热效率。

### 2.2.7 电解槽出力上下限约束

$$P_{el}^{\min} \leq P_{el,t} \leq P_{el}^{\max} \quad (11)$$

式中:  $P_{el}^{\min}$  和  $P_{el}^{\max}$  分别为电解槽耗量功率的最大和最小功率。

## 3 仿真分析

本文中的数据来源为辽宁某市的热电负荷以及风电数据, 本文建立了综合能源系统的数学模型, 在原本的综合能源系统的基础上加入了电转氢设备, 并通过 matlab 软件使用 yalmip 工具包和 cplex 求解器对系统优化模型进行仿真求解。

### 3.1 电转氢对于综合能源系统调度结果影响分析

本部分分别展示容量为 10MW 的电转氢对于系统的影响, 并分析不同容量的电转氢对于平电波动的影响。

#### 3.1.1 风电曲线平滑优化结果分析

如下图所示,下图为优化后的风电出力曲线与预测出力曲线的对比图,从图中可以看出通过使用电转氢设备优化后的风光出力曲线变得更加平缓,这是电转氢在系统中消纳风力资源,使曲线的峰谷差变得更加接近优化的结果,以下是对电负荷曲线的分析,首先在(01:00—08:00)时段,由于此时段位于用电的低谷期,因此在此期间用户侧的电负荷是相对较低的,但是此时刻的风电资源确实相对较好,因此电转氢启动工作,讲多余的风力资源转化为电能存储起来,以供之后售氢使用;而在(08:00—11:00)时段内,此时的电负荷急剧上升,因此电转氢所消纳的风力资源也大幅度减少,可以明显看出这两个时段的差别,同时在(18:00—20:00)时段,电转氢又开始工作,这些时段都是处于电负荷的较低的时间段,此时的风力资源较好,电转氢工作,以达到“削峰”的效果,减少了风电曲线的峰谷差,以进一步达到平抑风电波动的作用,如图所示。

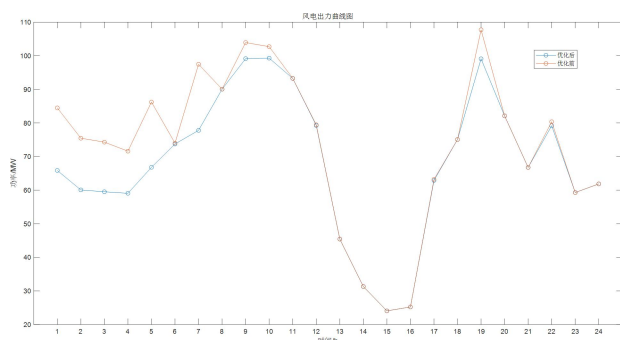


图2 优化后风电出力曲线对比图

Fig.2 Comparison of the optimized wind power output curve

### 3.1.2 日内出力调度优化结果分析

下图分别为此刻的系统的电平衡和热平衡的出力图。

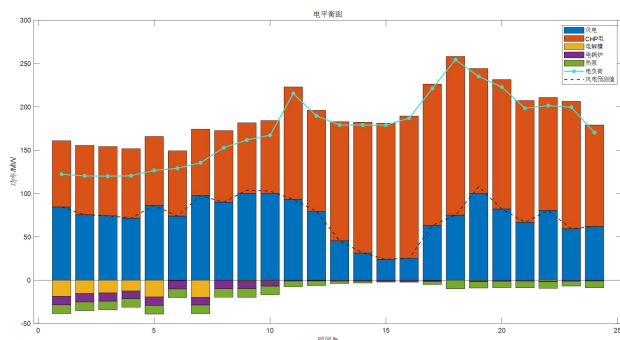


图3 各设备电平衡出力图

Fig.3 Electrical balance output diagram of each device

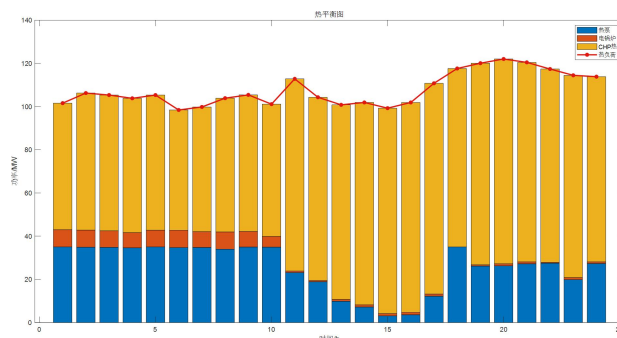


图4 各设备热平衡出力图

Fig.4. Thermal equilibrium output diagram of each device

如上图所示,分别展示了优化后的电平衡和热平衡出力图,从图中可以明显看出相比于风电出力呈现明显的日内波动特征,CHP和热泵以及电锅炉等设备的出力相对较为平稳,并且日内波动较小。图中分别介绍了综合能源系统在不同时间段的电负荷和热负荷情况。在电负荷低谷时段(01:00-08:00),此时电负荷需求较低,但是热负荷需求较高,而且此时刻的风电出力曲线正处于高峰期,因此在此时段电转氢的出力处于最高值,避免弃风损失,CHP,电锅炉和热泵作为主要供热设备,出力较高,而且CHP的电出力也较高,因为不仅要供电,同时也要供热,而在(08:00—11:00)时段内,电转氢也起到了削峰的作用,消纳了多余的风电资源,但是因为此刻的电负荷需求较大,因此电转氢的耗量也较低,而在(15:00-18:00和21:00-23:00)这些时段内,风电资源较低,而且电负荷需求也较高,此时电转氢设备将不工作,不去平滑风电的出力曲线,各设备的出力较高,此刻的风电出力也为预测中的最大值。

整个调度周期中,相比于波动较大的风电出力,综合能源系统中CHP、热泵和电锅炉等设备的出力相对较为平稳,日内波动较小。在电负荷低谷时段(01:00-08:00),热负荷需求较高,而风电出力正处于高峰期,因此电转氢设备出力最高,避免弃风损失。CHP、电锅炉和热泵作为主要供热设备,出力也较高,CHP的电出力也较高,用于供电和供热。在08:00-11:00时段,电转氢设备削峰消纳多余的风电资源,但由于此时电负荷需求较大,电转氢耗量较低。在15:00-18:00和21:00-23:00这些时段,风电资源较低,电负荷需求较高,此时电转氢设备不工作,各设备出力较高,以满足电力和热力需求。

总之,综合能源系统通过优化调度各设备,有效消纳了波动较大的风电资源,保证了电力和热力供给的稳定性,并实现了能源利用的最优化。

### 3.1.2 不同容量电转氢设备接入对于系统风电波动平抑效果的影响分析

本节主要探讨不同容量的电转氢对平抑风电的效果。主要讨论的容量为 10MW、15MW、20MW。当电转氢装置的容量增大时，耗电量将随之增加。这是因为随着电转氢装置容量的增大，电转氢在风里资源多余的时候可以更好地消纳风电资源。所以随着电转氢容量的增加可以消耗更多的风能进一步提升风力发电的平滑性，减少风电波动对电网带来的波动性和不稳定性，有助于提高电网整体的稳定性和可靠性，下图为不同容量的电转氢设备对于风电出力曲线的影响。

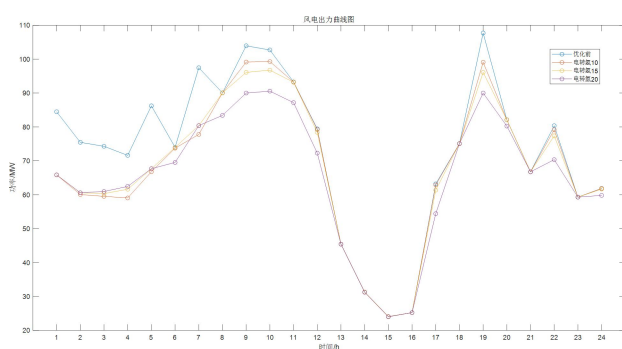


图 5 风电出力曲线对比图

Fig.5 Comparison of wind power output curves

从图中通过对比，可以看出随着电转氢容量的增大风电的出力曲线更为平缓，特别是在电负荷低谷的时段内，电转氢设备所消纳的风能变得更多，由此可以得出在一定程度上通过增大电转氢的容量可以更好的平抑风电波动。当风电输出趋于低谷时，由图可以看出电转氢装置容量的提高对风电出力的影响较小。在风电输出低谷时，可以通过其他能源系统补充电力，提高系统整体的平滑度

为了直观地看出，电转氢对于风电出力曲线的影响，下图分别用三个指标去量化电转氢设备对风电出力的影响。

表 1 不同容量的燃料电池指标对比

Tab. 1 Comparison of fuel cell indicators with different capacities

| 电转氢容量 | 10      | 15      | 20      |
|-------|---------|---------|---------|
| 风电平滑度 | 15.4406 | 14.5563 | 13.1826 |
| 弃风差   | 14.3388 | 23.5699 | 46.7667 |
| 风电利用率 | 98.94   | 96.11   | 96.17   |

由表中数据可知通过电转氢的方式可以使风

电的输出更为平滑随着电转氢容量的提高平滑效果更好，但随着电转氢容量的增加弃风差也有明显增大，说明在运用电氢技术对风电波动进行平抑的过程中，平滑功率差与弃风差是相悖的两个方面。同时因此，电转氢装置的实际能力可能受到电解效率的限制。即使通过电转氢装置对风电进行消纳也会存在弃风。通过计算得到的风电利用率数据显示，选择 15 容量的电转氢的风电利用率分别为 98.94%，96.11%和 96.17%，均优于选择 10 容量和 20 容量的情况。这表明 15 容量的电转氢能够更有效地提高风电的利用率，提高风电发电效率，并提高风电的平滑度。

## 4 结论

(1) 基于目前国内外的研究进展，本文对采用电氢技术稳定风电波动的综合能源系统的当前状况进行了概述。通过对现有制氢技术的深入分析，我们证实了电氢技术的发展能够有效地消纳可再生能源，提升系统的能源使用效率，并满足多样化的能源需求。

(2) 建立了风电机组，CHP，热泵，电转氢的数学模型，并总结归纳了碱性电解槽的功率调节特性，从正反两个方面分析了碱性电解槽应用于平抑风电功率波动的可行性和局限性，以此为切入点，构建综合能源系统运行方案，为制定平抑风电波动策略以及电氢优化运行模型奠定基础。

(3) 本文构建了一个综合能源系统优化规划模型，该模型以系统的弃风量和风电平滑度作为目标函数，并以电能平衡、热能平衡和燃料供需平衡作为能量约束，同时以发电设备、产热设备和氢储能设备作为设备约束条件。

(4) 对基于电氢运行的综合能源系统优化规划模型进行仿真分析，在系统经济性最优作为目标函数的情况下。通过和没有配置电转氢装置的系统进行对比，分析验证了本文所提模型在提高风电消纳能力，在能源高效利用上发挥积极作用。通过对比不同容量的电转氢平抑效果的对比，更为直观的感受电氢技术对于平抑风电波动的作用。

综上所述，风电制氢可以在一定程度上平抑风电波动，虽然会导致弃风量增加，但通过对使用场景的分析，通过选择合适的容量可以在平抑风电的同时保证风电利用率。

## 参考文献

- [1] 姜克隽, 冯升波. 走向《巴黎协定》温升目标: 已经在路上[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 1-6.
- [2] PACS-L: 国家能源局. 2020 年可再生能源持续保持 高质量发展 [EB/OL]. 2021[2021-01-30].
- [3] 蔡钦钦, 肖宇, 朱永强. 计及电转氢和燃料电池的 电热微网日前经济协调调度模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 107-112.
- [4] 曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2187-2200, 24.
- [5] Jiang Y W, Guo L Y. Research on Wind Power Accommodation for an Electricity-Heat-Gas Integrated Microgrid System With Power-to-Gas[J]. in IEEE Access, 2019, 7:87118-87126.
- [6] 林涛, 毕如玉, 杜蕙等. 电-气互联系统潮流优化与安全性研究综述[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(05): 441-448.
- [7] Huang J H, Zhou H S, Wu Q H, et al. Assessment of an integrated energy system embedded with power-to-gas plant[C]. 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), Melbourne, VIC, 2016:196-201.
- [8] 朱兰, 王吉, 唐陇军等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(01): 116-126.
- [9] 崔杨, 闫石, 仲悟之等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4254-4264.
- [10] 易伟, 徐建源, 吴冠男等. 利用风电制氢储能系统提高东北某区域电网弃风消纳能力[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(04): 190-197.43(3): 918-927.

收稿日期: 2024-06-15。

作者照片



作者简介:

兴仁捷(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化运行与控制, E-mail: ; xrxj166@outlook.com

刘莉(1963), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等, E-mail: liuli@sic.edu.cn

# 考虑冷热电联供的光伏/光热/AA-CAES 容量优化配置

尤慰<sup>1</sup>, 吕施霖<sup>2</sup>, 杨成<sup>2</sup>, 吴晨曦<sup>1</sup>

(1. 杭州电子科技大学自动化学院, 浙江 杭州 310018) (2. 国网浙江省电力有限公司综合服务分公司)

**摘要:** 在双碳目标的能源发展环境下, 新能源冷热电联供变得越来越重要。研究微综合能源多能耦合机理, 对综合能源系统的有序低碳规划、运行具有重要研究意义。因此, 本文在充分考虑了先进绝热压缩空气 (AA-CAES, advanced adiabatic compressed air energy storage) 储能在微综合能源系统中的优势后, 研究了含 CAES 与光伏光热等多能耦合的冷热电联供微综合能源系统的容量规划方法及其调度策略。首先, 本文考虑了 AA-CAES 的冷热电联供特性并进行建模, 同时建立 AA-CAES 的运行约束集合; 其次采用双层规划法优化 AA-CAES 的容量配置, 上层规划以 AA-CAES 所能带来的最大净效益为目标, 下层调度以系统供能成本与二氧化碳治理成本最低为目标。最后通过算例验证了 AA-CAES 的冷热电联供优越性。

**关键词:** 先进绝热压缩空气储能; 光伏/光热; 冷热电联供微综合能源系统; 容量规划; 双层优化;

中图分类号:

文献标识码:

DOI:

## Optimal configuration of photovoltaic/photothermal/AA-CAES capacity considering CCHP

**Abstract:** In the dual carbon development environment, flexible combined renewable resources and energy storage system with IES(integrated energy system) becomes more and more important. Analyzing the coupling mechanism of multi-energy plays a significant role in low-carbon IES planning and operation. Therefore, in this paper, after fully considering the advantages of advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) in the micro IES, the configuration and scheduling strategy of the micro IES with Solar photovoltaic/thermal (PV/T)/AA-CAES are optimized. Firstly, the CCHP(combined power/heating/cooling) characteristics of AA-CAES are modeled in detail. Its operation constraints are also established. Secondly, bi-level programming method is employed to solve the problem. Capacity is optimized in the upper level with the objective of minimizing the sum of benefit brought by AA-CAES and the fixed cost. Dispatch cost and the treating cost of carbon are optimized in the lower level. Finally, the obvious method proposed in this paper is simulated and analyzed with an industrial park .

**Key words:** compressed air energy storage system; PV/T; CCHP; capacity configuration; bi-level optimization

### 0 引言<sup>1</sup>

随着全球经济生产和消费水平的不断提高, 不可再生能源的短缺问题和环境的污染问题变得

越来越严峻, 我国亦在 2021 年 3 月提出了“3060”双碳目标。因此, 大力开发和利用可再生能源成为解决问题的关键。新能源的冷热电联供(combined cooling heating and power, CCHP)被认为是解决环境问题和能源短缺问题的有效途径<sup>[1-2]</sup>, 也是实现能源互联网化的重要课题<sup>[3-5]</sup>。在微综合能源系统中加入储能设备可提升系统可再生能源的消纳水平和运行灵活性<sup>[6]</sup>。因此合理配置储能系统的容量变得至关重要。

在众多的储能技术中, 先进绝热压缩空气储

<sup>1</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2166211); 浙江省自然科学基金资助(LY20E070002)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U2166211) and Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China(LY20E070002)



能(AA-CAES)技术以其容量成本低、运行寿命长、容量大等优点脱颖而出。此外, AA-CAES具备冷热电联供的能力, 能够很好匹配微综合能源系统的多能耦合特性, 使能源综合能源利用率达到 70%以上<sup>[7]</sup>。近年来, 我国建立了多座小型的压缩空气储能示范平台, 推动了压缩空气储能技术的应用<sup>[8]</sup>。

目前, 学者们对 AA-CAES 开展了相关研究。文献[8]构建了 AA-CAES 结合风电的联合发电模型, 并对发电成本和供电的可靠性进行了评估。文献[9]在微网中加入 AA-CAES 构建模型, 以焓最小为目标, 对系统的调度策略进行了研究。文献[10]以 AA-CAES 储能为代表, 提出了面向垄断电力市场 AA-CAES 的经济型评估模型, 分析了 AA-CAES 对电力系统煤耗量、排污量的影响。上述文献丰富了 AA-CAES 研究, 但是均未考虑 AA-CAES 的容量配置。

文献[11]以消纳风电为目标, 建立了基于小岛的 CAES 电站, 提出了容量优化方法。文献[12]考虑在综合能源系统中加入 AA-CAES 对热电负荷实现联供, 从而规划容量。文献[13]在 AA-CAES 的基础上, 耦合了光热辅热模块, 以热电为能流建模, 规划了 AA-CAES 储能的容量。上述文献虽提出了 CAES 的容量配置, 但其均未考虑冷热电联供的场景, 且均未考虑储热室储气室初始占比对系统的影响。

因此, 针对含风力发电与光伏光热的 CCHP 微综合能源系统, 以 AA-CAES 为储能系统, 采取双层优化的方法对其相关组成设备进行容量规划。主要创新点为: 考虑了压缩空气储能系统冷热电联供的能力, 并建立其适用于容量规划和调度的模型; 内层调度考虑了不同季节的典型日运行特性, 优化目标计及了二氧化碳排放治理成本; 外层规划考虑了储气室和储热室的容量初始值的选取, 全面优化了压缩/膨胀功率、储气/储热容量。

## 1 含 AA-CAES 的冷热电联供微综合能源系统模型

### 1.1 系统结构

系统主要包含风力发电、光伏发电、太阳能集热的可再生能源输入, 燃气发电机及余热回收锅炉的热电联供机组, 吸收式制冷和电制冷的制冷设备, AA-CAES 的储能装置。系统的结构和能流图如图 1 所示。

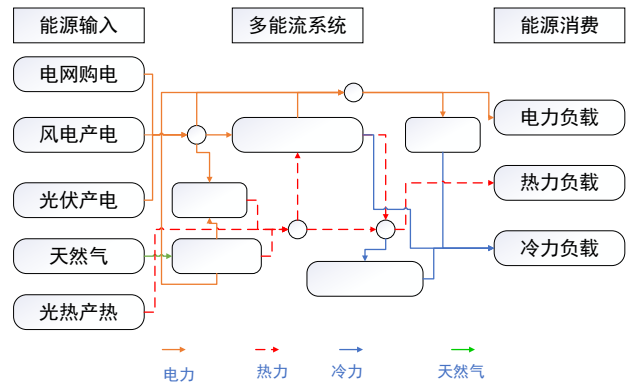


图 1 系统能流图

Fig1 System energy flow diagram

### 1.2 系统主要设备模型

为了更好地分析系统的性能, 需要对系统中的各个设备进行建模, 包括光伏发电模型, 太阳能集热模型, 燃气轮机模型, AA-CAES 的模型等。

#### 1.2.1 AA-CAES 模型

AA-CAES 主要由压缩机、膨胀机、电动机、发电机、储热室、储气室、换热器等设备组成<sup>[14]</sup>。AA-CAES 典型的 2 级压缩 2 级膨胀的结构如图所示。

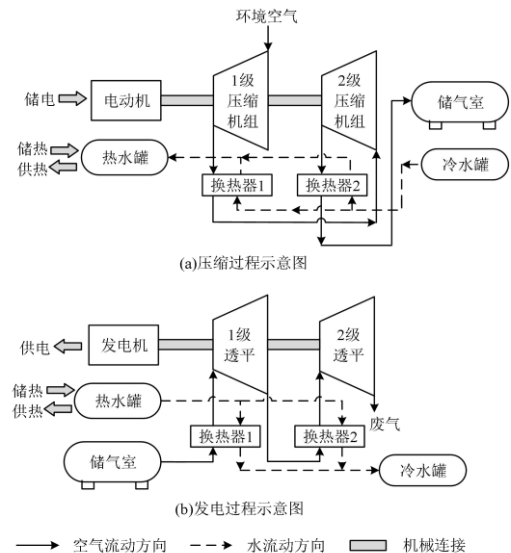


图 2 AA-CAES 结构图

Fig2 Structure diagram of a typical AA-CAES system

储能时, 压缩机对流入的空气进行压缩, 产生的高压空气经过换热器换热后流进储气室, 换热器中的换热介质换热后流入储热室。释能时, 储气室内的高压空气在换热器中加热后, 流进膨胀机进行膨胀, 推动发电机发电, 膨胀后的空气可以作为冷量进行输出。

本文中建立的 AA-CAES 的热力学模型有以下假设: 空气为理想气体, 满足理想气体状态方程; 储气室的温度近似等于环境的温度; 采取

水为换热介质, 根据文献[15], 可以认为储热室的温度近似等于额定温度。

#### (1) 压缩阶段

以多级压缩为例, 第  $i$  级压缩机的压缩功率为:

$$P_{c,i}(t)\eta_c = m_a c_p T_{c,i,in} [\beta_c^{(\gamma-1)/(\gamma N)} - 1] \quad (1)$$

其中,  $\eta_c$  是压缩机的效率;  $m_a$  是压缩机压缩空气的质量;  $c_p$  是空气的定压比热容;  $T_{c,i,in}$  是第  $i$  级压缩机的进气温度;  $\beta_c$  是压缩机的额定压缩比;  $\gamma$  是空气的比热容比指数。可见, 从功率就可以对应得到空气的一个质量。

第  $i$  级压缩机的出气温度为:

$$T_{c,i,out} = T_{c,i,in} \left[ \frac{\beta_c^{(\gamma-1)/(\gamma N)} - 1}{\eta_c} + 1 \right] \quad (2)$$

#### (2) 压缩换热阶段

引入换热器效能, 其定义式为:

$$\varepsilon = \frac{c_{p,1} m_1 (T_{in1} - T_{out1})}{\min\{c_p m\} (T_{in1} - T_{in2})} = \frac{c_{p,2} m_2 (T_{out2} - T_{in2})}{\min\{c_p m\} (T_{in1} - T_{in2})} \quad (3)$$

式中,  $m$  表示流入换热器流体的质量;  $T_{in}$  和  $T_{out}$  为流进和流出换热器的流体的温度,  $c_p$  表示其比热容;  $\min\{\cdot\}$  表示取其中的最小值; 下标 1, 2 分别表示是空气和换热介质水。

由式子得, 当  $\min\{\cdot\}$  中取出的值为  $c_{p,1} m_1$  时, 空气的输出温度最低, 换热效率最高, 得到换热器所需水的质量为:

$$m_{c2} = \varepsilon c_{p,1} m_1 (T_{in1} - T_{in2}) / c_{p,2} (T_{out2} - T_{in2}) \quad (4)$$

第  $i$  级换热器出气的温度, 同时也是第  $i+1$  级压缩机的进气温度为:

$$T_{c,in,i+1} = (1 - \varepsilon) T_{c,out,i} + T_{in2} \quad (5)$$

#### (3) 压缩储热阶段

换热阶段水储存进储热室的热量为:

$$Q_{c,c} = m_2 c_{p,2} (T_{out2} - T_{in2}) \quad (6)$$

式中,  $Q_{c,c}$  为储热室储存的热量值。

#### (4) 膨胀换热阶段

同样引入换热器的效能:

$$\varepsilon = \frac{c_{p,1} m_1 (T_{out1} - T_{in1})}{\min\{c_p m\} (T_{in2} - T_{in1})} = \frac{c_{p,2} m_2 (T_{in2} - T_{out2})}{\min\{c_p m\} (T_{in2} - T_{in1})} \quad (7)$$

由式子可得, 当  $\min\{\cdot\}$  的值取值为  $c_{p,1} m_1$  时, 空气通过换热器加热后的温度最高, 效率最大。得到换热器所需热水的质量为:

$$m_{t2} = \varepsilon c_{p,1} m_1 (T_{in2} - T_{in1}) / c_{p,2} (T_{in2} - T_{out2}) \quad (8)$$

第  $i$  级换热器的出气温度, 也是第  $i$  级膨胀机的进气温度为:

$$T_i = (1 - \varepsilon) T_{t,i-1,in} + \varepsilon T_{in2} \quad (9)$$

#### (5) 膨胀释热阶段

换热阶段消耗储热室的热量为:

$$Q_{t,s} = m_2 c_{p,2} (T_{in2} - T_{out2}) \quad (10)$$

式中,  $Q_{t,s}$  为储热室消耗的热量。

#### (6) 膨胀阶段

第  $i$  级膨胀机的输出功率为:

$$P_{t,i}(t) = \eta_t m_a c_p T_i [1 - \beta_t^{(\gamma-1)/(\gamma N)}] \quad (11)$$

式中,  $\eta_t$  是膨胀效率;  $\beta_t$  是膨胀机的膨胀比。从膨胀功率可以对应得到一个空气质量。

第  $i$  级膨胀机的出气温度也是第  $i+1$  级换热器的进气温度为:

$$T_{t,i,out} = T_i \{1 - \eta_t [1 - \beta_t^{(\gamma-1)/(\gamma N)}]\} \quad (12)$$

#### (7) 膨胀阶段的输出冷量

$$P_{t,cold} = m_a c_p (T_0 - T_{t,N,out}) \quad (13)$$

式中,  $T_0$  是环境温度,  $T_{t,N,out}$  是最后一级膨胀机的输出温度。

#### 1.2.2 光伏出力模型

光伏的输出功率模型如式(14)所示:

$$P_{pv} = P_{STC} I [1 + k(T_{pv} - T_r)] / I_{STC} A_{pv} \quad (14)$$

式中,  $P_{STC}$  是标准测试条件下 ( $I_{STC}$  为  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T_r$  为  $25^\circ\text{C}$ ) 的光伏板的额定功率;  $I$  是光照强度;  $k$  是功率温度系数;  $A_{pv}$  是光伏板的个数,  $T_{pv}$  是光伏发电组件的温度, 可通过式(15)估算:

$$T_{pv} = T_0 + 0.03I \quad (15)$$

#### 1.2.3 太阳能集热模型

本文选取线性菲涅尔式聚光集热模块作为系统中的太阳能聚光集热子系统, 其模型表达式如式(16)所示<sup>[16]</sup>:

$$P_{SF} = I A_{SF} I_L I_T \eta_{OPT,R} \eta_{END} \eta_{CIN} \varsigma \quad (16)$$

式中,  $A_{SF}$  为镜场占地面积,  $I_L$  和  $I_T$  是入射角调整率的纵向分量和横向分量, 具体的联系参考文献[16];  $\eta_{OPT,R}$  是参考光学效率;  $\eta_{END}$  是终端损耗光效率;  $\eta_{CIN}$  是反射镜面, 玻璃管表面的清洁度系数;  $\varsigma$  为太阳能冷却换热器的换热系数。

#### 1.2.4 热电联产模型

热电联产包括燃气轮机机组和余热回收锅炉。燃气轮机出力和回收热量的关系如式(17)和式(18)所示:

$$P_{CHP}^e(t) = \eta_{CHP}^e G_{CHP}(t) LHV_{gas} / 3.6 \quad (17)$$

$$P_{CHP}^h(t) = \eta_{CHP}^h G_{CHP}(t) LHV_{gas} / 3.6 \quad (18)$$

式中:  $\eta_{CHP}^e$  和  $\eta_{CHP}^h$  分别为机组的发电效率和产热效率;  $P_{CHP}^e$  和  $P_{CHP}^h$  分别为机组的电出力和热出力, 单位为 kW;  $G_{CHP}$  为 CHP 机组  $t$  时刻的耗气量, 单位为 kg/h;  $LHV_{gas}$  为天然气的低位热量。

## 2 含 AA-CAES 系统的双层优化规划模型

本文采取双层规划的方法对模型进行求解,上层以容量配置成本和下层的调度成本之和最少为目标规划容量的配置,由于各个季节的冷热电负载差异较大,所以本文调度时按季节进行分类调度。下层使用上层的参数对下层的模型按季节进行调度,以供能成本和二氧化碳治理成本之和最低为目标,并将调度的结果返回到上层辅助上层容量的决策。

### 2.1 上层决策变量

本文建立的上层决策变量如式(19)所示:

$$x = \{A_{PV}, A_{SF}, P_{CAESc}, P_{CAESg}, V_v, V_h, \omega_v, \omega_h\} \quad (19)$$

式中,  $P_{CAESc}$  为压缩机的额定功率,  $P_{CAESg}$  为膨胀机的膨胀功率,  $V_v$  为储气室的体积,  $V_h$  为储热室的体积;  $\omega_v$  为储气室气体初始占比;  $\omega_h$  为储热室热水初始占比。

### 2.2 上层目标函数

本文上层的目标函数以最大化 AA-CAES 带来的净效益为目标,其表达式如(20)所示:

$$\max B_{nf} = C_{noCAES} - C_{CAES} - C_{TCC} - C_{O\&M} \quad (20)$$

式中,  $C_{noCAES}$  是未配置 AA-CAES 的用能成本,  $C_{CAES}$  是配置 AA-CAES 后的用能成本,来自于下层的调度,  $C_{TCC}$  是年化的投资成本,  $C_{O\&M}$  是系统年化的运行与维护成本。

系统的年化投资成本包括产能模块和储能模块,公式如(21)所示:

$$C_{TCC} = (P_{CAESc} C_{psc} + P_{CAESg} C_{psg} + V_v C_{ESa} + V_h C_{ESw} + A_{PV} C_{pv} + A_{SF} C_{SF}) \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (21)$$

式中  $C_{psc}$ ,  $C_{psg}$  分别为单位的压缩额定功率和膨胀额定功率的投资成本;  $C_{ESa}$  为单位储气室的投资成本;  $C_{SF}$  为单位储热室的投资成本;  $C_{PV}$  是每个光伏板的投资成本;  $C_{SF}$  是单位镜场的投资成本;  $i$  为贴现率;  $T$  为系统模块的使用寿命。

系统的年运维成本  $C_{O\&M}$  的公式如式(22)所示:

$$C_{O\&M} = C_{O\&ME} (P_{CAESc} + P_{CAESg}) + C_{O\&MPV} A_{PV} + C_{O\&MSF} A_{SF} \quad (22)$$

式中,  $C_{O\&ME}$  是单位压缩透平功率的运维成本;  $C_{O\&MPV}$  是单位光伏板的运维成本;  $C_{O\&MSF}$  是单位镜场面积的运维成本。

### 2.3 上层约束条件

上层的约束条件主要为光伏和太阳能集热的置地面积的约束,如式(23)所示:

$$A_{PV} S_{PV} + A_{SF} \leq S_{MAX} \quad (23)$$

式中,  $S_{PV}$  是单个光伏板的置地面积,  $S_{MAX}$  是最

大置地总面积。

### 2.4 下层的决策变量

本文建立下层的决策变量如式(24)所示:

$$x = \{P_{CAESc,t}, P_{CAESg,t}, P_{GT,t}, P_{b,t}, P_{cold,t}, P_{rb,t}, M_{tesc,t}, M_{tesx,t}, M_{tescold,t}\} \quad (24)$$

式中,  $P_{CAESc,t}$  是  $t$  时刻的压缩机的出力;  $P_{CAESg,t}$  是  $t$  时刻的膨胀机的出力;  $P_{GT,t}$  是  $t$  时刻燃气轮机的出力;  $P_{b,t}$  是  $t$  时刻向电网购买的电量;  $P_{rb,t}$  是  $t$  时刻热泵所消耗的电量;  $P_{cold,t}$  是  $t$  时刻用于制冷的电量;  $M_{tesc,t}$  是  $t$  时刻储存进储热室的热水质量;  $M_{tesx,t}$  是  $t$  时刻供给出去的热热水质量;  $M_{tescold,t}$  是  $t$  时刻用于吸收式制冷的热水质量。

### 2.5 下层的目标函数

本文中下层的目标函数以配置 AA-CAES 后的供能成本与二氧化碳治理成本最低为调度目标,其表达式如式(25)所示:

$$C_{CAES} = D_{spa} (P_{spa} C_e + P_{spaGT} \tau C_{gas} + P_{spab} \psi_e C_{co_2} + P_{spaGT} \tau \psi_g C_{co_2}) + D_{su} (P_{sub} C_e + P_{suGT} \tau C_{gas} + P_{sub} \psi_e C_{co_2} + P_{suGT} \tau \psi_g C_{co_2}) + D_w (P_{wb} C_e + P_{wGT} \tau C_{gas} + P_{wb} \psi_e C_{co_2} + P_{wGT} \tau \psi_g C_{co_2}) \quad (25)$$

式中,  $D_{spa}$ ,  $D_{su}$ ,  $D_w$  分别为一年中过渡季,夏季,冬季的天数;  $P_{spab}$ ,  $P_{sub}$ ,  $P_{wb}$  分别为过渡季,夏季,冬季典型日的购电量;  $C_e$  是电价,本文采取的是分时电价;  $P_{spaGT}$ ,  $P_{suGT}$ ,  $P_{wGT}$  分别为过渡季,夏季,冬季典型日的燃气轮机出力;  $\tau$  为燃气轮机出力与天然气的耗量关系系数,具体计算方法参考式(17);  $C_{gas}$  为单位天然气的购买成本;  $\psi_e$  为单位电量的  $CO_2$  的排放量;  $\psi_g$  为单位天然气燃烧释放的  $CO_2$  量;  $C_{CO_2}$  为单位  $CO_2$  的治理成本。

### 2.6 下层的约束条件

(1) 电功率平衡约束

$$P_{b,t} + P_{GT,t} + P_{WT,t} + P_{PV,t} + P_{t,t} = P_{L,t} + P_{c,t} + P_{bc,t} \quad (26)$$

式中,  $P_{WT,t}$  为风电该时刻的出力;  $P_{bc,t}$  为用于电制冷的电量;  $P_{L,t}$  为电负载的电量。

(2) 热功率平衡约束

$$H_{gl,t} + M_{tesc,t} \sigma_h + P_{SF,t} + M_{c,2} \sigma_h + P_{rb} \sigma_{er} = H_{L,t} + M_{tesc,t} \sigma_h + M_{g,2} \sigma_h + M_{tescold,t} \sigma_h \quad (27)$$

式中,  $H_{L,t}$  为  $t$  时刻的热负荷;  $M_{c,2}$  和  $M_{g,2}$  分别为压缩产热和膨胀耗热所需要的水的质量;  $\sigma_h$  为热水质量和热量的转换系数,具体参考式(6)和式(10)。

(3) 冷功率的平衡

$$P_{bc,t} \sigma_{ec} + M_{tescold,t} \sigma_h \sigma_{hc} + P_{t,cold,t} = Cold_{L,t} \quad (28)$$

式中,  $\sigma_{ec}$  为电制冷效率;  $\sigma_{hc}$  为吸收式制冷效率;  $P_{t,cold,t}$  为  $t$  时刻的膨胀机的制冷量, 具体计算可参考式(13);  $Cold_{L,t}$  为  $t$  时刻的冷负载量。

#### (4) AA-CAES 模块的约束

$$\begin{cases} 0 \leq u_{c,t} + u_{t,t} \leq 1 \\ 0 \leq P_{c,t} \leq u_{c,t} P_{CAESc} \\ 0 \leq P_{t,t} \leq u_{t,t} P_{CAESt} \\ V_{\rho_{\min}} \leq M_{a,c} u_{c,t} - M_{a,t} u_{t,t} + M_{air,t} \leq V_{\rho_{\max}} \end{cases} \quad (29)$$

式中, 第一个式子为压缩透平的工况约束,  $u_{c,t}$  和  $u_{g,t}$  分别为  $t$  时刻压缩透平的工况, 是二进制变量; 第二个式子是压缩功率的约束; 第三个式子是膨胀功率的约束; 第四个式子是储气室的约束, 其中  $M_{a,c}$  和  $M_{a,t}$  分别为压缩/膨胀时的空气质量, 具体计算可以参考式(1)和式(11),  $\rho_{\min}/\rho_{\max}$  是储气室设置的最低/最高压强所对应的空气密度。

#### (5) 热电联产约束

$$\begin{cases} \mu_{GT,t} P_{GT,\min} \leq P_{GT,t} \leq \mu_{GT,t} P_{GT,\max} \\ 0 \leq H_{gl,t} \leq H_{gl,\max} \end{cases} \quad (30)$$

其中, 第一个式子是燃气轮机的出力约束,  $\mu_{GT,t}$  是燃气轮机的启停系数, 为二进制变量;  $P_{GT,\max}$ ,  $P_{GT,\min}$  分别是燃气轮机出力的最大最小值。第二个式子是余热回收锅炉的出力约束, 式中,  $H_{gl,\max}$  是余热回收锅炉出力的最大值。

#### (6) 储热室约束

$$\begin{cases} 0 \leq \mu_{hc,t} + \mu_{hx,t} \leq 1 \\ V_{\min} \rho_w \leq M_{tesc,t} \mu_{hc,t} - M_{tesx,t} \mu_{hx,t} \\ + M_{tes,t} \leq V_h \rho_w \end{cases} \quad (31)$$

其中, 第一个式子中,  $\mu_{hc,t}$  和  $\mu_{hx,t}$  是二进制变量, 表示储热室储热/供热的工况。第二个式子中,  $V_{\min}$  是储热室设定的最小储热值;  $\rho_w$  是储热室设定温度下的密度;  $M_{tes,t}$  是  $t$  时刻的储热室的储存热水质量。

#### (7) 热泵和电制冷约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{rb} * \sigma_{er} \leq Q_{rb} \\ 0 \leq P_{bc} * \sigma_{ec} \leq Cold_{bc} \end{cases} \quad (32)$$

式中,  $Q_{rb}$  是热泵的最大输出热功率;  $Cold_{bc}$  是电制冷最大输出功率值。

#### (8) 购电约束

$$-P_{s,\max} \leq P_{b,t} \leq P_{b,\max} \quad (33)$$

式中,  $P_{b,\max}$  为最大购电量;  $P_{s,\max}$  为最大卖电量。

### 2.7 求解算法

本文使用双层规划的算法对模型进行求解, 上层使用的算法是遗传算法(GA)。总成本(调度成本加上容量成本)最小意味着净效益最大, 故

上层使用总成本最小为目标。GA 通过对决策变量进行交叉变异, 根据总成本结合精英保留策略筛选出新的父代容量值, 并将其结果传递至下层, 下层采用的是 Gurobi 求解器, 接受到上层结果后, 对下层模型进行调度, 返回调度结果至上层辅助决策容量。算法的流程图如图所示:

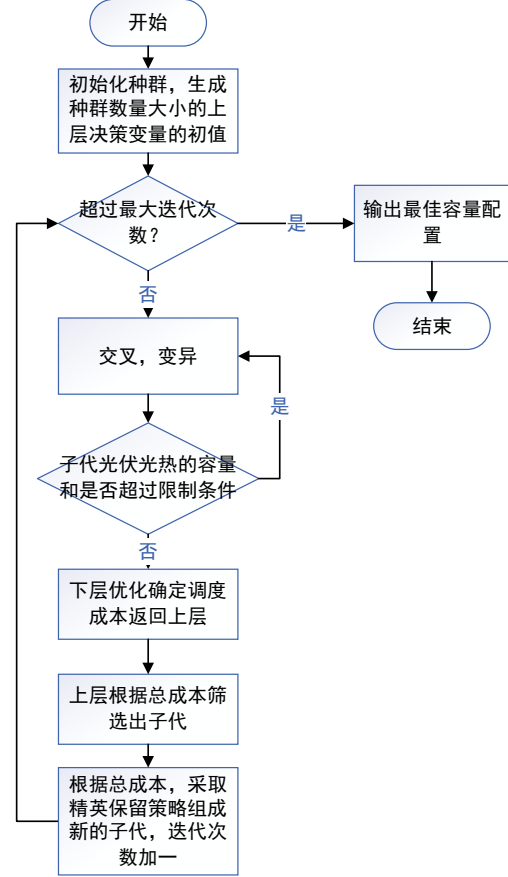


图3 双层规划算法流程图

Fig3 Chart of two-level programming algorithm

## 3 算例分析

### 3.1 参数设置

根据图一的微综合能源系统能流图, 针对含压缩空气储能的 CCHP 微综合能源系统, 以中国北方地区冬季、夏季和过渡季的典型负荷为例, 配置系统光伏、光热、AA-CAES 的容量。各个季节的负荷、风电出力、光照辐射强度的曲线图见附录中的图 C1-C5。光热集热参数的选取如附录的表 A1 所示。系统中的热电联产、热泵、电制冷机的参数如附录中表 A2 所示。本文的压缩膨胀级数选取 4 级压缩, 4 级膨胀, AA-CAES 系统的具体参数如附录中表 A3 所示, 各个设备的单位建设成本如表 A4 所示。本文中, 典型日的时长为 24h, 调度的步长为 1h, 假设系统运行年限为 20 年, 系统的贴现率为 8%。本文电价采用分时电价, 峰时段(10:00-12:00、16:00-22:00)买电价格为 1.35 元(kWh), 卖电价格

为 1.03 元/(kWh);平时段 (07:00-10:00、12:00-16:00 以及 22:00-23:00) 的买电价格为 0.90 元/(kWh), 卖电价格为 0.67 元/(kWh), 谷时段 (23:00 至次日 07:00) 的买电价格为 0.40 元/(kWh), 卖电价格为 0.27 元/(kWh), 购气价格统一为 2.01 元/ $\text{m}^3$ , 燃气轮机和电网的  $\text{CO}_2$  排放量和治理成本的如附表 A5 所示。

### 3.2 结果分析

本文采用 MATLAB 进行仿真, 使用双层规划的算法对模型进行求解。求解出的各设备的容量值, 配置 AA-CAES 后系统的投资成本和调度成本以及未配置 AA-CAES 系统的调度成本如表 1 所示:

表 1 AA-CAES 的容量配置结果及成本

Table 1 Capacity configuration and the costs of the system

| 容量规划结果                | 取值   | 费用          | 取值      |
|-----------------------|------|-------------|---------|
| 光伏板占地面积/ $\text{m}^2$ | 1100 | 储能系统的投资成本/元 | 2863890 |
| 镜场占地面积/ $\text{m}^2$  | 896  | 含储能的调度成本/元  | 3348047 |
| 压缩额定功率/kW             | 690  | 配置前调度成本/元   | 4374189 |
| 膨胀额定功率/kW             | 321  | 配置后带来的效益/元  | 1026142 |
| 储气室额定体积/ $\text{m}^3$ | 427  | 储能系统回本年限/年  | 3       |
| 储气室初始体积比              | 0.7  |             |         |
| 储热室额定体积/ $\text{m}^3$ | 125  |             |         |
| 储热室初始体积比              | 0.3  |             |         |

从表 1 可以看出, 在配置 AA-CAES 后, 系统的调度成本得到降低, 虽然 AA-CAES 的前期投资成本较高, 但是 AA-CAES 的运行寿命较长, 从表中的数据可得, 压缩空气储能装置大约 3 年后能收回其投资成本。AA-CAES 参与冷热电联储联供, 压缩产生的热能直接供给热用户, 其效率较加热空气后用于膨胀发电更高; 透平后的低温气体用于供冷, 近一步提升了其能效。

系统配置 AA-CAES 后, 不同季节各个出力模块的调度情况如图 4-6 所示。

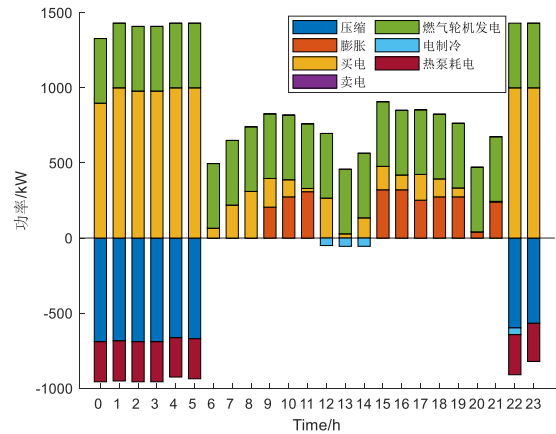


图 4 冬季电能调度结果

Fig 4 Electric power scheduling in winter

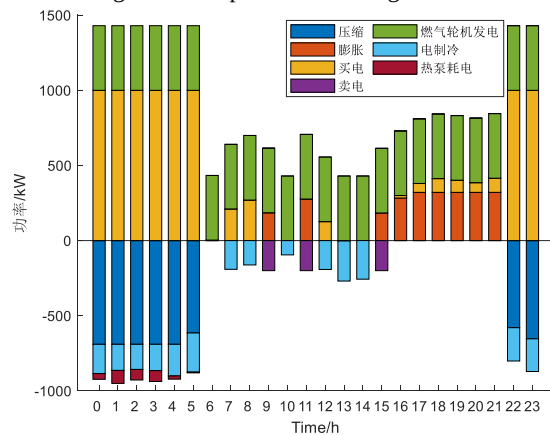


图 5 夏季电能调度结果

Fig 5 Electric energy scheduling in summer

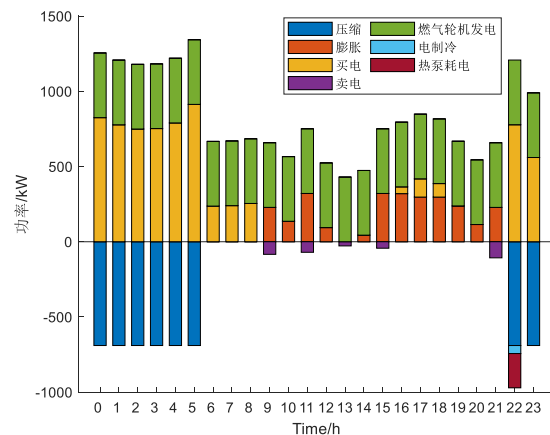


图 6 过渡季电能调度结果

Figure 6 Electric energy scheduling in transition season

图 4, 图 5, 图 6 分别为冬季、夏季、过渡季的电能调度情况。由图可以看出, 燃气轮机作为优质电力输出设备, 一般以较大负荷运行; AA-CAES 储能设备的压缩时段一般发生在低谷电时段, 该时段也是向电网大量购电的时段, 表明 AA-CAES 良好的填谷作用, 其膨胀时段发生



在高峰电时段, 且向电网卖电的时刻一般也发生在该时刻, 表明 AA-CAES 良好的削峰作用。

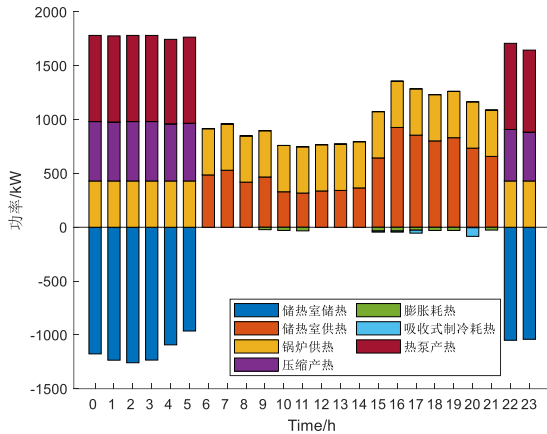


图 7 冬季热能调度结果

Fig 7 Thermal energy scheduling in winter

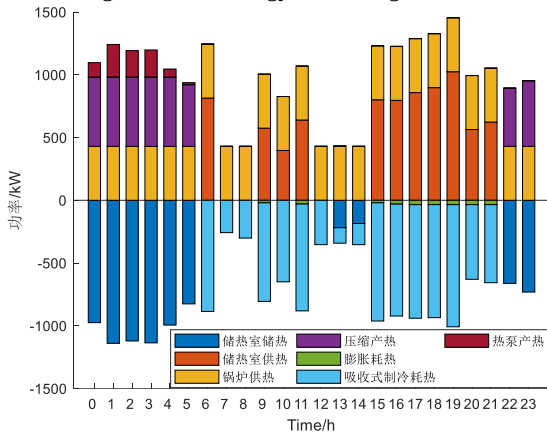


图 8 夏季热能调度结果

Figure 8 Thermal energy scheduling in summer

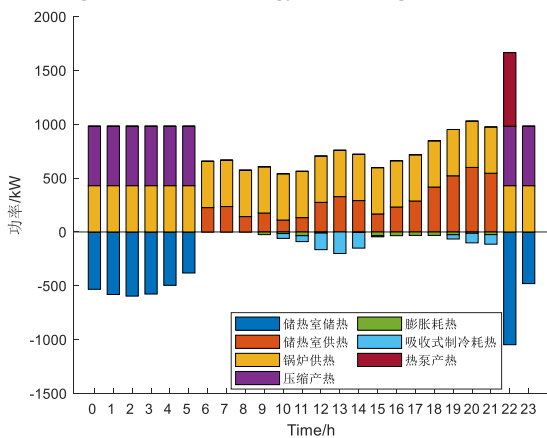


图 9 过渡季热能调度结果

Fig 9 Thermal energy scheduling in transition season

图 7, 图 8, 图 9 分别为冬季、夏季、过渡季的热能调度情况。从图中可以看出, 由于燃气轮机的高负荷运行, 余热锅炉的产热量也较高; 电泵产热和压缩产热都发生在低谷电时期, 虽然这些时刻的热量需求也相对较低, 但是可以将多余的热量储存进储热室, 在用热高峰释放, 这样就避免购入高价电用于制热引起调度成本变高。

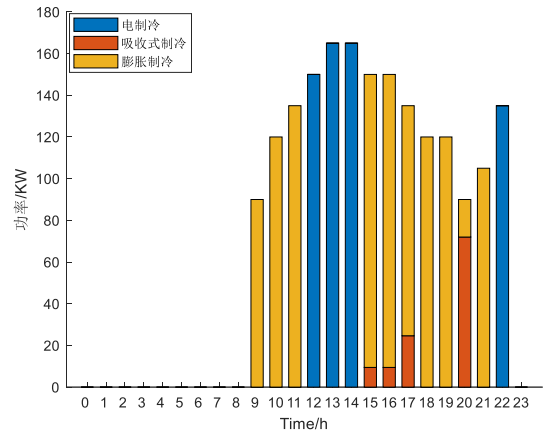


图 10 冬季冷能调度结果

Fig 10 Cold energy scheduling in winter

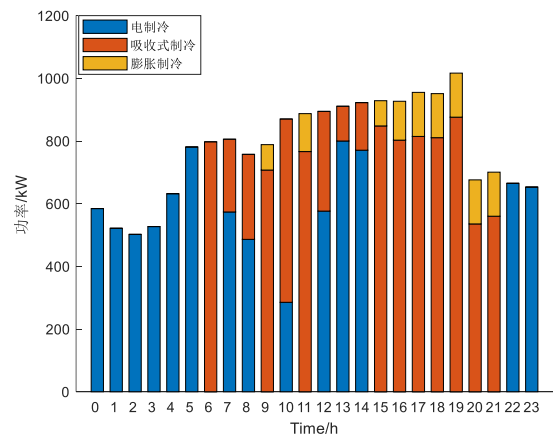


图 11 夏季冷能调度结果

Fig 11 Cold energy scheduling in summer

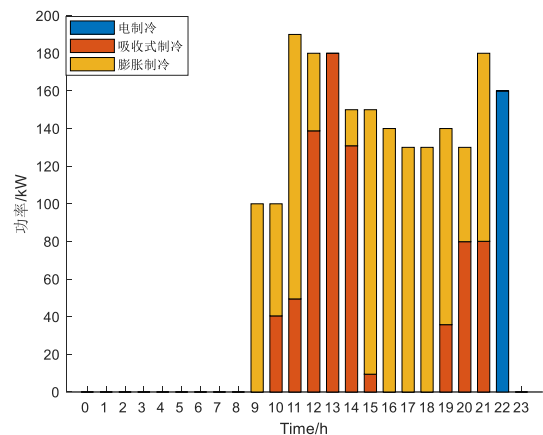


图 12 过渡季冷能调度结果

Fig 12 Cold energy scheduling transition season

图 10, 图 11, 图 12 分别为冬季、夏季、过渡季的冷能的调度情况, 由图可得, 在冬季时由于热能需求较大, 主要由电制冷和膨胀制冷满足需求; 过渡季由于电力需求较高, 主要由吸收式制冷和电制冷满足需求; 夏季时, 膨胀主要发生在高峰电时期, 和吸收式制冷和电制



冷联合供冷。从图中可以看出, AA-CAES 能在每个季节都能通过膨胀稳定供冷。

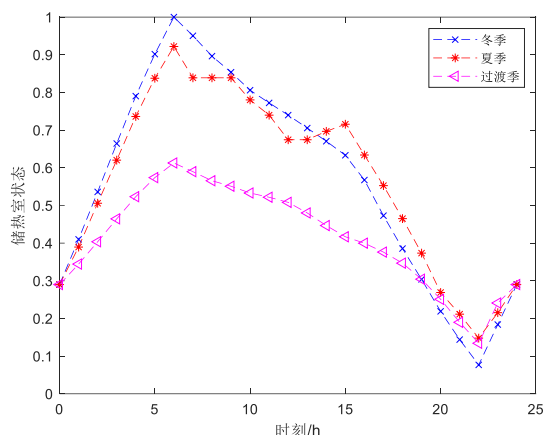


图 13 储热室热水储存状态

Fig 13 State of hot water in heat storage chamber

由图 13 可得, 冬季、夏季、过渡季的最佳初始储热占比为 0.3, 且一天过后, 储热室能够回到最初的储热量。

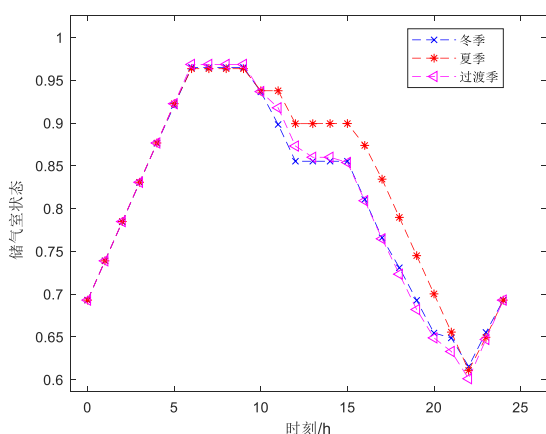


图 14 储气室储气状态

Fig 14 State of the air storage chamber

由图 14 可得, 储气室的最佳初始气体占比为 0.7。因为电价低谷时期, 向电网购电较多, 所以有大量电被存进 AA-CAES, 故这个时间段储气室储气量增长较快。经过一天, 储气室储气量能恢复至初始值。

## 5 结论

本文在 CCHP 微综合能源系统中考虑了 AA-CAES 的冷热电联供能力, 建立了含 AA-CAES 的微综合能源系统模型。采取双层规划的算法, 外层优化光伏/光热/AA-CAES 容量配置, 内层按季节分别进行优化调度, 并对模型进行求解, 仿真结果表明:

(1) AA-CAES 天然的冷热电联供能力能很好地与 CCHP 微综合能源系统相匹配,

增强了微综合能源系统多能耦合供能的灵活性与经济性;

(2) AA-CAES 与 PV/PT 协同优化更高效地实现了热能与电能的高效利用。使 AA-CAES 的总投资成本能在较短时间内得到回收;

(3) 优化了 AA-CAES 储气与储热初始占比, 证明储气储热初始占比值是一个对系统容量规划有影响的数值。

## 参考文献:

- [1] Lai S M, Hui C W. Integration of Trigenation System and Thermal Storage under Demand Uncertainties[J]. Applied Energy, 2010, 87: 2868-2880.
- [2] Liu M, Shi Y, Fang F. Combined Cooling, Heating and Power Systems: a Survey[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2014, 35: 1-2.
- [3] Mago PJ, Chamra LM. Analysis and Optimization of CCHP Systems based on Energy, Economical and Environmental Considerations[J]. Energy & Buildings, 2009, 41(10): 1099-1106.
- [4] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域新型电力系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(04): 113-120+141.  
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation Optimization of Regional Integrated Energy System with CCHP and Energy Storage System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(04): 113-120+141.
- [5] International Energy Agency. Renewable Energy Medium-term Market report 2014-market analysis and forecast to 2020[R]. Paris, France: 2014.
- [6] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 194-207.  
JIANG Haiyang, DU Ershun, ZHU Guiping, et al. Review and Prospect of Seasonal Energy Storage for Power System with High Proportion of Renewable Energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 194-207.
- [7] 梅生伟, 李瑞, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2893-2907.  
MEI Shengwei, LI Rui, CHEN Laijun, et al. An

- Overview and Outlook on Advanced Compressed Air Energy Storage Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2893-2907.
- [8] 吴晨曦, 陈泽昊, 张杰, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能的风力发电系统成本 / 供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 62-71.  
WU Chenxi, CHEN Zehao, ZHANG Jie, et al. Cost / Power Supply Reliability Assessment of Wind Power Generation System Considering Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 62-71.
- [9] 吴晨曦, 何章露, 叶剑雄, 洪晗笑. 基于烟评估的多能流节能调度. 电力科学与工程. 2021, 37(8): 41-50.  
WU Chenxi, HE Zhanglu, YE Jianxiong, HONG Hanxiao. Energy-saving Scheduling of Multi-energy Flow Based on Exergy Evaluation[J]. Electric Power Science and engineering, 2021, 37(8): 41-50.
- [10] 白珈于, 薛小代, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能热电联供模式下的运行可行域分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 79-85.  
BAI Jiayu, XUE Xiaodai, CHEN Laijun, et al. Operation Feasible Region Analysis of Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage under Thermal-electric Co-generation Mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 79-85.
- [11] ZAFIRAKIS D, KALDELLIS J K. Autonomous Dual-mode CAES Systems for Maximum Wind Energy Contribution in Remote Island Networks[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(11): 2150-2161.
- [12] 宁光涛, 李琳玮, 何礼鹏, 陈明帆, 郑柱. 面向绿色海岛微型综合能源系统的储能系统容量规划方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(02): 8-15.  
NING Guangtao, LI Linwei, HE Lipeng, CHEN Mingfan, ZHENG Zhu. Capacity Planning Method of Energy Storage System for Micro Integrated Energy System in Environmental Friendly Islands[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(02): 8-15.
- [13] 蔡杰, 张松岩, 杜治, 等. 含光热集热模块的先进绝热压缩空气储能系统容量配置策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 165-171.  
CAI Jie, ZHANG Songyan, DU Zhi, et al. Capacity Allocation Strategy of Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage System with Solar Thermal Collector Module[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7) 165-171.
- [14] HE W, WANG J H, DING Y L. New Radial Turbine dynamic Modelling in a Low-temperature Adiabatic Compressed Air Energy Storage System Discharging Process[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 153: 144-156.
- [15] WANG S X, ZHANG X L, YANG L W, et al. Experimental Study of compressed Air Energy Storage System with Thermal Energy Storage[J]. Energy, 2016, 103: 182-191.
- [16] COCCO D, SERRA F. Performance Comparison of Two-tank Direct and Thermocline Thermal Energy Storage Systems for 1 MW Class Concentrating Solar Power Plants[J]. Energy, 2015, 81: 526-536.

#### 作者简介:

吴晨曦(1978-), 女, 河北唐山人, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向: 新型电力系统电压频率主动支撑, 储能系统优化运行与规划, 综合能源系统低碳规划与调度等相关研究 (Email: wuchenxi@hdu.edu.cn), 电话: 13754327837;

尤慰 (1999-), 江西上饶人, 硕士研究生, 主要从事新型电力系统优化调度相关研究 (E-mail:13697934952@163.com);

## 附录

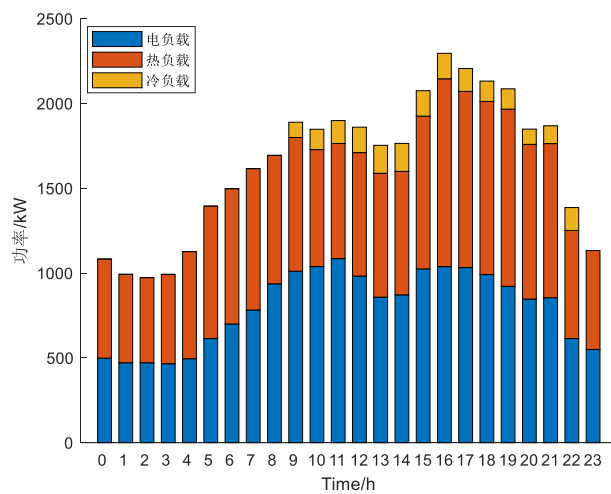


图 C1 冬季冷热电负荷

Fig C1 Cooling, heating and power load in winter

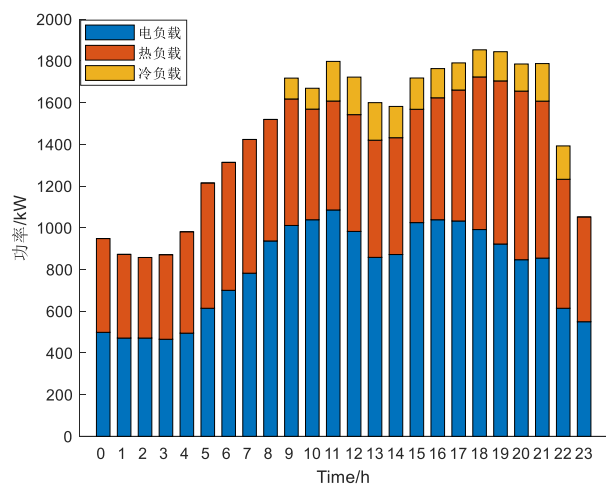


图 C2 过渡季冷热电负荷

Fig C2 Cooling, heating and power load in winter

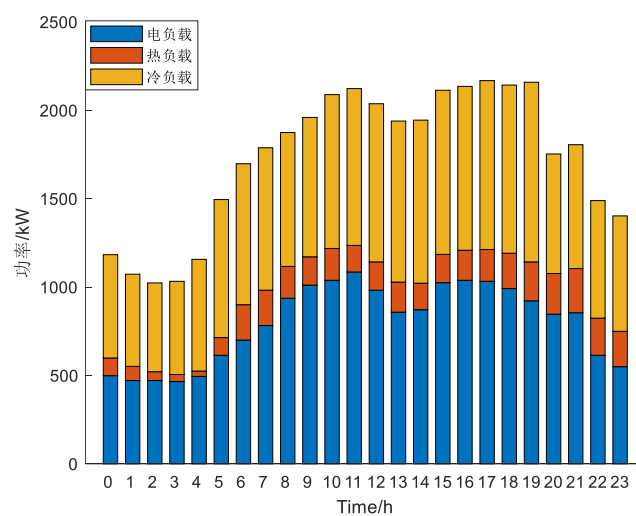


图 C3 夏季冷热电负荷  
Fig C3 Cooling, heating and power load in winter

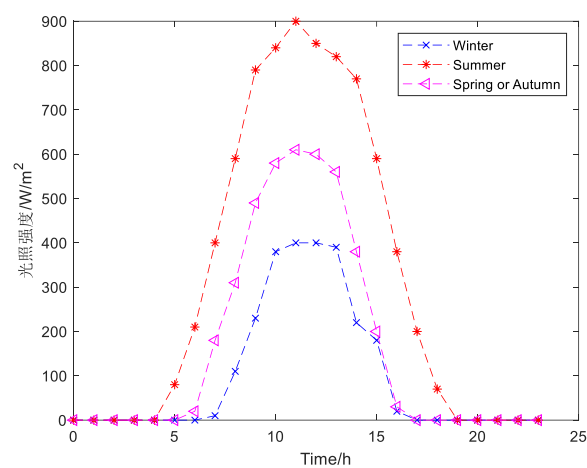


图 C4 光照强度曲线  
Fig C4 Solar radiation intensity

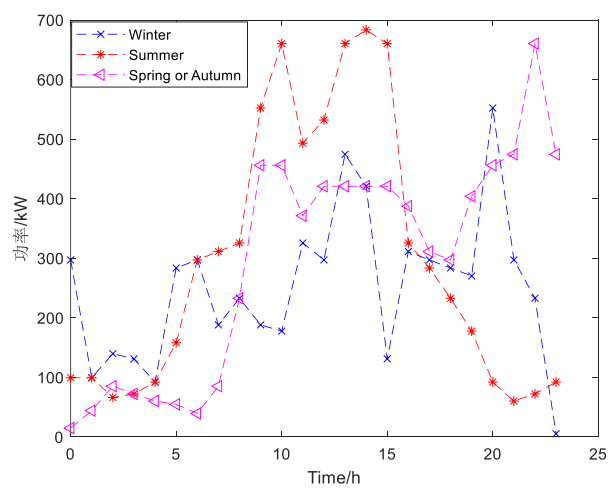


图 C5 各季节风电出力  
Fig C5 Wind power generation in each season

表 A1 光热集热模块参数  
Table A1 Parameters of solar collector

| 参数                | 数值    |
|-------------------|-------|
| 参考光学效率            | 0.67  |
| 镜面及玻璃管清洁度系数       | 0.98  |
| 太阳能冷却换热器系数        | 0.7   |
| 单元聚光集热反射镜的长度/ $m$ | 180   |
| 单元聚光集热反射镜的焦距/ $m$ | 16.56 |

表 A2 已安装设备的基本参数  
Table A2 Operation parameters of installed equipment

| 设备   | 参数                  | 数值  |
|------|---------------------|-----|
| 燃气轮机 | 出力上限/(kW)           | 430 |
|      | 出力下限/(kW)           | 100 |
|      | $LHV_{gas}$ (MJ/kg) | 50  |
| 热泵   | 制热效率                | 0.8 |
|      | 供热上限 (kW)           | 800 |
|      | 制冷效率                | 0.8 |
| 电制冷机 | 供冷上限(kW)            | 800 |

表 A3 CAES 的参数  
Table A3 Parameters of AA-CAES

| 参数                  | 值      |
|---------------------|--------|
| 环境温度 $T/K$          | 293    |
| 环境压强 $P_0$ (pa)     | 100000 |
| 每级压比 $\pi_c$        | 3.16   |
| 每级膨胀比 $\pi_t$       | 3.16   |
| 换热器效能 $\varepsilon$ | 0.8    |
| 压气机的等熵效率 $\eta_c$   | 0.75   |
| 膨胀机的等熵效率 $\eta_t$   | 0.8    |

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 气体的定压比热容 $C_p$ (J/(kg · K)) | 1    |
| 水的比热容 $C_w$ (J/(kg · K))    | 4200 |
| 换热介质水的质量 $m_w$ (kg)         | 10   |
| 空气的比热容比 $\gamma$            | 1.4  |
| 储气室气压上限/bar                 | 100  |
| 储气室气压下限/bar                 | 60   |

表 A4 各设备单位的投资成本

Table A4 Per unit investment cost of the equipments

| 参数                                     | 值    |
|----------------------------------------|------|
| 单位压缩功率投资成本/(元 · kW <sup>-1</sup> )     | 2340 |
| 单位膨胀（透平）功率投资成本/(元 · kW <sup>-1</sup> ) | 1950 |
| 单位体积储气室投资成本/(元 · m <sup>-3</sup> )     | 180  |
| 单位体积热水罐投资成本/(元 · m <sup>-3</sup> )     | 800  |
| 单位功率运行与维护成本/(元 · kW <sup>-1</sup> )    | 66   |
| 单位镜场面积投资成本/(\$·m <sup>-2</sup> )       | 130  |

表 A5 二氧化碳相关参数

Table A5 Parameters of the CO<sub>2</sub>

| 设备   | 设备参数     | 值             |
|------|----------|---------------|
| 燃气轮机 | 二氧化碳排放量  | 0.16kg/(kWh)  |
| 电网   | 二氧化碳排放量  | 0.616kg/(kWh) |
|      | 二氧化碳治理成本 | 0.11 元/(kWh)  |



文章编号: 中图分类号: 文献标志码: 学科代码:

# 构网型电化学储能参与系统一次调频的控制方法

田嘉成<sup>1</sup>

(1. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

## Control Method for Primary Frequency Regulation of Grid-Connected Electrochemical Energy Storage Participation System

TIAN Jiacheng<sup>1</sup>

(1. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** The large-scale grid connection of photovoltaics has intensified the frequency regulation pressure on the power grid. The inherent randomness and volatility of photovoltaic power generation increase the uncontrollability of the power output on the power grid side, leading to an exacerbation of the imbalance in active power on the grid and consequently increasing the frequency regulation pressure on the grid. Therefore, the participation of photovoltaic power generation in grid frequency regulation and peak shaving, as well as the enhancement of the controllability of photovoltaic power plants, are important issues in the context of large-scale photovoltaic grid integration. This study investigated a control strategy for a solar energy storage system participating in grid frequency regulation and peak shaving. The energy storage battery determines the reference power based on the grid frequency and peak shaving periods. The state of charge of the energy storage battery is partitioned to ensure that the energy storage battery can coordinate between frequency regulation and peak shaving modes. A control strategy based on the state of charge feedback is designed for the energy storage battery to optimize the output characteristics of the energy storage battery. A model of the solar energy storage system is built in MATLAB/Simulink software, and case studies are conducted to validate the effectiveness of the comprehensive control strategy for the solar energy storage system participating in grid frequency regulation and peak shaving.

**KEY WORDS:** Photovoltaic power generation, energy storage systems, frequency regulation, peak shaving.

**摘要:** 光伏大规模并网加剧了电网的调频压力。光伏发电本身的随机性和波动性增加了电网电源侧出力的不可控性, 导致电网有功功率不平衡性加剧, 从而增加了电网的调频压力。因此光伏发电参与电网调频调峰和提高光伏电站的发电可控性, 是大规模光伏并网形势下的重要课题。本文研究了一种光储系统参与电网调频和调峰的控制策略。储能电池根据电网频率以及调峰时段确定参考功率。对储能电池的荷电状态进行了分区, 确保储能电池能够协调调频/调峰两种模式。设

计储能电池基于荷电状态反馈的储能电池出力约束系数, 优化储能电池的出力特性。在 MATLAB/Simulink 软件中搭建光储系统模型, 进行算例仿真, 验证所提的光储系统参与电网调频/调峰的综合控制策略的有效性。

**关键词:** 光伏发电, 储能系统, 调频, 调峰

**DOI:**

## 0 引言

近年来, 高比例新能源并网改变了电网中的电源结构比例。以风电和光伏为代表的可再生能源通过电力电子设备接口大量并网, 将会导致电网惯量降低, 增加电网在遭遇故障扰动下发生频率失稳的风险。新时代下可再生能源的接入规模将会影响我国电力系统稳定性, 而频率稳定作为电网安全运行的先决条件, 不参与调频的可再生能源发电比例越高, 越不利于电力系统的频率稳定控制。因此, 如何保障电网在调峰运行时的频率稳定控制尤为重要。此外, 新能源发电是随机和不可控的, 这增加了电网在调峰运行时的调频压力, 影响系统运行安全性。

在新能源参与调峰调频方面, 目前主要的研究主要有光伏/风电单独参与调频, 和光伏/风电配合储能联合系统参与调峰调频两种方式。然而, 这种光伏/风电单独参与调频的方式, 其效果与光伏/风电出力情况密切相关, 预留出力的调频方式会导致弃光、弃风、系统经济性变差, 且考虑到光伏/风电出力的波动性和随机性, 此方式不宜作为电力系统的主要调频方式。因此上述调频方式尚未得到实际的推广和应用。

若在光伏电站中加入储能电池, 建立光储联合发电控制系统, 使储能电池承担主要调峰调频任

务, 光伏配合储能进行调频, 可以避免光伏系统单独参与调频时需要预留出力的不经济问题或风电单独参与调频的频繁动作问题, 且由于储能电池充放电的可控性和稳定性, 光储联合系统参与调峰调频的可靠性更高, 更能增强电力系统的整体稳定性。

本文提出建立光储联合发电控制模型和综合控制策略, 并通过仿真试验验证了方案的有效性和可行性。

## 1 构网型电化学储能参与系统一次调频的控制策略

### 1.1、光储联合系统模型

建立如图 1 所示的共直流母线光储联合系统模型, 光伏电池经过光伏并网逆变器并网, 储能电池经过储能 DC/DC 和光伏并网逆变器并网。该系统在原光伏并网结构上增加了储能电池和储能 DC/DC, 储能并网利用了光伏逆变器的剩余容量, 节省了光伏电站改建成本。此系统安装简单, 配置灵活, 成本低, 效率高, 可以兼容目前主流光伏并网发电系统。

图 1 中, 光伏并网逆变器分为两级, 前一级为 DC/DC Boost 电路, 采集光伏电池输出电流和直流母线电压, 用于直流电压的调整和最大功率跟踪, 在光照和温度变化时仍能获得光伏电池的最大的输出功率; 后一级为三相全桥式 DC/AC 变换器, 其输出功率经过升压后并网。

实际光伏电站中, 光伏并网逆变器中的 DC/DC Boost 换流器使用了单向开关管, 因此光伏并网逆变器只支持功率由光伏侧向电网侧单向流动。储能换流器为 DC/DC Boost 电路, 根据本文提出的控制策略来实现储能电池的充放电。

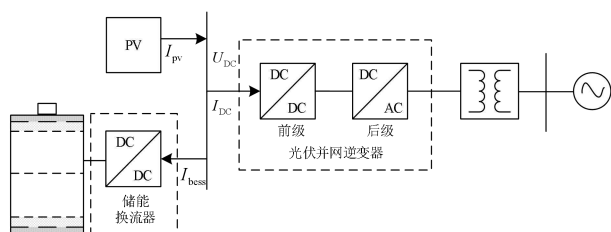


图 1 共直流母线光储系统模型

Fig. 1 Model of Shared DC Bus Photovoltaic Energy Storage System

### 1.2、综合控制策略

根据电网频率的不同, 储能电池可以工作于调频/调峰 2 种工作模式。在这两种模式下, 风光储联合系统的控制包括三个主要环节:

(1) 光伏系统采用 MPPT 控制, 光储协调控制系统检测电网频率, 判定频率是否处于调频死区。

(2) 电网频率处于调频死区内时, 储能电池运行于调峰模式, 此时依据电网给出的调峰时段, 控制储能电池充放电; 电网频率超出调频死区时, 储能电池运行于调频模式, 根据频率偏移方向得到储能电池初级参考功率。

(3) 与逆变器空闲容量比较, 取两者中较小值作为储能电池次级参考功率, 经储能电池最大出力约束系数优化后作为储能电池最终参考功率。得到的综合控制策略流程如图 2 所示。

图 2 中, 带箭头的实线为功率传输线, 带箭头的虚线为信号传输线。 $f$  为系统检测到的电网频率,  $\Delta f = f - 50$ ,  $P_{pv}$  为光伏出力,  $P_{VSC}$  为逆变器最大容量,  $P'_{VSC}$  为逆变器空闲容量,  $P'_{ess}$  为储能电池初级参考功率,  $P''_{ess}$  为储能电池次级参考功率,  $P_{ess}$  为储能电池最终参考功率。 $\lambda_{SOC}$  为储能电池最大出力约束系数。

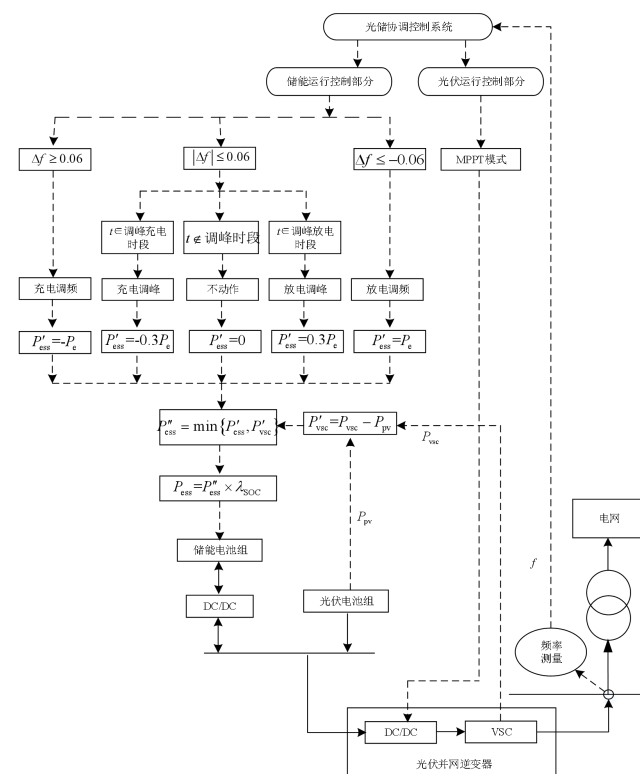


图 2 综合控制流程

Fig. 2 Integrated Control Process

## 2 储能电池能量管理策略

### 2.1 储能电池荷电状态分区

基于光储系统参与电网调频/调峰综合控制策略,设计储能电池的荷电状态分区,在本文所提出的控制策略中,调频模式的优先级高于调峰模式。为确保在调峰过程中储能电池为调频模式留有容量裕度,对储能电池的荷电状态进行分区时,考虑以下两种情况:

(1) 储能电池过充/过放会损伤电池,为避免此情况,调频模式下储能电池充放电的荷电状态区间为 $(SOC_{\min}, SOC_{\max})$ ,充电达到上限 $SOC_{\max}$ 时不再充电,放电达到下限 $SOC_{\max}$ 时不再放电。

(2) 为确保储能电池在调峰模式下为调频模式留有容量裕度,因此设定储能电池在调峰模式下,充电上限为 $SOC_{\text{high}}$ ,放电下限为 $SOC_{\text{low}}$ 。

得到储能电池荷电状态分区如图3所示。

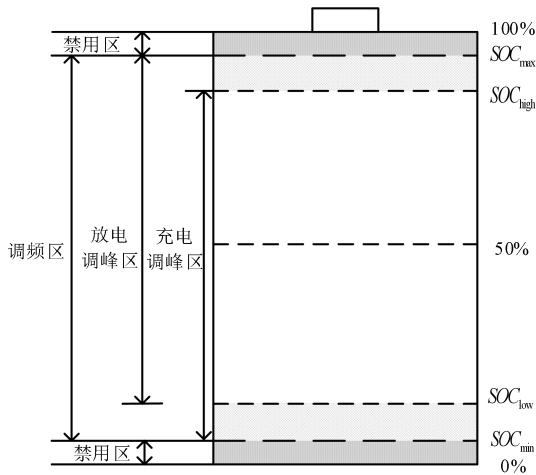


图3 储能电池荷电状态分区

Fig. 3 State of Charge Partitioning for Energy Storage Batteries

## 2.2 储能电池调峰模式数学模型

在调峰模式下,储能电池充放电的时长在小时级,因此储能电池可以根据自身容量大小,采取较小功率进行充放电,以此来延长储能电池的使用寿命。在实际工程中,未考虑荷电状态约束时,调峰模式下通常设置0.3倍储能电池额定功率为初级参考功率进行充放电。

根据调度中心指令,在保证储能电池不过充/过放的前提下,为储能电池的调频模式留有一定容量裕度。因此设置储能电池在调峰模式下的初级参考功率与荷电状态约束为:

$$P'_{\text{ess}} = \begin{cases} -0.3P_c, \{t \in (\text{充电时段}), SOC \in (SOC_{\min}, SOC_{\text{high}})\} \\ 0.3P_c, \{t \in (\text{放电时段}), SOC \in (SOC_{\text{low}}, SOC_{\max})\} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_c$ 表示储能电池的额定功率,规定放电为正方向。

## 2.3 储能电池调频模式数学模型

在电网频率超出调频死区后,储能电池运行于调频模式。调频模式要求储能电池能够在短时间内尽可能多吸收或发出功率来支撑电网频率,因此,调频模式下设置储能电池以额定功率进行充放电。

在保证不过充/过放的前提下,储能电池根据电网频率的偏移方向进行充放电,设置储能电池在调频模式下的初级参考功率与荷电状态约束为:

$$P'_{\text{ess}} = \begin{cases} -P_c, \{\Delta f > 0.06, SOC \in (SOC_{\min}, SOC_{\max})\} \\ P_c, \{\Delta f < -0.06, SOC \in (SOC_{\min}, SOC_{\max})\} \end{cases} \quad (2)$$

## 2.4 逆变器最大容量对储能电池参与调频/调峰的约束

本文所提控制策略中,光伏始终运行于MPPT模式,为保证光伏出力能够全部并网,储能电池参与调频/调峰时应利用逆变器空闲容量 $P'_{\text{vsc}}$ , $P'_{\text{vsc}}$ 如公式(3)所示:

$$P'_{\text{vsc}} = P_{\text{vsc}} - P_{\text{pv}} \quad (3)$$

因为逆变器最大容量大于光伏满发功率,所以 $P'_{\text{vsc}} > 0$ 。

当储能电池充电时 $P'_{\text{ess}} < 0$ ,功率不经过逆变器,不用考虑逆变器容量限制;

当储能电池放电时 $P'_{\text{ess}} > 0$ ,功率经过逆变器输送到电网,需要考虑逆变器最大容量限制。

因此,储能电池的次级参考功率 $P''_{\text{ess}}$ 如公式(4)所示:

$$P''_{\text{ess}} = \min\{P'_{\text{vsc}}, P'_{\text{ess}}\} \quad (4)$$

## 2.5 基于SOC反馈的储能电池最大出力约束设计

储能电池响应电网调频/调峰需求时,如果以恒功率充放电,会导致储能电池无法完全充满或完全释放电能,从而浪费储能电池的容量,造成经济损失。因此,应设计合理的储能电池最大出力约束系数 $\lambda_{\text{soc}}$ ,使储能电池以变化的充放电功率参与电网的调频/调峰。

(1) 当储能电池荷电状态较高时( $SOC > 50\%$ ),按照 $P''_{\text{ess}}$ 进行放电;当放电到储能电池荷电状态较低时( $SOC < 50\%$ ),为充分利用储能电池容量以及避免过放,储能电池以 $P''_{\text{ess}}$ 乘以一个小于1的 $\lambda_{\text{soc}}$ 进行放电,且 $\lambda_{\text{soc}}$ 随荷电状态下降而越小。

(2) 当储能电池荷电状态较低时( $SOC < 50\%$ ),按照 $P''_{\text{ess}}$ 进行充电,当充电到储能电池荷电状态较

高时 ( $SOC > 50\%$ ), 为充分利用储能电池容量以及避免过充, 储能电池以  $P_{\text{ess}}''$  乘以一个小于 1 的  $\lambda_{\text{SOC}}$  进行充电, 且  $\lambda_{\text{SOC}}$  随荷电状态上升而减小。

所以充放电状态下,  $\lambda_{\text{SOC}}$  如公式(5)、(6)和图 4 所示。

充电状态下:

$$\lambda_{\text{SOC}} = \begin{cases} 1 & SOC \in [5\%, 50\%] \\ 1 - \frac{|SOC - 50\%|}{50\%} & SOC \in (50\%, 95\%] \end{cases} \quad (5)$$

放电状态下:

$$\lambda_{\text{SOC}} = \begin{cases} 1 - \frac{|SOC - 50\%|}{50\%} & SOC \in [5\%, 50\%] \\ 1 & SOC \in (50\%, 95\%] \end{cases} \quad (6)$$

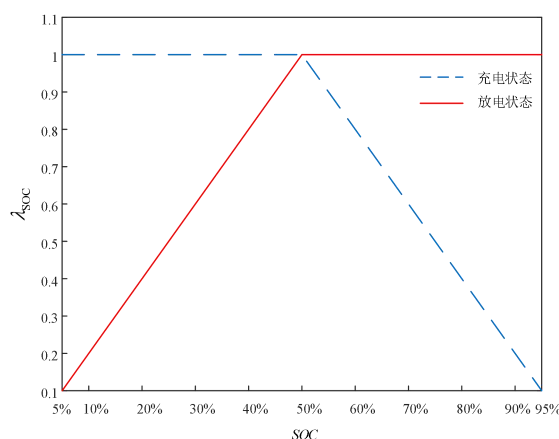


图 4 储能电池最大出力约束系数

Fig. 4 Maximum Output Constraint Coefficient of Energy Storage Battery

储能电池最终参考功率与荷电状态约束关系式为:

$$P_{\text{ess}} = P_{\text{ess}}'' \times \lambda_{\text{SOC}} \quad (7)$$

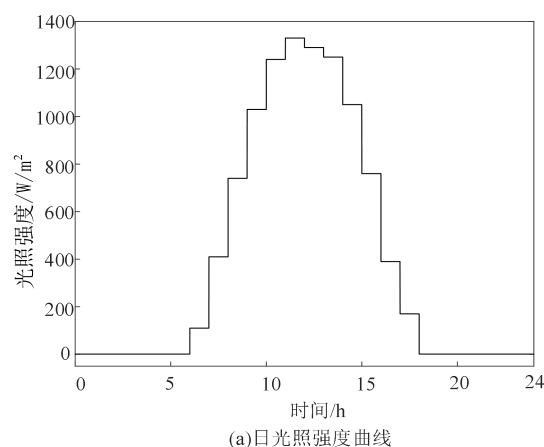
综上, 当储能电池出力以上述最大出力约束系数进行优化时, 可以保证储能电池具有快速响应的能力, 同时又能充分利用储能电池的容量并且避免储能电池过充/过放, 延长储能电池的使用寿命。

### 3 算例仿真

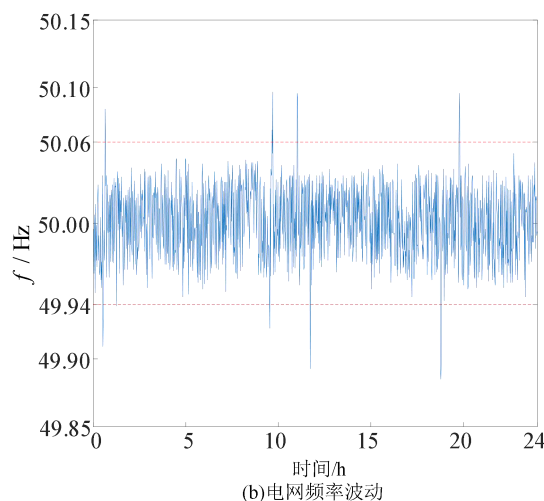
#### 3.1 仿真参数设置

根据图 5 在 MATLAB/Simulink 软件中搭建光储系统仿真模型。其中光伏电池满发功率为 30kW, 储能电池额定容量为 300Ah, 额定参考功率为 10kW, 逆变器容量为 30kW, 且有 10% 的过载能力, 即逆变器最大功率为 33kW。设置  $SOC_{\text{max}} = 95\%$ ,  $SOC_{\text{min}} = 5\%$ , 考虑到一天中储能电池在调频模式下动作时间短, 设置调频预留容量为储能电池容量的 10%, 即  $SOC_{\text{high}} = 85\%$ ,

$SOC_{\text{low}} = 15\%$ 。设置典型日环境温度为 25 摄氏度, 日光照强度曲线如图 5 (a)所示, 电网频率波动如图 5 (b)所示:



(a)日照强度曲线



(b)电网频率波动

图 5 仿真环境设置

Fig. 5 Simulation Environment Setup

#### 3.2 调峰模式充放电时间设置

储能电池运行在调峰模式时需要根据调度中心的指令设置储能电池的充放电时段, 本文算例以某省的负荷峰平谷时段来代表调度中心指令, 如表 1 所示:

| 表 1 某省的负荷峰谷时段                                      |               |                         |
|----------------------------------------------------|---------------|-------------------------|
| Table 1 Peak and Valley Load Periods in a Province |               |                         |
| 负荷状态                                               | 时段            |                         |
| 峰                                                  | 9:00—12:00    | 17:00—22:00             |
| 平                                                  | 8:00—9:00     | 12:00—17:00 22:00—23:00 |
| 谷                                                  | 23:00—次日 8:00 |                         |

由于储能电池所吸收的能量来自于光伏, 因此储能电池的充放电时段设置, 除负荷变化规律外还要考虑光照强度变化规律。

首先, 从早上光伏开始出力到第一个负荷峰时段之前, 设置为储能电池充电时段。本文算例中, 6:00 开始有光照强度, 故 6:00-9:00 设置为储能电池充电时段。

其次, 12:00-17:00, 此时段光照强度较强, 是一天中光伏出力较多的时段, 设置储能电池在此时段充电, 这也是一天中储能电池充电的主要时段。

再次, 在负荷高峰时段设置储能电池放电。

基于此, 设置储能电池工作在调峰模式下, 充放电时段如表 2 所示。

表 2 储能电池调峰模式下充放电时段  
Table 2 Charging and discharging periods of energy storage batteries in peak shaving mode.

| 储能电池状态 | 时段         |             |
|--------|------------|-------------|
| 放电     | 9:00—12:00 | 17:00—22:00 |
| 充电     | 6:00—9:00  | 12:00—17:00 |

### 3.3 典型工况仿真结果

在图 6 所示仿真环境下, 依据本文所提综合控制策略, 光储系统出力情况如图 6(a)所示, 储能电池荷电状态如图 6(b)所示。

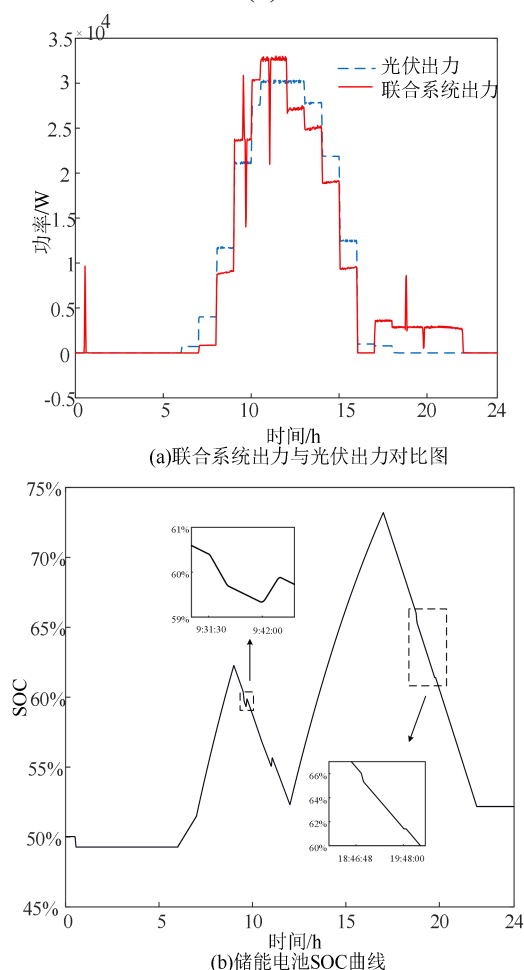


图 6 典型工况仿真结果

Fig. 6 Simulation Results of Typical Operating Conditions

根据储能电池的充放电策略, 在 0:00-6:00 之间, 负荷处于平时段, 储能电池不需要放电, 且由于光伏没有出力, 储能电池不充电。但是, 在 0:31:12 和 0:38:24, 电网扰动导致频率分别下

降到 49.91Hz 和上升到 50.09Hz。由图 6 可以看到, 当频率为 49.91Hz 时, 储能荷电状态为 50%, 储能电池以 10kW 的功率放电参与调频; 但是当频率高于 50.06Hz 时, 由于光伏没有出力, 因此储能电池无法充电参与调频。

6:00-9:00 为充电时段, 储能电池充电。由图 6 可以看到, 6:00-7:00 光伏出力为 0.72kW, 小于储能电池参考功率 3kW, 因此, 储能电池以 0.72kW 的功率充电, 此时荷电状态上升较慢; 7:00-9:00, 光伏出力为 4kW, 7:00 时储能电池荷电状态为 51.5%, 储能电池以 2.91kW 的功率充电, 此期间荷电状态上升较快。受荷电状态约束, 充电功率在 7:00-9:00 逐渐下降至 2.56kW, 光储系统出力逐渐增加。

9:00-12:00 为放电时段, 由图 6 可以看到储能电池在此期间荷电状态在 50%以上, 储能电池以恒功率 3kW 放电参与调峰。

由图 6 可以看到, 9:31:30 频率跌落至 49.92Hz, 超出调频死区, 此时储能电池的荷电状态为 61.5%, 储能电池以 10kW 的功率放电参与调频; 9:42:00 频率上升到 50.1Hz, 此时储能电池荷电状态为 59.3%, 因此以 8.14kW 的功率充电参与调频; 11:12:00 频率上升到 50.11Hz, 此时储能电池的荷电状态为 55%, 因此以 9kW 的功率充电参与调频; 11:43:11 频率跌落至 49.89Hz, 但此时光储系统总出力已经达到逆变器最大功率 33kW, 储能电池无法放电参与调频。

12:00-17:00 处于充电时段, 由图 6 可以看到, 储能电池的荷电状态在此期间由 52.3% 升至 73.5%, 受荷电状态约束, 储能电池充电功率由 2.86kW 降至 1.59kW。

17:00-22:00 处于调峰放电时段, 由图 6 可以看到储能电池在此期间荷电状态在 50%以上, 以恒功率 3kW 放电参与调峰。18:46:48 频率跌落至 49.89Hz, 超出调频死区, 此时, 储能电池的荷电状态为 65%, 因此以 10kW 的功率放电参与调频; 19:48:00 频率上升到 50.1Hz, 由于此时没有光伏出力, 储能电池无法充电, 所以储能电池此时停止放电参与调频。

图 7 是经过光储系统调峰调频后的频率波动



图,从图中可以看出经过本文的方法调频后,电网的频率数值明显降低,较调频前有很大改善。

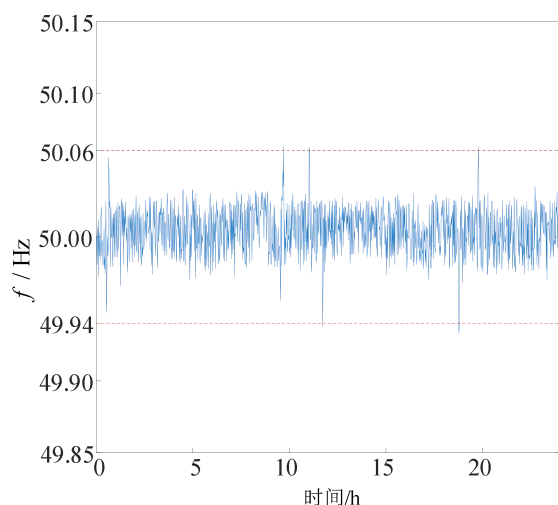


图 7 调频后的频率波动

**Fig. 6 Frequency Fluctuations After Frequency Regulation**

## 5 结论

为了解决调频时风电频繁动作导致系统的不经济性,本文提出了一种光储联合系统,通过仿真试验,表明其能够响应系统的综合控制策略,能够参与电力系统一次调频并在系统频率偏离正常值较多时,快速充放电,为电网频率提供支撑;当系统频率处于调频死区内,储能电池按照负荷的变化规律,调整充放电功率,减轻常规机组的调峰负担。对频率波动有很大的改善,基本保持在 $\pm 0.06\text{Hz}$ 范围内,改善效果显著。

## 参考文献

- [1] Wind Power Capacity Worldwide Reaches 600 GW, 53.9 GW add in 2018, World Wind Energy Association[EB/OL]. <http://wwindea.org/blog/2019/0225/Wind-power-capacity-world-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/>.
- [2] 国务院,《国务院关于促进光伏产业健康发展的若干意见》[S]. 2013.
- [3] 张雪莉,刘其辉,马会萌,等. 光伏电站输出功率影响因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 05:75-81.
- [4] Eftekharijad S., Vittla V., Heydt G.T., et al. Small signal stability assessment of power systems with increased penetration of photovoltaic generation: a case study[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 960-967.
- [5] 马智慧,李欣然,谭庄熙,等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [6] 雷鸣宇,杨子龙,王一波,等. 光/储混合系统中的储能控制技术[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23):86-92.
- [7] Zarina P., Mishra S., Sekhar P.C. Exploring frequency control capability of a PV system in a hybrid PV-rotating machine-without storage system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 60(6): 258-267.
- [8] Xin H.H., Liu Y., Wang Z., et al. A new frequency regulation strategy for photovoltaic systems without energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4):985-993.
- [9] 孙冰莹,杨水丽,刘宗歧,等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [10] 邓浩,周念成,王强刚,等. 光伏并网功率调节系统的建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17):62-66.



收稿日期:

作者简介:

田嘉成(2001年),男,硕士研究生,研究方向为电力系统宽频振荡分析, E-mail: 1362649283@qq.com;



# 基于有限时间事件触发一致性的微电网经济调度策略研究

杨珩<sup>1</sup>, 吴丽珍<sup>1</sup>, 刘信哲<sup>1</sup>, 鲍云鹏<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃兰州 730050)

## Distributed coordination control of microgrid system based on event-triggered consensus algorithm

YANG Heng<sup>1</sup>, WU Li-zhen<sup>1</sup>, Liu Xinzhe<sup>1</sup>, Bao Yunpeng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050 China)

**ABSTRACT:** The microgrid system, as a small-scale networked control system comprising multiple distributed power sources (DG), is susceptible to high load fluctuations, a high communication sampling rate, and slow convergence, which collectively impede the achievement of cost optimal operation of the system. In light of the aforementioned challenges, this paper puts forth an economic dispatch strategy for microgrids with an enhanced event-triggered method. The finite-time consensus algorithm and event-triggered control method are combined together, and the event-triggered function is designed according to the state information of DG. Furthermore, the finite-time consistency protocol is employed to get the optimal solution for the incremental cost rate of DG. Finally, simulation results based on the IEEE 33-bus system are presented to illustrate the effectiveness of the proposed method.

**KEY WORDS:** microgrid; event-triggered control; CPS; finite-time consensus; economic dispatch

**摘要:** 微电网系统作为一种包含多种分布式电源(DG)的小规模网络化控制系统, 存在负荷波动大、通信采样率高、收敛速度慢等问题, 难以实现系统的成本最优化运行。为此, 本文提出基于有限时间事件触发一致性的微电网经济调度策略。将有限时间一致性算法与事件触发控制策略相结合, 根据分布式电源的状态信息设计事件触发函数, 并采用有限时间一致性协议得到分布式电源微增成本率最优解。最后, 通过IEEE33节点系统验证了所提控制方法的有效性。

**关键词:** 微电网; 事件触发控制; CPS; 有限时间一致性; 经济调度

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.60117

## 0 引言

随着传统化石燃料的日益枯竭, 以太阳能、风能等再生能源为代表得可持续替代能源得到了广泛应用。微电网作为一种收集分布式可再生能源并促进当地可再生能源消费的电网, 近年来得到了蓬勃发展[1-2]。然而由于微电网系统中分布式电源较多, 且新能源发电设备有一定的运行成本, 如何在满足系统供需平衡的前提下实现运行成本最优, 合理的分配系统的有功功率输出是亟待解决的问题。

传统微电网控制策略大都采用集中式的控制方法, 通过专用通信信道对整个微电网进行全局感知的集中式控制, 增强了微电网的稳定性[3-4]。但是随着微电网系统的规模不断扩大, 集中式的控制策略需要占用大量的通信带宽, 不再满足经济性要求。分布式控制方法因其良好的可扩展性和低带宽需求逐渐成为微电网系统主流控制手段[5]。为了增强微电网系统的经济性, 降低系统的运行成本。文献[6]提出了一种基于领导-跟随多智能体系统的有限时间一致性算法, 有效降低了微电网的整体经济调度成本。文献[7]提出了一种分布式的协调控制策略, 实现了微电网系统的负荷可以按比例分配并且将系统的发电成本最小化。文献[8]通过有限时间一致性的分层经济调度策略实现分布式电源以经济最优的状态运行。

尽管上述文献有效解决了微电网系统的经济调度问题, 但是并未考虑降低系统的通信次数, 弥补集中式控制在大规模微电网系统的弱点。文献[9]通过基于状态控制通信宽度的事件触发控制器, 有效解决了微电网系

统的不稳定问题。文献[10]提出了通过基于事件触发机制,实现了微电网的分布式协同控制。文献[9-10]虽然降低了微电网中的通信负担,但是并未考虑系统的收敛速度。

在上述研究的基础上,本文提出一种基于有限时间事件触发一致性的微电网经济调度策略。应用有限时间一致性算法求解微电网系统中分布式电源的微增成本率,根据分布式电源的状态信息设计事件触发函数,并采用分布式有限时间一致性协议设计控制器。利用 Lyapunov 稳定性理论分析了控制系统的稳定性,并分析了 Zeno 现象。最后,搭建仿真平台,验证了所提方法的优越性。

## 2 微电网系统经济调度模型

考虑含一个含有  $n$  台 DG 的微电网系统,微电网中的经济调度问题是如何选择 DG 的出力,以最小的发电成本满足功率平衡要求。令  $C_i(P_i(t))$  表示系统中 DG 的发电成本函数,则有:

$$C_i(P_i(t)) = \alpha_i P_i^2(t) + \beta_i P_i(t) + \sigma_i \quad (1)$$

式中,  $\alpha_i, \beta_i, \sigma_i$  分表表示系统中第  $i$  台 DG 的发电成本系数。由于经济调度问题的目标为获得运行成本的最优解,因此可以将微电网经济调度的最小发电成本表示为:

$$\min C(P(t)) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i P_i^2(t) + \beta_i P_i(t) + \sigma_i] \quad (2)$$

系统的供需平衡约束与发电容量限制:

$$\begin{aligned} s.t. \sum_{i=1}^n P_i(t) &= \sum_{i=1}^n P_i(0) = D \\ P_i^{\min} &\leq P_i \leq P_i^{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $P_i$  表示第  $i$  台 DG 输出的有功功率,  $C(P(t))$  表示微电网系统的总发电成本,  $P_i(0)$  表示初始值,  $D$  表示微电网系统的总负荷需求,  $P_i^{\min}$  和  $P_i^{\max}$  分别为第  $i$  台 DG 的最小有功出力,和最大有功出力。

定义如下的拉格朗日函数

$$\begin{aligned} L(P_i, \lambda, \frac{P}{q}) &= \sum_{i=1}^N C_i(P_i) + \lambda \left( D - \sum_{i=1}^N P_i \right) \\ &+ \mu_i \sum_{i=1}^N (P_i - P_i^{\max}) + \nu_i \sum_{i=1}^N (P_i^{\min} - P_i) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\mu_i$  和  $\nu_i$  是对应于不等式约束的拉格朗日乘子; 式(2)和(3)的最优解为:

$$\begin{aligned} P_i^* &= \frac{\lambda^* - \beta_i}{2\alpha_i} \\ \lambda^* &= \frac{D + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{2\alpha_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\alpha_i}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $P_i^*$  为微电网系统的全局最优解, 令  $P^* = [P_1^*, P_2^*, \dots, P_n^*]$ 。

## 3 有限时间事件触发一致性经济调度策略

### 3.1 经济调度事件触发控制器设计

为求解对应的优化问题,微电网系统中 DG 的动力学方程可以被描述为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = u_i(t) \\ P = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j - x_i) + P_i(0) \\ u_i(t) = -r_1 \text{sign}[\Phi_i(t_k^i)]^\mu - r_2 \text{sign}[\Phi_i(t_k^i)]^\nu \\ \Phi_i(t_k^i) = \sum_{j \in N_i} a_{ij}[\varphi_j(t_k^j) - \varphi_i(t_k^i)], \varphi_i = \frac{\partial C_i(P_i)}{\partial P_i} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $\Phi_i$  和  $\varphi_i$  均为辅助变量, 且  $\varphi_i$  表示系统中第  $i$  台 DG 的微增成本率。

微电网的每个组成部分可视为节点, DG(分布式发电)之间的通信链路可视为边。因此,微电网系统的通信拓扑可描述为无向图。

由式(6)可得,  $\sum_{i=1}^n P_i(t) = -1_n^T Lx + D = D$ ,  $1_n^T L = 0$ ,  $L$  为拉普拉斯矩阵。因此式(6)恒满足系统的功率供需平衡和发电容量限制。第  $i$  台 DG 的测量误差可表示为:

$$\begin{aligned} E_i(t) &= r_1 \text{sign}[\Phi_i(t_k^i)]^\mu + r_2 \text{sign}[\Phi_i(t_k^i)]^\nu \\ &- r_1 \text{sign}[\Phi_i(t)]^\mu - r_2 \text{sign}[\Phi_i(t)]^\nu - \varepsilon h_i(t) r_3^i(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$r_3^i(t) = \theta + r_1 |\Phi_i(t)|^\mu + r_2 |\Phi_i(t)|^\nu$$

式中,  $h_i(t) = 0, t = t_k^i, h_i(t) = \text{sign}[\Phi_i(t)], t \neq t_k^i, i = 1, \dots, n$ ,  $\theta, r_1, r_2, \varepsilon$  为常数且  $\theta > 0, r_1 > 0, r_2 > 0, \varepsilon \in (0, 1)$ 。

第  $i$  台 DG 控制器的事件触发函数可以表示为

$$\begin{aligned} g_i(t) &= |E_i(t)| - \varepsilon r_1 \text{sign}|\Phi_i(t)|^\mu - \varepsilon r_2 \text{sign}|\Phi_i(t)|^\nu \\ &- \varepsilon r_3^i(t) \end{aligned} \quad (8)$$

当  $g_i(t) \geq 0$  时, 达到触发条件。将测量误差以矢量形式进行表示:

$$\begin{aligned} E(t) &= r_1 \text{sign}[\Phi(t_k)]^\mu + r_2 \text{sign}[\Phi(t_k)]^\nu \\ &- r_1 \text{sign}[\Phi(t)]^\mu - r_2 \text{sign}[\Phi(t)]^\nu - \varepsilon h(t) r_3(t) \end{aligned}$$

(9)

$$h(t) = \begin{cases} 0, & t = t_k^i \\ \text{disg}[\text{sign}(\Phi(t))], & t \in (t_k^i, t_{k+1}^i) \end{cases} \quad (10)$$

$$r_3(t) = \theta 1_n + r_1 |\Phi(t)|^\mu + r_2 |\Phi(t)|^\nu \quad (11)$$

则系统的事件触发函数可以表示为:

$$g(t) = |E(t)| - \varepsilon r_1 \text{sign} |\Phi(t)|^\mu - \varepsilon r_2 \text{sign} |\Phi(t)|^\nu - \varepsilon r_3(t) \quad (12)$$

由于系统的通信拓扑为无向连通图, 因此系统的经济调度问题可以由式(13)在有限时间内求解出系统的最小运行成本。

$$\begin{aligned} \hat{T} = & \frac{1}{(1-\varepsilon)r_1 2^{\frac{1-\mu}{4}} (M\lambda_2^2)^{\frac{\mu+1}{2}} (1-\frac{3+\mu}{4})} \\ & + \frac{1}{(1-\varepsilon)r_2 n^{\frac{1-\nu}{2}} 2^{\frac{1-\nu}{4}} (M\lambda_2^2)^{\frac{\nu+1}{2}} (\frac{3+\nu}{4}-1)} \end{aligned} \quad (13)$$

由式(2)和式(3)可得:

$$\min C(x) = \sum_{i=1}^n C_i [\sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_j - x_i) + P_i(0)] \quad (14)$$

对无约束的  $x(t)$ , 可以将经济调度问题转化为对偶优化问题, 因此式(11)的最优解可表示为  $x^* = [x_1^*, \dots, x_n^*]^T$ 。

对式(6)进行求导, 可得:

$$\frac{\partial P_j}{\partial x_j} = \begin{cases} -\sum_{j=1}^n a_{ij}, & j=i \\ a_{ij}, & j \neq i \end{cases} \quad (15)$$

由此, 系统运行的最优成本可表示为:

$$\frac{\partial C_i}{\partial x_j} = \frac{\partial C_i}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial x_j} = \begin{cases} -\sum_{j=1}^n a_{ij} \varphi_i, & j=i \\ a_{ij} \varphi_i, & j \neq i \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $\nabla C(P) = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^T$ 。  $C(x)$  的梯度及其 Hessian 矩阵可表示为:

$$\nabla C(x) = -LV C(P) = \Phi \quad (17)$$

### 3.2 芝诺现象分析

通过式(7)可得,

$$\begin{aligned} \|\dot{E}(t)\| \leq & (1+\varepsilon)r_1\mu \|\nabla^T C(x)^{\mu-1} \nabla \dot{C}(x)\| \\ & + (1+\varepsilon)r_2\nu \|\nabla^T C(x)^{\nu-1} \nabla \dot{C}(x)\| \end{aligned} \quad (18)$$

$$\|\nabla^T C(x)^{\mu-1} \nabla \dot{C}(x)\| \leq \sum_{i=1}^n \|\nabla C_i(x_i)^{\mu-1} \nabla \dot{C}_i(x_i)\| \quad (19)$$

由柯西不等式, 式(19)进一步写为如下形式:

$$\|\nabla^T C(x)^{\mu-1} \nabla \dot{C}(x)\| \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n \|\nabla C_i(x_i)\|^{2(\mu-1)}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \|\nabla \dot{C}_i(x_i)\|^2} \quad (20)$$

式中, 令  $W(t) = \nabla \dot{C}_i(x_i)^{2(\mu-1)}$ , 则有  $W(t) \rightarrow 0$ ,  $\nabla \dot{C}_i(x_i(t)) \rightarrow \nabla \dot{C}_i(x_i^*) = 0$ 。令  $Y(t) = \nabla \dot{C}_i(x_i)^2$ , 则有  $\|\nabla C(x)\| = \|LV^2 C(P) Lu(t)\|$ ,  $\nabla C(x) \rightarrow 0_n$ ,  $u(t) \rightarrow 0_n$ ,  $Y(t) \rightarrow 0$ 。同理可得,  $\exists T_1, T_2 \in [0, T]$ ,  $nZ(T_1) \geq \sum_{i=1}^n \nabla C_i(x_i)^{2(\mu-1)}$ ,  $Z(T_1) = \max_i \nabla C_i(x_i)^{2(\mu-1)}$ ,  $Y(T_2) \geq Y(t)$ ,  $nY(T_2) \geq \|\nabla \dot{C}(x)\|^2$ 。

由此可得,  $\|\dot{E}(t)\| \leq \delta$ , 即  $|\dot{E}(t)| \leq \frac{\delta}{\sqrt{n}}$ 。根据事件触发条件和式(11), 可得

$$|E(t)| \geq \varepsilon r_1 \text{sign}(\Phi_i)^\mu + \varepsilon r_2 \text{sign}(\Phi_i)^\nu + \varepsilon r_3^i(t) \quad (21)$$

$$\varepsilon \theta \leq |E_i(t_{k+1}^i)| \leq \int_{t_k^i}^{t_{k+1}^i} \frac{\delta}{\sqrt{n}} ds \quad (22)$$

将  $t = t_{k+1}^i$  代入上式, 得到

$$t_{k+1}^i - t_k^i \geq \frac{\sqrt{n}\varepsilon\theta}{\delta} \quad (23)$$

可以证明系统能够在有限时间内避免芝诺现象的产生。

## 4 仿真分析

为了验证有限时间事件触发一致性控制方法的有效性, 采用 IEEE33 节点测试系统进行仿真分析。IEEE33 节点电力网络结构和系统中各 DG 间的通信拓扑如图 1 和图 2 所示, 设置五台 DG, 且每台 DG 存在出力上下限约束。



图1 IEEE33节点电力网络结构

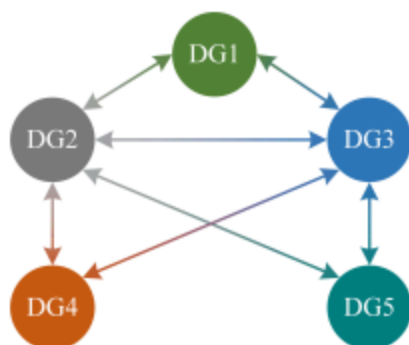


图2 DG通信拓扑结构

DG 的参数见表 5.1 所示。

表 1 微电网系统 DG 参数值

|    | 成本系数 (元/kW <sup>2</sup> ·h) |           |            | 功率上下限 (kW)  |             |
|----|-----------------------------|-----------|------------|-------------|-------------|
|    | $\alpha_i$                  | $\beta_i$ | $\sigma_i$ | $P_{i,min}$ | $P_{i,max}$ |
| DG | 0.056                       | 1.030     | 45.24      | 350         | 1000        |
| DG | 0.061                       | 1.435     | 32.24      | 325         | 1300        |
| DG | 0.043                       | 1.453     | 57.32      | 400         | 1500        |
| DG | 0.072                       | 0.957     | 27.45      | 325         | 1250        |
| DG | 0.064                       | 1.104     | 36.73      | 375         | 1500        |

根据图 2 所示的 DG 通信拓扑,可以得到其拉普拉斯矩阵  $L$  为

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 4 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 4 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

为测试控制系统的动态性能,在 0~2s 内,只加入一次下垂控制;在 2s 时加入分布式有限时间事件驱动一致性控制,且在 6s 和 10s 时负载发生变化。

为测试有限时间事件触发一致性经济调度策略下系统的动态性能,设定如下的两种运行工况:

工况一:仿真验证在无负荷变化下,所提经济调度方法的有效性;

工况二:仿真验证在负荷变化后,所提优化调度方法在有限时间内的控制性能。

#### 4.1 无负荷变化经济调度仿真分析

为分析有限时间事件触发一致性经济调度策略的有效性,设置五台 DG 同时出力。总负荷需求为 3715kW,各台 DG 的有功功率输出最优值及微增成本率的调度结果如图 3 和图 4 所示。从图 3 中可以看出,当微电网系统在稳定运行时,DG1~DG5 的最优有功功率出力分别为 870.2kW、595kW、500kW、1000kW、750kW,而微电网系统总负荷需求为 3715kW,因此当系统中各台 DG 的输出功率趋于稳定时,可以满足供需平衡,并且各台 DG 均未达到出力的上下限约束。本文提出的有限时间事件驱动一致性经济调度方法在 1.5s 内就获得了有功功率输出值的最优解。

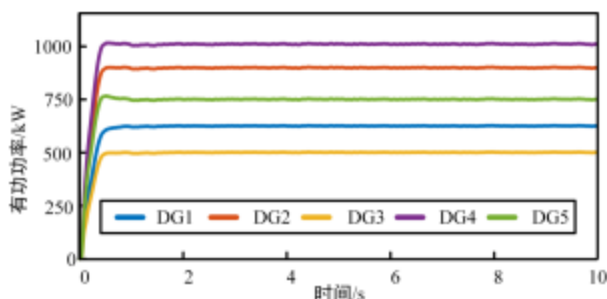


图 3 有功功率输出最优值

图 4 表示的是微电网系统中所有 DG 的微增成本率收敛到一致值的情况。从图 4 中可以看出,本文所提的有限时间事件驱动一致性经济调度方法在 1.5s 内就使所有 DG 收敛到一致值。

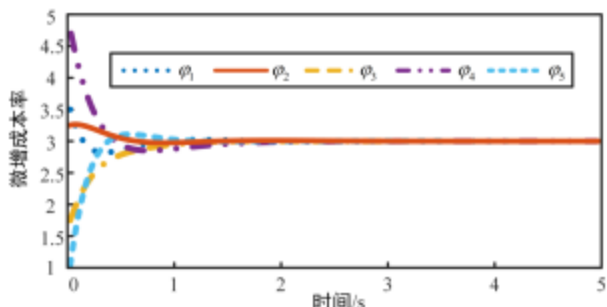


图 4 微增成本率

有限时间事件驱动一致性经济调度策略的事件触发时间如图 5 所示。

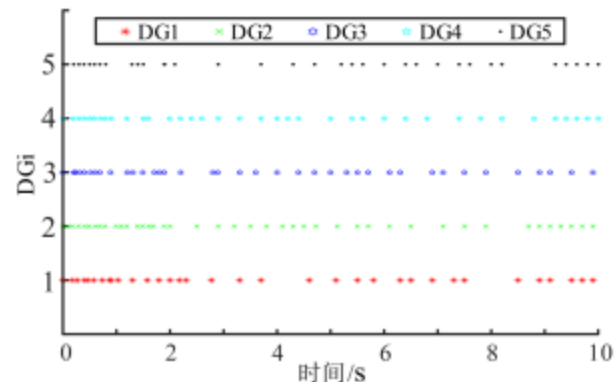


图 5 无负荷变化事件触发时间

从图 5 中可以看出,在 0~1.5s 内,因各台 DG 根据微增成本率使有功功率输出达到最优值,所以事件触发次数较多。当输出趋于稳定之后,事件触发次数明显减少。

事件驱动的非周期性采样与时间驱动的周期性采样次数对比如表 2 所示,从表 2 中可以看出,所提方法与周期性采样的方法相比,由于各分布式电源在事件触发时进行采样,所以采样次数明显减少,有效降低了通信次数,降低对网络带宽的要求。

表 2 通信次数对比

|    |     | 有限时间事件触发<br>次数 | 时间触发<br>次数 |
|----|-----|----------------|------------|
| DG | DG1 | 41             | 150        |
|    | DG2 | 52             | 150        |
|    | DG3 | 38             | 150        |
|    | DG4 | 44             | 150        |
|    | DG5 | 33             | 150        |

#### 4.2 负荷变化经济调度仿真分析

为验证所提方法在负荷变化时的动态性能,在  $t=4s$  时增加 520kW 的负荷需求;并在  $t=8s$  时减少 880kW 的负荷需求,仿真波形如图 5.6 所示。

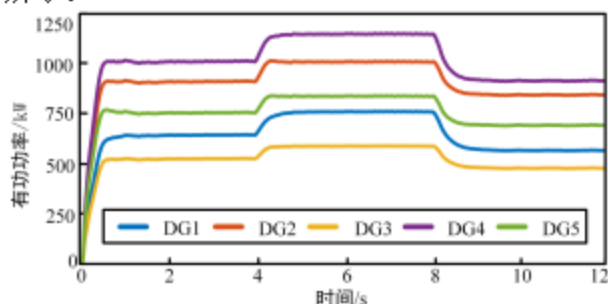


图 6 负荷变化有功功率输出最优值

从图 6 中可以看出,当系统中负荷发生变化时,各台 DG 的输出有功功率也有所变化,系统增加的负荷根据各台 DG 的成本微增量在 DG1~DG5 中优化分配,系统总的发电出力满足系统总负荷,并且没有超过各台 DG 的发电出力上下限约束,表明所提方法对 DG 的经济调度具有较好的鲁棒性。

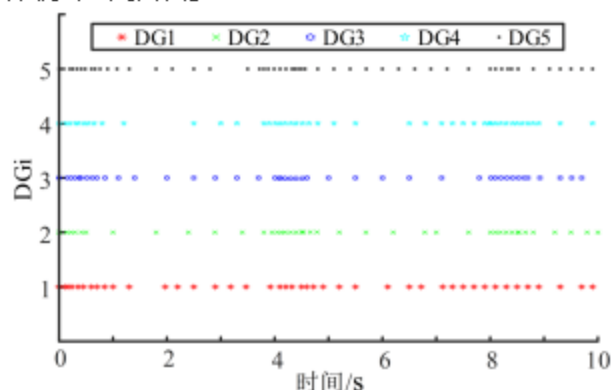


图 7 负荷变化事件触发时间

图 7 表示微电网系统中负荷变化时的事件触发时间。从图 7 中可以看出,当负荷发生变化时,由于三次控制需要根据各台 DG 的成本微增量控制其发电出力情况,所以各台 DG 的采样次数在负荷变化时明显增多。

#### 5 结论

本文针对微电网系统,存在负荷波动大、通信采样率高、系统收敛速度慢等问题,提出了基于有限时间一致性的事件触发经济调度策略。建

立以最小化微电网系统中 DG 的总运行成本的目标函数,同时考虑各 DG 的出力约束和系统中有功功率的供需平衡关系,构建经济调度模型。采用有限时间事件触发一致性策略,使各台 DG 的微增成本率在有限时间内趋于一致,实现各台 DG 最优有功出力的求解,确保微电网系统的总发电成本最低。最后,通过仿真验证了所提方法的有效性。未来将进一步考虑网络攻击下的经济调度策略。

#### 参考文献

- [1] Valentyna L, Alfredo I, Manuel C. M, et al. Study of the use of biogas as an energy vector for microgrids[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 200, 114574, 2024.
- [2] Md S. A, Md A H, Md S, et al. Renewable energy integration with DC microgrids: Challenges and opportunities[J]. Electric Power Systems Research, Vol 234, 110548, 2024.
- [3] N. L. Diaz, A. C. Luna, J. C. Vasquez et al. Centralized Control Architecture for Coordination of Distributed Renewable Generation and Energy Storage in Islanded AC Microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 7, pp. 5202-5213, 2017.
- [4] 赵国鹏, 刘思远, 周昕炜, 等. 基于柔性多状态开关的配电网电压波动平抑策略[J]. 高电压技术, vol 46, no.4, 2020.
- [5] Zhao C, Wang C, Cheng Z, et al. Optimal Distributed Coordinated Reinforcement Learning for Secondary Voltage Control in Time-Delayed Microgrid[J]. IEEE Systems Journal, vol. 17, no. 3, pp. 3480-3491, 2023.
- [6] 曹晓, 李泽, 崔国增. 孤岛微电网固定时间分布式鲁棒二次控制[J]. 电力系统保护与控制, vol 52, no.12, pp.143-153, 2024.
- [7] 李浩宇, 张春, 吴零晨, 等. 基于改进有限时间一致性的微电网经济优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, pp.1-12, 2024.
- [8] 刘永忠, 刘斌, 谢周腾. 直流微电网在事件触发非周期间歇控制下的镇定[J]. 控制理论与应用, pp.1-9, 2024.
- [9] 张奕, 李泽, 崔国增, 等. 动态事件触发下的孤岛微电网分布式协同控制[J]. 控制理论与应用, pp. 1-9, 2024.
- [10] 李根强, 赵森, 吴玉骁, 等. 事件触发机制下的孤岛逆变器功率协调控制[J]. 控制工程, pp. 1-8, 2024.

文章编号: 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 080802

# 基于建筑水系统的可调度建筑光伏小水电微电网研究

余翔

(1 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安市 710043)

## Research on dispatchable building photovoltaic small hydropower microgrid based on water system

Yu xiang

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Xi'an 710043)

**ABSTRACT:** The photovoltaic power generation system don't provide controllable and reliable electric energy alone for factors. The height of high buildings in the city is more than 50m, and the water with this height has great potential energy. A high water tank is set on the roof of the building. The photovoltaic output is used for pumping and storing energy from the low water tank to the high water tank. The water flow from the high water tank drives the generator set to generate electricity and returns to the low water tank to form a water energy utilization cycle. The uncontrollable photovoltaic output of this working mode is eliminated by the large inertia of the water energy utilization system. When the photovoltaic output changes, The pump controller obtains the supplementary output from the energy storage unit to maintain the stable operation of the pump; this photovoltaic hydropower energy storage system can operate stably and provide the user with controllable electric energy text in English.

**KEY WORDS:** buiding photovoltaic; water system; energy storage; microgrid

**摘要:** 光伏发电系统受自然因素制约, 其输出加储能方式是普遍采用接入城市配电网中时就受到很多限制, 不能大规模布置。建筑自动水系统的高位水箱和低位水池具有一定的高度差, 高位水箱的水具有很大的势能, 具备小水电发电条件。光伏输出通过最大功率追踪, 获取的最大功率全部用于水泵从低位水池抽水蓄能到高位水箱, 高位水箱的水流过水轮机带动水力发电机组发电, 流回到低位水池形成一个水能利用循环。高低位的水箱对于水位都有一定的容量区间, 当光伏输出因光照因素突然降低, 高位水箱的水可以进行流动进行水力发电, 直到其最低水位点, 这是整个微电网系统的输出因水系统的大惯性变化缓慢; 光伏输出发生变化时, 水泵控

制器从储能单元获得补充出力维持水泵平稳运行; 这种布置于屋顶的光伏发电系统和安装在消防水系统的小水电组成微电网, 不可控的光伏输出通过可控的小水电, 使光伏小水电微电网具有输出可控, 其可有效补充建筑负荷用电。

**关键词:** 屋顶光伏; 水系统; 储能; 微电网;

**DOI:**

## 0 引言

经济社会发展对能源的需求日益增长, 传统的不可再生资源储量有限, 再加上严重的环境污染问题, 所以改变社会能源结构迫在眉睫。社会总用电量不断增加, 第三产业及城市居民用电比例增大。光伏发电系统主要受制于光照辐射量, 只要光伏资源丰富地区, 其建造可就近城市与负荷附近, 所以光伏发电系统就近布置是解决负荷日益增加的绝佳渠道。但是光伏发电的缺陷在于不可控与不稳定, 而用户要求电能质量越来越高, 这也是限制光伏发电系统入网的主要因数, 造成弃光现象严重。

建筑光伏一体化以及绿色建筑是目前光伏发电系统应用的一种趋势<sup>[1-3]</sup>, 但是光伏发电系统输入不定输出不可控的特性问题还存在。

建筑自动消防系统是现代建筑必须具备的系统, 其消防水系统由消防高位水箱、消防管道、消防低位水池、自动喷淋系统、消火栓系统以及消防水泵控制系统组成, 消防水系统是一种预防系统, 其在正常情况下只有定时检修时系统会运行, 长时间停止状态会造成给水管网老化与堵塞, 供水压力不足及失效风险, 消防水泵故障及维护不及时, 消防给水管网漏水和泄漏等问题<sup>[4]</sup>。

光伏发电系统的不可控, 提出了许多互补能源的控制运行方式。风光沼气系统利用沼气发电系统



来平衡及互补风电光伏发电,可向电网提供稳定的电能,但是该系统需要大型沼气池提供沼气,系统的适用面较窄<sup>[5]</sup>。风电-氢能储能系统<sup>[6-8]</sup>在制氢气的同时会排出二氧化碳,单独依靠电池储能,其成本高;还有利用飞轮储能<sup>[9]</sup>等。

论文利用建筑消防水系统高低位水箱水池和消防管道来对屋顶光伏发电系统进行储能,利用水系统的大惯性和水力发电系统的可控性,形成一种可控电能输出的屋顶光伏小水电微电网。

## 1. 光伏-小水电微电网系统

### 1.1 系统结构

光伏系统的不可控是制约光伏发电系统应用的最大障碍,利用高位水箱或水池充当蓄能缓冲单元,光伏发电输出直流电,直流输出带动直流扬水泵将消防低位水池抽水蓄能到高位消防水箱,高位水箱的水流通过消防管道向下流动驱动水力涡轮发电机组发电,尾水回到低位消防水池;这种储能方式将光伏发电系统的输出不可控通过水能系统的大惯性进行消除;当光伏出力发生变化时,水泵控制器控制水泵输出,保证扬程而减少流量;高位水箱储存的水可以持续带动水力涡轮发电机组发电,此时光伏-水电储能系统就能稳定运行并向用户提供可控的电能。其结构如图 1.1 所示。

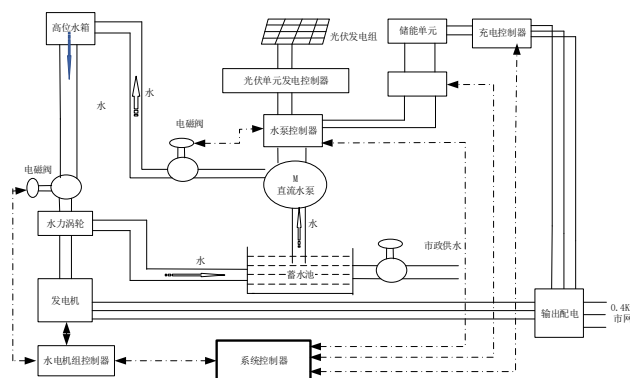


图 1.1 屋顶光伏小水电系统

Fig.1.1 Photovoltaic small hydropower energy cycle distributed generation system

### 1.2 系统运行

光伏-消防水系统微电网系统能量全部来自于光伏组件,设光伏组件容量  $P_G$ , 其实时发电功率可简化为

$$P_i = \left( \frac{H_i}{H_{\max}} \right) \cdot P_G \cdot k \quad (1-1)$$

式中  $H_i$  为实时光照辐射量,  $H_{\max}$  为最大光照辐射量,  $k$  为发电效率。

光伏组件最大输出功率为

$$P_{i\max} = H_{\max} \cdot P_G \cdot k \quad (1-2)$$

直流水泵机组用于光伏发电出力将消防水系统低位水池水输送到高位水池,光能转换为水能储存,满足

$$P_s \geq P_{i\max} \quad (1-3)$$

$$\text{取 } P_s = k_2 P_{i\max}, k_2 \geq 1。$$

高位水箱容积  $V_h$  满足

$$V_h = Q_s t_1 \quad (1-4)$$

式中  $t_1$  是蓄能时间,  $Q_s$  是水泵流量。

低位水箱的容积  $V_L$

$$V_L = V_h + V_{\min} \quad (1-5)$$

式中  $V_{\min}$  是水泵运行最低水位时的容量。

水力涡轮发电机组的装机容量  $P_w$

$$P_w \geq P_{i\max} - P_{s\min} \quad (1-6)$$

式中  $P_{s\min}$  直流水泵机组最低工作功率。

该系统的功率流如图 1.2

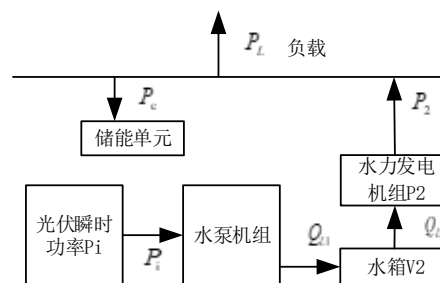


图 1.2 功率流

Fig. 1.2 power flow relation

对于图1.2中

$$P_2 = P_L + P_c \quad (1-7)$$

式 1-7 表示,水力发电机组输出一部分直接输

出到负载上, 另一部分用于储能单元。

$$P_2 = f(Q_{L2}, h) \quad (1-8)$$

式中  $h$  是高位水箱的设计高度,  $Q_{L2}$  是流量, 水电机组的输出功率与流量和高度相关。

## 2. 屋顶光伏消防水系统微电网运行

如图 1.1 所示的微电网系统, 其组成有光伏发电单元、水泵机组, 水力发电机组, 其功率流如图 1.2。

光伏发电单元的输出功率

$$P_i = f(H, P_G) = \left( \frac{H_i}{H_{\max}} \right) \cdot P_G \cdot k \quad (2-1)$$

$$P_i = \frac{\rho g Q_{L1} h}{1000 \eta_s} \quad (2-2)$$

式 2-2 中  $\eta_s$  是水泵机组的效率。水电机组输出功率为

$$P_2 = 9.8 Q_{L2} h \eta_2 \quad (2-3)$$

光伏发电的输出受天气制约, 其输出模拟如图 2-1 所示, 光伏装机容量 30kW, 其最大输出为 25kW, 其最小输出为 4kW。

根据式 1-3, 取直流水泵功率为 25kW, 根据式 1-6, 取水力涡轮发电机组容量为 20kW。

当光伏最大输出为 25kW, 其负荷输出

$$0 \leq P_L \leq P_{LMAX} \quad (2-4)$$

其水电机组输出

$$P_2 = 9.8 Q_{L2} h \eta_2$$

$$0 \leq Q_{L2} \leq Q_{L1} + \frac{V_h}{t} \quad (2-5)$$

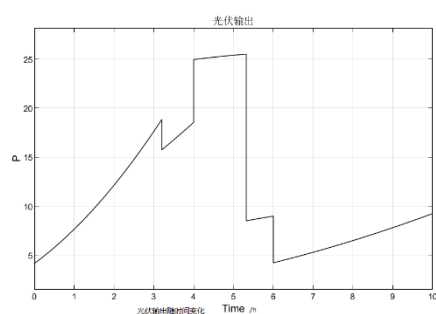


图 2.1 光伏发电系统 30kW

Fig.2.1 Output of photovoltaic

图 2-2 是光伏模拟输出曲线, 光伏输出是不可控的, 利用小水电组成能量循环系统, 水电机组 20kW, 水箱容量满足, 忽略水电机组的响应时间, 屋顶光伏水系统可进行恒功率输出。

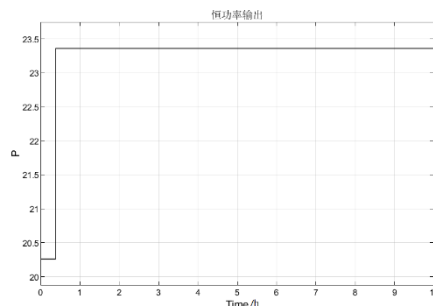


图 2.2 恒功率输出

Fig.2.2 Constant power output

当负荷变动时, 系统中的储能单元吸收或者输出能量, 使该系统可跟随负载变化, 进行系统平衡运行, 如图 2.3 所示。

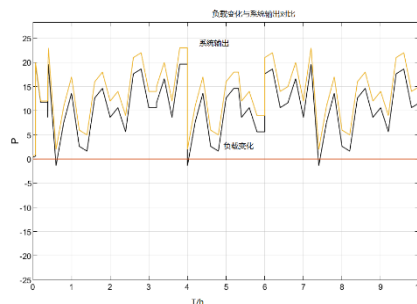


图 2.3 负载变化式系统输出

Fig.3-3 Load change and system output

图 2.2 的表示了该系统可以作为恒功率输出, 图 2.3 的仿真结果显示了系统输出可以跟随负载变化而变化, 能快速响应负载。

## 3. 结论

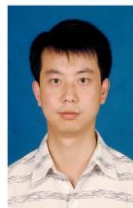
光伏-小水电能量循环分布式发电系统, 利用电能转换为水能, 水能可以储存, 储存的水能通过水电机组的控制, 发出可控的电能。从仿真结果来看, 该系统可以作为恒功率源向用户提供稳定电能, 同时该系统可以跟随负载变化, 进行功率输出控制。这两种特性是可控电源的性质, 对光伏发电系统的可靠应用进行了有力补充。

## 参考文献

- [1] 董菲菲, 卫宽宽. 绿色建筑能源的循环利用[J/OL]. 储能科学与技术, 1-3[2024-03-13]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.024.0133>.
- [2] 王黎阳. 建筑光伏电气一体化系统的设计研究[J]. 未来城市设计与运营, 2024, (02): 68-70.
- [3] 杨臻. 建筑电气节能中光伏新能源技术的运用 [J]. 中国设备工程, 2024, (02): 216-218.
- [4] 吴燕国. 老旧小区消防给水系统存在问题分析及改造措施探讨

[C]// 中国建筑学会建筑给排水研究分会,中国建筑设计研究院有限公司.中国建筑学会建筑给排水研究分会第四届第二次全体会员大会暨学术交流会论文集(下册).广东省建筑设计研究院有限公司; 2023:

- [5] Renewable Energy Distributed Power System With Wind Power and Biogas Generator[c],Zhang Yanning,\* Cao Binggang, Kang Longyun, Xu Jianming,IEEE Transmission and Distribution Conference in Asia 200910.2009, Seoul, Korea.
- [6] 马榕谷,陈洁,赵军超,等.非并网风氢互补系统的容量多目标优化[J].太阳能学报,2019,40(2):422-429.
- [7] 随权,马啸,魏繁荣,等.计及燃料电池热-电综合利用的能源网日前调度优化策略[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1603-1613..
- [8] 蔡国伟,西禹霏,杨德友,等.基于风-氢的气电热联合系统模型的经济性能分析[J].太阳能学报,2019,40(5):1465-1471.
- [9] ADRC applied in micro grid of wind turbine with flywheel Zhang[c], Yanning,\* CaoBinggang, Kang Longyun, Xu Jianming, Advanced Materials Research,2012,455-456: 211-216.



余翔

收稿日期: 2024-7-23。

作者简介:

余翔,男,1978年6月生,高级工程师,主要研究方向:铁路电力工程设计与研究、技术标准制订、技术创新。Email:zhangyn96@sina.com

文章编号: P60140

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 考虑新能源消纳及经济性的园区风光储系统 定容优化研究

周陟<sup>1</sup> 丁坚勇<sup>1, 2</sup> 熊姗霞<sup>1</sup> 王秀叶<sup>1</sup> 张志毅<sup>1, 2</sup>

(1. 武汉晴川学院 湖北武汉 430204; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北武汉 430072)

## Research on Fixed Capacity Strategy for Wind and Solar Storage Systems Considering the Consumption and Economy of New Energy

ZHOU Zhi<sup>1</sup>, DING Jianyong<sup>1, 2</sup>, XIONG Shanxia<sup>1</sup>, WANG Xiuye<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>2</sup>

(1. Wuhan Qingchuan University, Wuhan 430204, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**ABSTRACT:** Under the background of "dual carbon", it is of practical significance to plan the installation capacity of wind turbines, photovoltaic panels, and batteries based on local load demand. A dual layer solution capacity determination strategy is proposed based on the typical daily wind and solar power generation data and load demand of four seasons in a certain park, using a nonlinear constrained optimization algorithm (fmincon) in the inner layer and an improved fire extinguishing algorithm (IFEA) in the outer layer. The main objective is to minimize the initial investment cost, overall operation and maintenance cost, and total electricity purchase cost, while the secondary objective is to minimize the degree of wind and solar curtailment. Taking into account constraints such as power balance, battery SOC state, energy conversion efficiency, wind and photovoltaic output, the data for typical days in four seasons are solved as a whole. Fmincon can simplify various constraints into equality constraints and inequality constraints for easy expansion; On the basis of the fast convergence of FEA, IFEA adds particle swarm optimization algorithm to retain the characteristic of selecting elite examples, while controlling the search area of particles in the next iteration according to the Metropolis criterion to avoid the area where historical elite particles are located as much as possible, improving the efficiency of the algorithm. According to the simulation results, it can be concluded that this strategy has certain practical value.

**KEY WORDS:** Landscape storage system, equipment capacity, improved fire-fighting algorithm, double-layer optimization

**摘要:** “双碳”背景下, 根据当地资源条件和负荷需求规划风机、光伏板、蓄电池的安装容量具有现实意义。针对某园区四个季节的典型日风光资源数据及其负荷需求, 提出一种内层采用非线性约束优化算法(fmincon), 外层采用改进灭火算法(Improve fire extinguishing algorithm, IFEA)的双层求解定容策略。以初始投入成本、整体运营维护成本、总购电成本最小为主要目标, 弃风、弃光程度最低为次要目标构建目标函数。考虑功率平衡、蓄电池 SOC 状态、各能源转化效率、风电和光伏出力等约束条件, 对四个季节的典型日的数据进行整体求解。Fmincon 可将各类约束简化为等式约束和不等式约束便于扩展; IFEA 在 FEA 快速收敛性的基础上增加粒子群算法保留精英例子择优的特性, 同时根据 Metropolis 准则控制下次迭代粒子的搜索区域尽量避开历史精英粒子所在区域, 提高算法的效率。根据仿真结果可知, 该策略具有一定实用价值。

**关键词:** 风光储系统、设备定容、改进灭火算法、双层优化

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.P60140

## 0 引言

正在世界能源危机及“双碳”目标的背景下, 发展可再生能源已经是大势所趋。风光储系统, 即在新能源配电网中接入储能设备形成的微电网系统, 成为优化新能源并网运行的常规方案<sup>[1]</sup>。目前应用最广的储能系统为蓄电池组储能系统 (batter energy storage system, BESS), 具有瞬时功率及容量可选、能量利用率高、充放电速度快的特点<sup>[2]</sup>。在储能系统定容的规划阶段, 容量过小会导致系统弃

**基金项目:** 湖北省教育厅科学技术研究计划项目: 综合能源系统节能减排优化研究 (2021) (编号: B2021408)

Project Supported by Science and Technology Research Program of Hubei Provincial Department of Education Project: Optimization of Energy Conservation and Emission Reduction in Comprehensive Energy Systems (2021) (No. B2021408)

风、弃光量上升,不符合“双碳”政策;容量过大则增加投资、维护、运营成本。因此在工程实际中,综合考虑储能系统容量配置有助于平衡经济效益和能源利用率<sup>[3]</sup>。

通常根据运行成本、社会效益、电网运行风险构建目标函数,再结合某区域电网风光出力特性、电价波动等构建约束条件,优化风光装机及储能系统容量<sup>[4]</sup>。常规求解方式包括多目标粒子群算法、差进化算法等,文献<sup>[5]</sup>结合了遗传算法与退火算法。遗传算法与模拟退火算法的结合在求解储能配置问题时遗传算法的交叉变异操作随机性较强且时间过长,人工蜂鸟算法求解过程中易陷入局部最优解的情况,上述两种解决方法在数据量庞大时存在弃解现象<sup>[6]</sup>。

随着整体能源需求的增加,某些地区需要对风、光伏发电设备扩容,配合着对储能设备再定容,约束条件及求解数据量再次增加。本文提出一种内层采用非线性约束优化算法,外层采用改进灭火算法的双层求解策略。改进的灭火算法解决了因数据量庞大、约束条件过多造成的收敛困难、弃解的问题;同时避免重复搜索历史区域,提高了算法效率。应用到某园区,求证了该策略求解风光储系统中各设备最佳容量配比的有效性。

## 1 储能设备总体成本

蓄电池的总体成本包括初始购置成本、辅助设备成本、年运行维护成本等。

### 1.1 初始购买成本

$$C_1 = \mu \sum_{a=1}^{N_a} (n_p P_{c,amax} + n_e E_{c,amax}) \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\gamma(1+\gamma)^y}{(1+\gamma)^y - 1} \quad (2)$$

式(1)中 $\mu$ 为折现因子; $P_{c,amax}$ 、 $E_{c,amax}$ 分别为第 $a$ 台蓄电池的功率、容量上限; $n_p$ 、 $n_e$ 分别为蓄电池的单位功率价格、单位容量价格。式(2)中 $\gamma$ 为折现率一般取0.05; $y$ 为电池使用寿命。

### 1.2 辅助设备成本

$$C_2 = \mu n_E^{sup} E_{c,amax} \quad (3)$$

式(3)中 $n_E^{sup}$ 为辅助设备单位容量价格。

### 1.3 年运行维护成本

$$C_3 = n_{fix,ca} P_{c,amax} + \sum_{d=1}^D n_{var,ca} \lambda_d \quad (4)$$

式(4)中 $n_{fix,ca}$ 为单位功率电池的年固定运行维护价格; $n_{var,ca}$ 为电池充放单位电量的运行维护成本; $\lambda_d$ 为蓄电池第 $d$ 天的总充放电量。

## 2 风光产电设备成本模型

### 2.1 扩容成本

$$C_4 = n_v \Delta P_{vmax} + n_w \Delta P_{wmax} \quad (5)$$

式(5)中 $\Delta P_{vmax}$ 、 $\Delta P_{wmax}$ 分别为光伏板、风机功率上限的扩容量; $n_v$ 、 $n_w$ 分别为单位功率的光伏板、风机的购买价格。

### 2.2 年运行维护成本

$$C_5 = n_{fix,p} \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T P_{t,d}^v + n_{fix,w} \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T P_{t,d}^w \quad (6)$$

式(6)中 $n_{fix,p}$ 、 $n_{fix,w}$ 分别为光伏板、风机单位产电所需维护成本; $P_{t,d}^v$ 、 $P_{t,d}^w$ 分别为光伏板、风机在第 $d$ 天第 $t$ 时的平均功率。

## 3 园区风光储系统模型

园区在配电网中可视为单一节点,且仅可向电网购电而无法向配电网反向送电,多余的风电、光电只能弃置。其数学模型考虑尽可能在运行成本最低、弃置电量最小的情况下对新能源产电设备及储能系统进行扩容,加大新能源在园区能源结构中的比重,并求解扩容后电容最大充放电功率、电容最大容量、光伏板最大产电功率、风机最大产电功率的配比。

### 3.1 目标函数

$$\min F = \min(f_1, f_2) \quad (7)$$

其中 $f_1$ 、 $f_2$ 分别为总运营成本、总弃电量。

#### 3.1.1 年总运营成本

$$f_1 = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T [n_{fix,p} P_{t,d}^v + n_{fix,w} P_{t,d}^w + n_{G,d} P_{t,d}^G + \frac{C_4}{N_{vw} \cdot D \cdot T} + n_{var} |P_{t,d}^C|] + \frac{1}{N_c} (\mu n_p + n_{fix,ca}) \sum_{a=1}^N P_{c,amax} + \frac{1}{N_c} (n_e + \mu n_E^{sup}) \sum_{a=1}^N E_{c,amax} \quad (8)$$

式(8)中 $n_{G,d}$ 、 $P_{t,d}^G$ 、 $P_{t,d}^C$ 分别为在第 $d$ 天第 $t$ 时刻的电网电价、购电平均功率、储能系统整体功率; $\Delta t$ 为采样时间取一小时; $N_c$ 为电池使用寿命; $N_{vw}$ 为风机、光伏发电板的扩容投资回报年限。

#### 3.1.2 年总弃电量

$$f_2 = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T P_{t,d}^q \Delta t \quad (9)$$

式(9)中  $P_{t,d}^q$  为第  $d$  天第  $t$  时的平均弃电功率, 该变量在范围约束及功率平衡约束下随机生成, 范围约束参考式(11)、功率平衡约束参考式(10)。

### 3.2 约束条件

#### 3.2.1 功率平衡

$$P_{t,d}^V + P_{t,d}^W + P_{t,d}^G = P_{t,d}^L + P_{t,d}^q + P_{t,d}^C \quad (10)$$

式(10)中  $P_{t,d}^L$  为第  $d$  天第  $t$  时的平均负荷功率。

#### 3.2.2 功率范围

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,d}^G \leq P_{t,d}^L \\ 0 \leq P_{t,d}^V \leq P_{Vmax} \\ 0 \leq P_{t,d}^W \leq P_{Wmax} \\ 0 \leq P_{t,d}^q \leq P_{t,d}^V + P_{t,d}^W \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中  $P_{Vmax}$ 、 $P_{Wmax}$  分别为光伏板、风机功率在内层求解时的上限; 在算法内层为已知量, 在外层为自变量。

#### 3.2.3 储能系统约束

$$\begin{cases} E_{c,min} \leq E_c(t) \leq E_{c,max} \\ P_{cmin} \leq P_{i,d}^C \leq P_{cmax} \\ \text{if } P_{i,d}^C \geq 0, E_c(t) = (1 - \varepsilon) \cdot E_c(t-1) - \Delta t \cdot \frac{P_{i,d}^C}{\beta_{dis}} \\ \text{if } P_{i,d}^C < 0, E_c(t) = (1 - \varepsilon) \cdot E_c(t-1) - \Delta t \cdot P_{i,d}^C \cdot \beta_{chr} \\ SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中  $P_{c,min}$ 、 $P_{c,max}$  为整个储能系统的放电、充电最大功率;  $\beta_{dis}$ 、 $\beta_{chr}$  分别为储能系统放电效率、充电效率;  $E_c(t)$  为储能系统第  $t$  时刻的电量;  $\varepsilon$  为储能系统在  $\Delta t$  内的自放电率。  $E_{c,max}$ 、 $P_{c,max}$  在算法内层为已知量, 在外层为自变量。

#### 3.2.4 外层算法自变量约束

$$\begin{cases} P_{Vmax}' \leq P_{Vmax} \leq k_{PV} P_{Vmax}' \\ P_{Wmax}' \leq P_{Wmax} \leq k_{PW} P_{Wmax}' \\ E_{max}' \leq E_{max} \leq k_{EC} E_{max}' \\ P_{cmax}' \leq P_{cmax} \leq k_{PC} P_{cmax}' \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中  $P_{Vmax}'$ 、 $P_{Wmax}'$  分别为光伏电板功率、风机功率的初始上限;  $E_{max}'$ 、 $P_{cmax}'$  分别储能系统的初始容量上限、初始功率上限。  $k_{PV}$ 、 $k_{PW}$ 、 $k_{EC}$ 、 $k_{PC}$  分别为光伏电板功率、风机功率、储能系统容量、储能系统功率上限的最大扩增倍数。

## 4 园区风光储最优配置求解

园区风光储最优配置的求解在于求目标函数  $F$  最小值对应的  $P_{Vmax}$ 、 $P_{Wmax}$ 、 $E_{c,max}$ 、 $P_{c,max}$ , 这四项设备参数各有取值范围, 并且在优化过程中针对任意设备参数取值的组合需求解其对应的各采样时间节点的最优调度方案, 最后再将所有采样时间节点最优调度方案下的运营成本、弃电量总和得出  $f_1$ 、 $f_2$ 。因此模型求解分为两层:

1) 内层算法求解当各设备的规格为定值时每个采样点的最优调度方案, 并将所有采样点在最优化调度方案产生的运行成本、弃电量、购电量、储能系统功率、光伏发电量及风机发电量总合并输出, 并对储能系统的状态进行更新;

2) 外层算法将各设备规格的取值赋予内层算法, 内层算法将得出的目标函数、 $f_1$ 、 $f_2$  反馈给外层作为下次设备参数寻优的标的。

### 4.1 内层算法

对内层模型求解采用非线性约束优化算法(fmincon), fmincon 是用于求解非线性多元函数最小值常用的算法, 目前已发展成熟。该算法旨在利用数学约束替代判别逻辑, 应用于本模型可计算出所有采样点的最优解。同时更新电容 SOC 状态, 并用循环执行采样次数。

### 4.2 外层算法

对外层的求解涉及四维变量, 且各自变量区间较大, 常规仿生类算法在面对多维度海量数据时通常无法兼顾方向选择性、收敛性、变量区间检索完整度<sup>[7]</sup>。为解决该问题, 提出改进灭火算法。

#### 4.2.1 传统灭火算法

传统灭火算法的数学模型为式(14)。

$$\begin{cases} F = \min y \\ \text{if } y(t) < y_{best} \\ x(t+1) = x_{best} + A_{step} \cdot T \cdot A_{rand} \\ \text{if } y(t) > y_{best} \text{ and } P > X, X \sim (0,1) \\ x(t+1) = x(t) + A_{step} \cdot T \cdot A_{rand} \\ P = e^{-\frac{y_{best} - y(t)}{T}} \\ A_{step} = [step_1 \quad step_2 \quad step_3 \quad \dots]^T \\ A_{rand} = [X_1 \quad X_2 \quad X_3 \quad \dots]^T, X_i \sim (0,1) \\ T = T_0 \cdot A_{fa}^K \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中,  $x$  为区间(0,1)内的随机数;  $A_{step}$  为自变量的初始步长矩阵,  $step_i$  是第  $i$  个自变量的迭代



步长, 正比于自变量  $i$  取值范围;  $A_{rand}$  为随机数矩阵;  $T_0$  为初始温度,  $A_{fa}$  为温度衰减系数,  $k$  为算法外层循环次数。

初始  $x(t_0)$  中的  $N$  维变量在自身定义域内随机生成, 人为设置初始历史最优解  $y_{best}$ , 目标函数求  $y$  的最小值。如果第  $t$  次的解  $y(t)$  优于  $y_{best}$  则取代, 下一次探寻的自变量坐标是在当前  $y_{best}$  对应的  $x_{best}$  基础上增加随机步长矩阵生成。随机步长正比于自变量自身定义域广度和当前温度, 温度随时间等比衰减。为加强算法对区域的探索性, 根据 Metropolis 准则生成了概率  $p$ , 若  $p$  大于随机数  $x$  则  $y(t)$  不优于  $y_{best}$  也准许粒子下次的搜寻范围基于  $x(t)$  进行, 避免算法过早进入局部最优解。

#### 4.2.2 灭火算法改进

传统灭火算法同一温度下一般执行数十次, 低温时对局部搜索精度较高, 但在中、高温时搜索比较粗略。基于 Metropolis 准则的概率函数  $P$  在中、高温时针对一、二维变量可较好限制粒子过早进入局部最优陷阱, 三维及其以上变量则稍显吃力。

为解决上述问题, 采用重复执行灭火算法并保留、更新固定数量的精英粒子, 每次迭代尽量避开历史精英粒子所在区域的策略。最终在精英粒子矩阵中寻得全局最优解。

##### (1) 精英粒子的保留

借鉴文献[8]中多目标粒子群算法的精英粒子保留策略如式(15)。

$$\begin{cases} f(x_0, y_0, r_0) = \frac{1}{F(x_0, y_0, r_0)} \\ F(x_0, y_0, r_0) = \left( \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} + (r_i - r_0) \right)^2 \\ r_0 = k_1 \cdot x_0 + k_2 \cdot y_0 \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中  $f(x_0, y_0, r_0)$  为粒子适应度;  $x_0, y_0, x_i, y_i$  分别为目标 1、目标 2 的理想最优解及当前解;  $r_0, r_i$  分别为目标函数理想最优解及当前解。一般求解最小值问题时, 理想点定为零点。一旦精英粒子个数超越设定阈值则根据适应度的排序选择保留, 初始精英粒子为零, 因此初次搜索不受限, 随着次数的增多逐渐收敛搜索范围。

##### (2) 选择概率控制

根据 Metropolis 准则, 让历史优质解坐标所在

区域减小被搜索的概率, 其数学约束为式(16)。与粒子群学习优质粒子的坐标逻辑相反, 尽量引导后来的粒子探索不存在精英粒子的区域。

$$\begin{cases} L(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left( \sqrt{\sum_{j=1}^H (x_j^{t+1} - x_{i,j}^{best})^2} \right) \\ P_2 = e^{-\frac{L(t) - L_0}{T}} \end{cases} \quad (16)$$

综上,  $x(t+1)$  在生成后需判定  $P_2$  是否大于随机数  $x$ , 若成立则进行本次迭代运算, 否则直接舍弃本次运算。不可在同一次循环中重复判断, 避免收敛后期因概率过低反复执行而导致的算法收敛缓慢、停滞甚至弃解。

#### 4.3 求解流程

优化算法的流程如下:

- (1) 输入园区各项参数, 初始化概率控制函数、精英粒子矩阵、寻优粒子的位置和速度;
- (2) 将外层算法寻优粒子的当前位置信息赋予至内层 Fmincon 算法, 计算当前坐标下的目标函数值及其子目标值;
- (4) 计算当前粒子适应度并与精英粒子矩阵中适应度最低的粒子比较, 若当前粒子适应度较高则取代原精英粒子;
- (5) 根据精英粒子矩阵更新概率控制函数;
- (6) 判断外层算法是否达到设定迭代次数, 是则输出结果, 否则继续循环;
- (7) 输出精英粒子矩阵中适应度最高的粒子。

#### 5 算例分析

以某经济技术开发区为例进行计算, 该园区规划配置有小型风电、光伏产电系统, 采用常规的锂电池组储能系统。选取该园区四个季节的不同典型日计算, 采样时间为小时。

##### 5.1 模型参数

将产电设备、储能设备分别视作整体求解, 根据设备实际精度选择与计算结果最接近的值。储能系统最大功率及最大容量优化前参数为 75kw/(150 kw·h)。优化前光伏装机最大功率、风机装机最大功率分别为 500 kw、350 kw。

储能系统参数参考文献[9]; 风机、光伏发电板参数参考文献[10]。园区分时电价参考文献[7]。园区四季典型日风光发电、负荷数据如图 1。

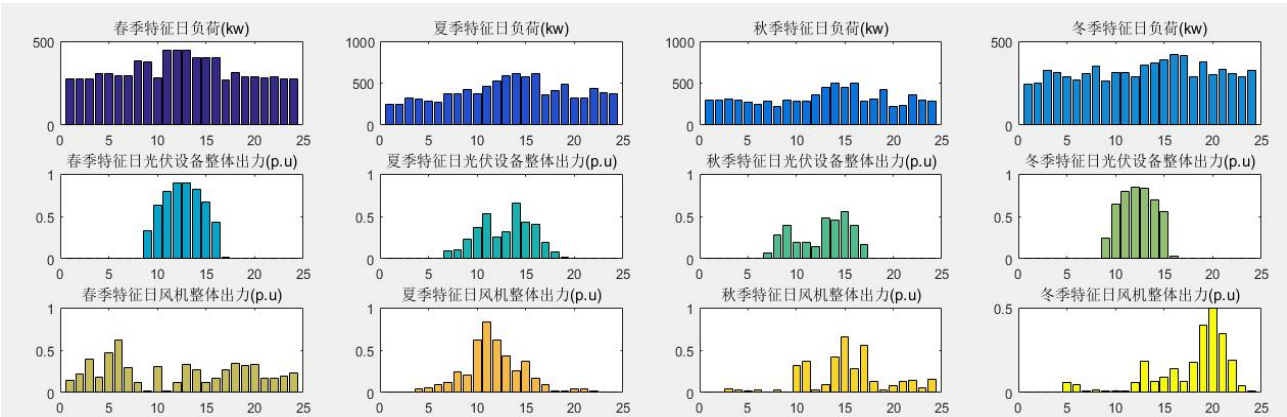


图 1 园区四季典型日风光发电、负荷数据

Fig. 1 Typical day-to-day wind power generation and load data in four season

表 1 精英例子矩阵最终信息

Table 1 Elite example matrix final information

| 编号 | PC<br>(kW) | SC<br>(kW · h) | PVmax<br>(kW) | PWmax<br>(kW) | 购电量<br>(kW) | 光伏量<br>(kW) | 风电量<br>(kW) | 弃电量<br>(kW) | 总成本<br>(元) |
|----|------------|----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| 1  | 179.0      | 322.2          | 585.9         | 946.0         | 11685.5     | 10063.8     | 15281.3     | 3898.5      | 44353.0    |
| 2  | 113.0      | 231.1          | 636.4         | 844.3         | 12687.3     | 10931.3     | 13638.5     | 4124.9      | 45783.8    |
| 3  | 173        | 265.6          | 786.4         | 897.1         | 11748.3     | 13507.7     | 14491.4     | 6615.5      | 60488.6    |
| 4  | 178.4      | 198.4          | 1192.7        | 759.8         | 12322.3     | 20486.6     | 12273.5     | 11950.4     | 92463.2    |
| 5  | 79.0       | 235.1          | 643.1         | 442.2         | 17008.6     | 10993.0     | 7107.6      | 1977.4      | 26338.9    |
| 6  | 93.2       | 239.5          | 907.3         | 484.0         | 15042.6     | 15584.4     | 7818.3      | 5313.4      | 53724.5    |
| 7  | 91.5       | 211.7          | 722.0         | 537.1         | 15323.      | 12401.5     | 8676.0      | 3269.3      | 41484.6    |
| 8  | 101.2      | 195.6          | 991.3         | 875.0         | 11887.3     | 17027.2     | 14134       | 9916.9      | 79970.5    |
| 9  | 154.7      | 159. 8         | 1076.2        | 489.1         | 14888.5     | 18485.5     | 7900        | 8142.8      | 70513.5    |
| 10 | 129.3      | 192.3          | 728.6         | 879.0         | 12340.0     | 12514.9     | 14199.0     | 5921.9      | 56253.8    |

5.2 优化前后对比

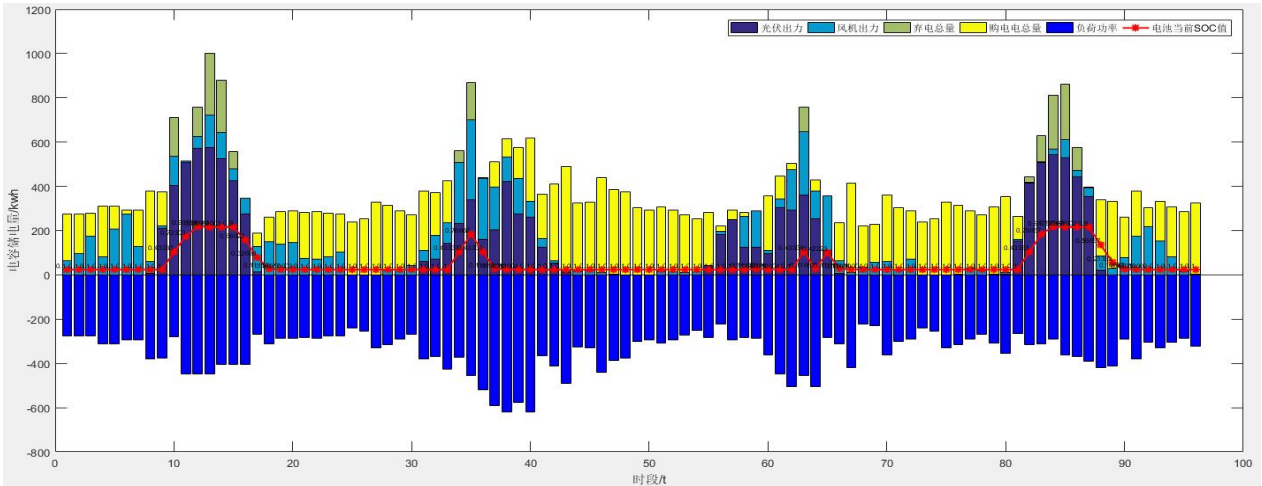


图 2 优化配置后园区四季典型日运行状态图

Fig. 2 State diagram of typical daily operation of the initial campus in four seasons after capacity optimization

表 2 优化前后四季典型日参各数对比

Table6 Comparison of typical daily parameters for four seasons before and after optimization

| 项目  | 0~5 年       | 5~10 年      |
|-----|-------------|-------------|
| 优化前 | 四个典型日运行总成本  | 25874.7 元   |
|     | 四个典型日运行总弃电量 | 510.3384kw  |
|     | 购买总电量       | 19400.2 kwh |
| 优化后 | 四个典型日运行总成本  | 25899 元     |
|     | 四个典型日运行总弃电量 | 1977.3 kw   |
|     | 购买总电量       | 17008 kwh   |

基于 MATLAB 平台构建双层优化模型，用所述双侧求解策略对算例进行优化求解，得到精英粒

子的最终分布如图3,各粒子的详细信息见表1。通过对两个目标的权重设置使得二者对目标函数的影响力接近,同时观察表1可知,所有精英粒子的解在自变量的四维空间中相似度不高,做到了对未知区域的探索,而非对局部的过度探索。

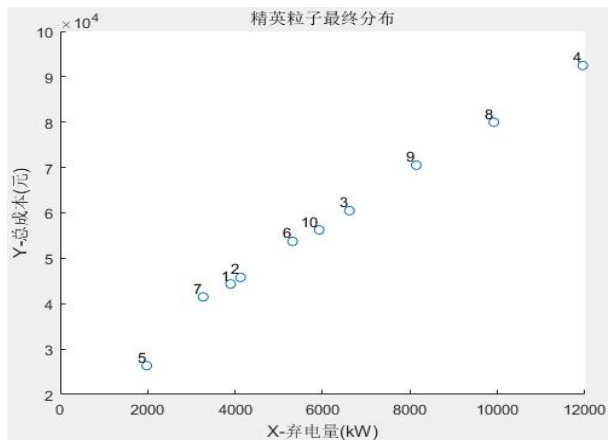


图3 精英粒子最终分布图

Fig. 3 Final distribution of elite particles

观察图3可知精英粒子5应对应全局最优解,查表1可知此时电池最大充放电功率、电池最大容量、光伏装机最大功率、风机装机最大功率的理论组合配置为:79.0、235.1、643.1、442.2。根据设备名牌值选取实际组合配置为80kw、240 kwh、640 kw、440 kw。带入该配置至内层算法可得图2。

精英粒子的迭代信息中总成本包含5年投资回

报年限成本,而储能系统的使用年限为10年,因此最终优化信息如表2所示。在投入运行0~5年期间,优化后在总运行成本上升变化不大的情况下减少了从电网购电的比例,增加了新能源装机的比例;而在投入运行5~10年期间,新能源设备投资回报达成,在新能源比重上升的同时四个典型日的运行成本减小了1140元,则理论上整年运行成本将减少近104025元。

## 6 结论

本文从总体成本、弃风弃光两个方面设立目标函数,针对电池最大充放电功率、电池最大容量、光伏装机最大功率、风机装机最大功率之间的最佳配比建立优化模型;提出针对求解模型的双层优化算法,算法外层为改进的灭火算法,内层为非线性约束优化算法。得出如下结论:

- 1) 优化后该园区的能源结构整体增加了新能源比重、减少购电比重,符合“双碳”背景下的节能减排政策。同时经济性良好,符合当地发展需求。但仍需加强风、光的消纳性。
- 2) 在算法方面,灭火算法结合了粒子群算法的特性,设立精英粒子矩阵并借此改进Metropolis准则下的概率函数,使得保留灭火算法高效收敛性的同时,给予重复执行时后来粒子一定的方向性,提高了传统灭火算法的精准度、搜索完善度。

## 参考文献

- [1] 高玉,王琦,陈严,等.考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(4):51-59.  
Gao Yu, Wang Qi, Chen Yan, etc. Optimise the scheduling of hydrogen-containing integrated energy system considering demand response and energy cascade utilisation [J]. Power system automation, 2023, 47 (4): 51-59.
- [2] 陈泽西,孙玉树,张妍,等.考虑风光互补的储能优化配置研究[J].电工技术学报,2021,36(S1):145-153.  
Chen Zexi, Sun Yushu, Zhang Yan, etc. Research on energy storage optimisation and configuration considering complementary scenery [J]. Journal of Electrical Technology, 2021, 36(S1): 145-153.
- [3] 刘畅,卓建坤,赵东明等.利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(01):1-18+369.  
Liu Chang, Zhuo Jiankun, Zhao Dongming, etc. Review of the research on the flexible and safe operation of renewable energy microgrids using energy storage systems [J]. China Journal of Electrical Engineering, 2020, 40(01):1-18+369.
- [4] 严干贵,冯晓东,李军徽,等.用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J].中国电机工程学报,2012,32(28):27-35,22.  
Yan Gangui, Feng Xiaodong, Li Junhui, etc. Energy storage system capacity configuration method for relaxing peak adjustment bottleneck [J]. China Journal of Electrical Engineering, 2012, 32 (28): 27-35, 22.
- [5] 李涛,许苑,陈健,等.计及全寿命成本和收益的微电网储能优化配置[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(3):46-51.  
Li Tao, Xu Yuan, Chen Jian, etc. Optimised configuration of microgrid energy storage that takes into account the cost and benefits of full life [J]. Journal of Power System and Its Automation, 2020, 32 (3): 46-51.
- [6] 闫群民,李召,马永翔,等.考虑综合经济性的风光配电网储能优化配置[J].科学技术与工程,2024,24(12):5014-5022  
Yan Qunmin, Li Zhao, Ma Yongxiang, etc. Considering the comprehensive and economical optimisation of energy storage and configuration of scenery distribution network [J]. Science and Technology and Engineering, 2024, 24(12): 5014-5022
- [7] 张伟,黄卫民.基于种群分区的多策略自适应多目标粒子群算法[J].自动化学报,2022,48(10):2585-2599.  
Zhang Wei, Huang Weimin. Multi-strategy self-adaptive multi-target particle group algorithm based on population zoning [J]. Automatic Chemical Journal, 2022, 48(10):2585-2599.
- [8] 闫群民,孟琅歆,董新洲,等.考虑碳交易的风光配电网储能优化配置[J/OL].武汉大学学报(工学版),[2024-04-25]https://link.cnki.net/urlid/42.1675.T.20240424.2140.002  
Yan Qunmin, Meng Minxin, Dong Xinzhou, etc. Optimise the energy

storage configuration of the scenery distribution network considering carbon trading [J/OL]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition),[2024-04-25]<https://link.cnki.net/urlid/42.1675.T.20240424.2140.002>

- [9] 禹海峰, 黄婧杰, 蒋诗谣, 等. 计及储能使用寿命的风电场整体性储能配置[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37 (4): 152-160.

Yu Haifeng, Huang Jingjie, Jiang Shiyao, etc. The overall energy storage configuration of the wind farm that takets account the annual life of the energy storage [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37 (4): 152-160.

- [10] 柴源. 基于改进鲸鱼算法的风-光-重力储能系统优化配置研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

Chai Yuan. Research on optimal configuration of wind-light-gravity

energy storage system based on improved whale algorithm [ D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.

收稿日期: 2013-07-04。

作者简介:

周陟(1995-), 男, 硕士/讲师, 研究方向为新能源电力、综合能源系统构建及优化研究, E-mail:

[471458960@qq.com](mailto:471458960@qq.com)

丁坚勇 (1957-), 男, 博士/教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电力规划及可靠性研究等,

E-mail:jyding@whu.edu.cn



周陟

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 考虑深冷液化空气储能的虚拟电厂优化调度

杨涵婷<sup>1</sup>, 白迪<sup>1</sup>

(1. 沈阳工程学院 电力学院, 辽宁 沈阳 110000)

## Optimal scheduling of virtual power plant considering cryogenic liquefied air energy storage

YANG Hanting<sup>1</sup>, BAI Di<sup>1</sup>

(1. Institute of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110000, China)

**ABSTRACT:** In order to solve the problem of power system fluctuation caused by the high renewable energy ratio of virtual power plant, an optimal scheduling model of virtual power plant with cryogenic liquefied air energy storage is proposed. Based on the analysis of the profit of the virtual power plant, considering that the cryogenic liquefied air energy storage device can adjust the output power of the virtual power plant and the cryogenic liquefied energy storage device has the characteristics of exchanging with the external cold energy and heat energy, the MATLAB simulation modeling is used, and the commercial software CPLEX is called to solve the optimal scheduling model. The research results show that the cryogenic liquefied air energy storage system can cut the peak and fill the valley, promote the consumption of new energy units, adjust the output of each unit of the virtual power plant, and make the virtual power plant obtain higher economic benefits. The research conclusions provide a reference for the optimal scheduling of virtual power plants.

**KEY WORDS:** Cryogenic liquefied air energy storage; virtual power plant; optimized scheduling; MATLAB; CPLEX

**摘要:**为解决高比例可再生能源接入虚拟电厂造成电力系统波动和可再生能源的消纳问题,提出计及深冷液化空气储能的虚拟电厂优化调度模型。以总发电量的利润作为优化目标函数,在分析虚拟电厂利润的基础上,考虑深冷液化空气储能装置可以调节虚拟电厂输出功率及其与外部冷能、热能进行交换的特性,通过 MATLAB 仿真建模,调用商用软件 CPLEX 求解优化调度模型。研究结果表明,深冷液化空气储能系统能够削峰填谷,促进新能源机组消纳,调节虚拟电厂各单元出力,使虚拟电厂获得更高的经济效益。研究结论为虚拟电厂优化调度提供参考。

**关键词:** 深冷液化空气储能; 虚拟电厂; 优化调度; MATLAB; CPLEX

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

大力发展风、光等可再生能源发电已成为国际

共识。可再生能源高质量发展,促进建设清洁、可靠的能源系统<sup>[1]</sup>。然而,可再生能源的容量普遍较小、新能源机组出力间歇性和不稳定性大,很难直接并入电网参与市场运营<sup>[2]</sup>。虚拟电厂是一种通过信息技术和软件系统<sup>[3]</sup>、通过集成和优化分布式资源来实现电力系统的高效运行和管理<sup>[4]</sup>。文献[5]和文献[6]将能源供应单元、储能系统等引入虚拟电厂优化调度模型,合理分配有效资源,以降低系统运行成本。

虚拟电厂中的储能原件协调各单元出力,促进风、光等可再生能源机组消纳,在调节输出功率方面发挥重要作用。文献[7]构建含有抽水蓄能的虚拟电厂分时电价经济调度模型,解决风电机组和光伏组件间歇性出力的问题,促进可再生能源消纳。文献[8]综合利用含有蓄电池和氢储能的虚拟电厂协同运行优化模型,在实现虚拟电厂绿色低碳运行方面具有良好的启发性。上述文献中抽水蓄能电站选址受地理位置限制,氢储能制造成本较高且存在安全问题。文献[9]分布式电池储能电站的快速响应和灵活的能量吞吐可解决可再生能源发电的波动问题。但存在使用安全问题,在一定程度上制约了可再生能源的消纳。因此,本文提出一种循环次数多、寿命长、无污染、本质安全、多种能源协调互补的深冷液化空气储能(cryogenic liquid air energy storage, LAES)。文献[10]提出含有深冷液化空气储能的调度模型,可解决新能源的消纳、促进多种能源优势互补,提高了整体的经济效益,为新能源消纳开辟一条新路径。文献[11]将液化天然气冷量计入深冷液化空气储能蓄冷罐,提升了系统两侧联合调度的能力,降低了系统的运行成本和二氧化碳排放成本。以上文献侧重于深冷液化储能与综合能源的联合使用,却忽略了深冷液化空气储能外特性以及与区域能源冷、热耦合关系。

因此,本文构建了含有燃气机、可再生能源发电单元和深冷液化空气储能的虚拟电厂模型,以总利润最大为优化目标,考虑可再生能源出力不确定的约束条件及虚拟电厂整体约束。该模型可有效解决高比例可再生能源接入虚拟电厂造成的电力系统波动问题和可再生能源消纳问题,确保虚拟电厂安全稳定运行且提高虚拟电厂运行经济性,实现多品类能源联合优化调度。以某地负荷数据为基础,构建计及深冷液化空气储能的虚拟电厂优化调度模型,最后采用 MATLAB 平台调用 CPLEX 求解,得到虚拟电厂运行收益最大的风光燃气储能联合系统最优出力,从而验证该调度模型的有效性。

### 1 风-光-燃气-深冷液化空气储能优化调度模型

### 1.1 储能技术原理

深冷液化空气储能利用空气在低温液化时体积缩小的特性,将空气压缩并冷却至液态可以储存电能。在用电负荷高峰期,通过释放液态空气的潜热和压力来释放电能[12],储能充放电原理如图1所示。

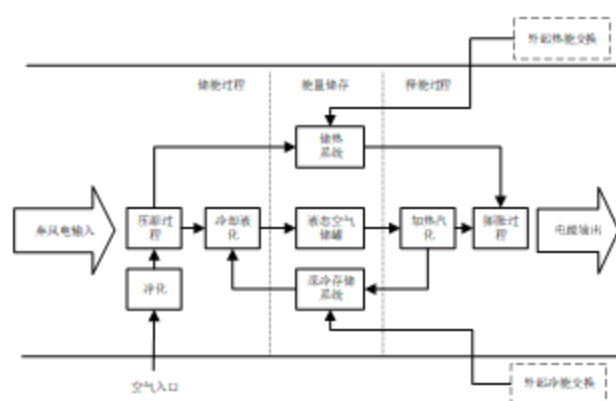


图1 深冷液化空气储能原理

深冷液化空气储能系统充放电过程包括压缩阶段、冷却阶段、液化阶段、储存阶段、释放阶段和热回收六个过程。充电时，压缩机将空气压缩至高温高压状态，避免在该过程中空气过热，需通过冷却系统来冷却降温至液态，并储存在绝热的储罐中，以减少能量损失。放电时，液态空气被释放到一个低压环境中，液态空气迅速膨胀并汽化，吸收周围环境的热量，产生高压气体驱动汽轮机旋转，输出电能。在深冷液化空气储能系统中，通常会设计热回收系统，以回收液化过程中释放的热量，提高系统的整体效率。

深冷液化空气储能具有能量密度高、环境友好、寿命长等优点, 低压罐体储存液态空气, 安全性高, 且选址灵活, 不受地理位置限制。该储能装置不仅可以平抑可再生能源的间歇性和不稳定性,

提高可再生能源发电的并网运行能力,还可以与外部冷能、热能进行交换,提高能源利用率。

## 1.2 目标函数

优化目标考虑实时电价、燃气发电成本和深冷液化空气储能运行维护成本,考虑深冷液化空气储能充放电功率以及负荷功率,具体表现为:

(1)

式中,  $P_{G,t}$ 、 $P_{W,t}$ 、 $P_{PV,t}$ 、 $P_{LAC,t}$ 、 $P_{LAC,W,t}$  分别为燃气机组发电功率、风电机组并网功率、光伏组件并网功率、深冷液化空气储能发电功率、深冷液化空气储能从风电机组和光伏组件获取电能压缩空气的功率;  $C_t$  为实时电价;  $C_{G,t}$ 、 $C_{LAC,t}$  分别为燃气费用以及深冷液化空气储能运行维护成本。

### 1.3 储能数学模型及约束条件

1) 蓄热量为:

(2)

(3)

式中,  $Q_{t+1}^{\text{储}}$ 、 $Q_t^{\text{储}}$ 分别为  $t+1$ 时刻和  $t$ 时刻储热量;  $Q_{t+1}^{\text{max}}$ 为最大储热量;  $Q_{t+1}^{\text{压}}$ 为  $t+1$ 时刻压缩热;  $Q_{t+1}^{\text{供}}$ 为  $t+1$ 时刻的供热量;  $\eta_{\text{储}}$ 和  $\eta_{\text{释}}$ 为系统的储热、释热效率。

2) 蓄冷量为:

(4)



(5)

式中,  $Q_{t-1}^{ch}$ 、 $Q_t^{ch}$  分别为  $t$  时刻和  $t-1$  时刻蓄冷量;  $Q_{t-1}^{max}$  为最大储冷量;  $Q_t^{ex}$  为  $t$  时刻膨胀冷;  $Q_t^{in}$  为  $t$  时刻系统的供冷量;  $\eta_{ch}$  和  $\eta_{ex}$  为深系统的储冷、释冷效率。

### 3) 储能充电约束:

(6)

式中,  $P_{\text{comp}}$  表示在  $t$  时刻深冷液化空气储能能从风电机组、光伏组件获取电能压缩空气的功率;  $k$  绝热指数,  $k$  取 1.4;  $\dot{m}_{\text{in}}$  为流入压缩机的空气质量流量;  $R$  为空气气体常数,  $R$  取  $287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ;  $T_{\text{in}}$  为压缩机入口温度,  $T_{\text{in}}$  取  $313 \text{ K}$ ;  $\eta_{\text{comp}}$  为压缩机的等熵效率,  $\eta_{\text{comp}}$  取 0.85;  $\eta_{\text{elec}}$  电能为转化为深冷液化空气储能的转换效率,  $\eta_{\text{elec}}$  取 0.9。

(7)

式中,  $\alpha$  为深冷液化空气储能储存电能时的工况, 是 0/1 变量;  $P_{\text{max}}$ 、 $P_{\text{min}}$  分别为压缩机输出的最小、最大功率。

4) 储能放电约束:

(8)

式中,  $\eta_{\text{LNG}}$  表示  $t$  时刻深冷液化空气储能利用



液态空气膨胀发电的功率； $\eta_{\text{exp}}$ 为透平机的等熵效率， $\eta_{\text{exp}}$ 取 0.87； $\eta_{\text{exp}}$ 为液态空气储能为转化为电能的转换效率， $\eta_{\text{exp}}$ 取 0.9； $\gamma$ 为膨胀比， $\gamma$ 取 3.7。

$$P_{\text{exp}} = \eta_{\text{exp}} \cdot \eta_{\text{exp}} \cdot P_{\text{exp}} \quad (9)$$

式中， $P_{\text{exp}}$ 为深冷液化空气储能释能时的工况，是 0/1 变量； $P_{\text{exp}}$ 、 $P_{\text{exp}}$ 分别为透平机输出功率最小、最大值。

5) 储能机组启停约束：

$$P_{\text{exp}} = P_{\text{exp}} \cdot U_{\text{exp}} \quad (10)$$

6) 储能爬坡约束：

$$P_{\text{exp}} - P_{\text{exp}} \leq \Delta P_{\text{exp}} \quad (11)$$

式中， $P_{\text{exp}}$ 、 $P_{\text{exp}}$ 分别是深冷液化空气储能发电出力的上下限出力； $\Delta P_{\text{exp}}$ 和 $\Delta P_{\text{exp}}$ 分别是深冷液化空气储能系统最大向下爬坡速率和储能系统最大向上爬坡速率。

7) 深冷液化空气储能冷、热功率平衡约束：

$$P_{\text{exp}} = P_{\text{exp}} \quad (12)$$

$$P_{\text{exp}} = P_{\text{exp}} \quad (13)$$

式中， $P_{\text{exp}}$ 和 $P_{\text{exp}}$ 分别为深冷液化空气储能对外供热功率和区域内供暖热负荷功率； $P_{\text{exp}}$ 和 $P_{\text{exp}}$ 分别为深冷液化空气储能对外供冷功率和区域内冷库冷负荷功率。

8) 储能系统运行维护成本：

$$C_{\text{exp}} = C_{\text{exp}} \cdot U_{\text{exp}} \quad (14)$$

式中， $C_{\text{exp}}$ 为深冷液化空气储能系统单位维护费； $C_{\text{exp}}$ 为深冷液化空气储能利用液态膨胀发电的功率。

#### 1.4 其他模型及约束条件

##### 1.4.1 燃气机、风电、光伏数学模型及约束条件

1) 燃气机组输出的电功率：

$$P_{\text{exp}} = P_{\text{exp}} \quad (15)$$

式中， $P_{\text{exp}}$ 为燃气机组输出电功率； $V_{\text{exp}}$ 为消耗天然气的体积； $\eta_{\text{exp}}$ 为发电效率， $\eta_{\text{exp}}$ 取 0.4； $H_{\text{exp}}$ 为天然气的抵热值。

2) 燃气机组发电的天然气成本为：

$$C_{\text{exp}} = C_{\text{exp}} \cdot V_{\text{exp}} \quad (16)$$

式中， $C_{\text{exp}}$ 为天然气成本； $P_{\text{exp}}$ 为天然气价格。

3) 燃气发电机出力及爬坡约束：

$$P_{\text{exp}} - P_{\text{exp}} \leq \Delta P_{\text{exp}} \quad (17)$$

式中， $P_{\text{exp}}$ 、 $P_{\text{exp}}$ 分别是第  $i$  个燃气发电机的出力上下限； $P_{\text{exp}}$ 是第  $i$  个燃气发电机在  $t$  时刻发出的有功功率； $\Delta t$ 是间隔时间； $\Delta P_{\text{exp}}$ 和 $\Delta P_{\text{exp}}$ 分别是机组出力的上升、下降速率。

4) 风光新能源机组出力约束：

$$P_{\text{exp}} = P_{\text{exp}} \quad (18)$$

$P_{\text{exp}}$ 和 $P_{\text{exp}}$ 分别是风电机组出力的上下限； $P_{\text{exp}}$ 和 $P_{\text{exp}}$ 分别是光伏发电出力的上下限。

##### 1.4.2 线路整体约束

1) 潮流线路约束：

$$P_{\text{exp}} = P_{\text{exp}} \quad (19)$$

式中， $P_{\text{exp}}$ 是第  $L$  条线路的输入有功功率； $P_{\text{exp}}$ 是第  $L$  条线路的输入有功功率限值。

2) 有功平衡约束：

$$P_{\text{exp}} = P_{\text{exp}} \quad (20)$$

式中， $P_{\text{exp}}$ 为用户负荷功率； $P_{\text{exp}}$ 为深冷液化空气储能系统供热功率； $P_{\text{exp}}$ 为深冷液化空气储能系统供冷功率。

## 2 模型求解

第二部分构建一个以虚拟电厂发电利润最大为优化目标的优化调度模型，通过科学的数学建模和优化算法，对虚拟电厂内部的风电机组、光伏组件、燃气机组和储能等多种能源进行综合调度和协调管理。鉴于求解含有多种能源调度的过程是复杂的整数非线性规划问题，变量维数多、约束条件复杂，为简化该计算，且充分利用深冷液化空气储能的削峰填谷优势和区域冷热能源交换特性、发挥虚拟电厂聚合分散资源能力，提出如图 2 所示的最佳调度方案。该模型充分考虑了多种能源的特性，包括风能和太阳能的间歇性和不确定性，燃气机组的稳定性和可控性，以及储能系统的灵活性和快速性。通过整合多种能源资源，实现能源的优化配置和高效利用，能有效提高虚拟电厂的发电效率和经济效益，实现发电利润最大化目标。模型采用 MATLAB 平台调用 CPLEX 求解，得到虚拟电厂最大运行收益及风光燃气储能联合系统最优出力，得出最终调度策略。

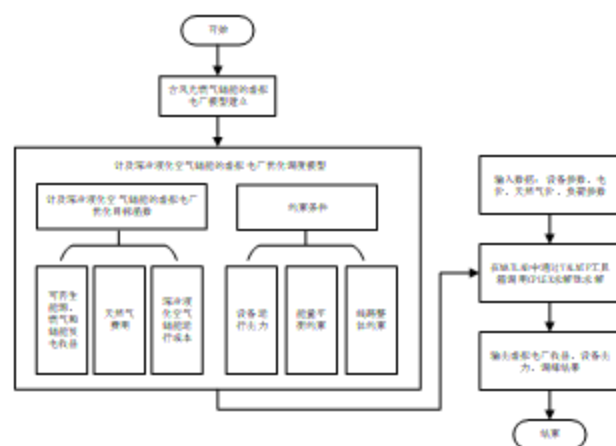


图 2 模型求解计算流程图

## 3 算例分析

本节搭建实验测试系统来验证该优化模型有效性。测试算例中包括：一台 3.5MW 燃气机组，

一个总容量 16MW 的风电厂、一个总容量 1.5MW 的光伏电站、一台容量 2MW 的深冷液化空气储能装置,深冷液化空气储能运行参数参考文献[10]。依据日负荷情况,建立虚拟电厂最优调度方案。

在计及深冷液化空气储能的虚拟电厂中,深冷液化空气储能系统并入电网,虚拟电厂并入天然气网。电网采用峰谷电价策略,利用负荷峰谷电价差实现虚拟电厂收益最大化。电能售卖、购买天然气的价格表见表 1。

表 1 各时段电价和天然气价格

| 时段          | 电价/(元/kWh) | 天然气价格/(元/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------------|---------------------------|
| 7:00-8:00   | 0.42       | 2.2                       |
| 8:00-12:00  | 1.29       | 2.2                       |
| 12:00-17:00 | 0.84       | 2.2                       |
| 17:00-20:00 | 1.29       | 2.2                       |
| 20:00-23:00 | 0.84       | 2.2                       |
| 23:00-7:00  | 0.42       | 2.2                       |

图 3 给出了风电、光伏、燃气机组和深冷液化空气储能日出力情况。在负荷高峰,燃气机、风电机组和光伏组件同时工作发电,储能放电,满足负荷高峰的用电需求。在负荷低谷,储能系统充电,消纳了剩余的风电、光电。

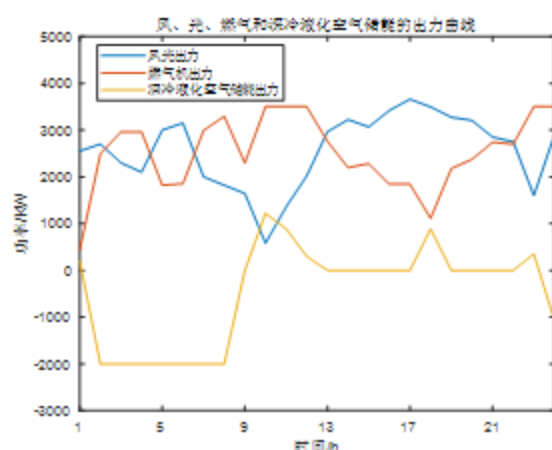


图 3 风、光、燃气机和深冷液化空气储能出力

图 4 给出了虚拟电厂有无深冷液化空气储能系统发电利润的折线对比图。可以看出,在虚拟电厂考虑深冷液化空气储能响应后,发电利润有显著提升。在引入该储能系统后,虚拟电厂能够更有效地调节电力供应,尤其是在负荷低谷时的弃风时段,将过剩的电能转化为冷能,储存在蓄冷罐中。储能系统在负荷高峰期释放电能,实现峰谷套利。深冷液化空气储能系统不仅提高了电力供应的灵活性和稳定性,还为虚拟电厂带来了更高的经济效益。

图 5 表明虚拟电厂有无深冷液化空气储能系统的负荷峰谷差存在明显差异。不含储能的虚拟电厂在负荷高峰期面临较大的供电压力,导致峰谷差较大,不仅增加了电力系统的不稳定性,还限制了经济效益的提升。相比之下,引入储能后,虚拟电厂能够有效平衡和调节电力供应,在负荷低谷期储存电能、高峰期释放电能,缩小系统峰谷差。计及深

冷液化空气储能的虚拟电厂可以灵活供应电能,峰谷调节还为电力市场提供辅助服务,使虚拟电厂获得额外经济效益。

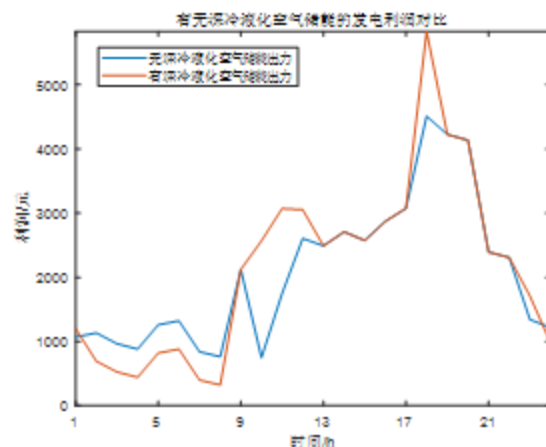


图 4 有无深冷液化空气储能发电利润对比

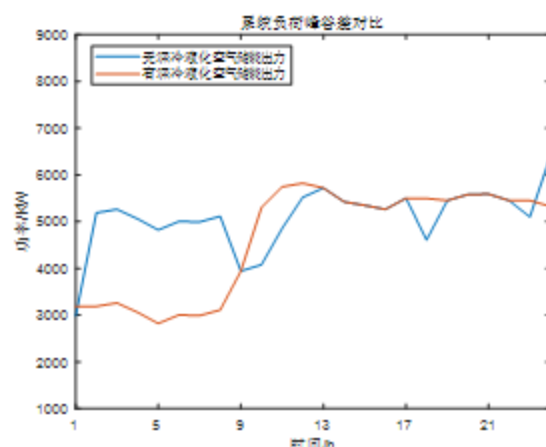


图 5 系统负荷峰谷差对比

## 4 结论

本文针对风电、光电等大规模可再生能源接入虚拟电厂带来的问题,提出一种计及深冷液化空气储能的虚拟电厂优化调度方法,建立计及深冷液化空气储能的虚拟电厂优化调度模型,解决高比例可再生能源接入虚拟电厂带来冲击电力系统的问题。建立充分考虑燃气成本、深冷液化空气储能的充放电约束的虚拟电厂联合优化调度模型。深冷液化空气储能系统平抑可再生能源的间歇性和不稳定性,促进可再生能源消纳,提升电网调峰能力,使储能与外部冷能、热能进行交换,提高能源利用率。仿真算例结果表明:计及深冷液化空气储能的虚拟电厂调度,可以平抑可再生能源的间歇性和不稳定性,削峰填谷,增强电网的灵活性和可靠性,获取最大发电收益。

## 参考文献

- [1] 霍志堂. 我国可再生能源发展领先世界[J]. 生态经济, 2022(12): 9-12.
- [2] 张涛, 刘树森, 王闯. 区域多能源电网可再生能源发电容量规划及投资收益优化模型[J]. 可再生能源, 2020, 38(5): 702-710.

- [3] 朱以晨, 李军祥, 莫非. 考虑供给与负荷转移的虚拟电厂调度策略[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2022, 39(6): 56-64.
- [4] 刘东, 樊强, 尤宏亮, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂的研究现状与展望[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 3-12.
- [5] 李昊, 刘畅, 苗博, 等. 考虑冷热电互补及储能系统的多园区综合能源系统协调优化调度[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1482-1491.
- [6] 徐康轩. 电力市场环境下的热电联合虚拟电厂储热配置及运行策略研究[D]. 浙江: 浙江大学 2023, 1-63.
- [7] 潘华, 梁作放, 薛强中, 等. 基于分时, 电价的含风-光-气-储虚拟电厂经济调度[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 115-122.
- [8] 陈永权, 方瑜. 多组合虚拟电厂中氢储能低碳经济配置与优化[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(3): 107-118.
- [9] 李顺杰, 庞宁, 黄安子, 等. 计及分布式储能响应的虚拟电厂优化调度模型研究[J]. 电子器件, 2022, 45(5): 1230-1234.
- [10] 阿热帕提·艾尼瓦尔, 陈洁, 廖跃洪, 等. 含深冷液化空气储能综合能源系统低碳经济调度[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 180-189.
- [11] 朱振山, 盛明鼎, 陈哲盛. 计及液态空气储能与综合需求响应的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 1-7.
- [12] 黄葆华, 葛俊, 倪经纬, 等. 深冷液化空气储能系统的关键影响因素规律[J]. 西安科技大学学报, 2019, 39(4): 672-680.

文章编号: 中图分类号: 文献标志码: 学科代码:

# 基于状态估计精度的配电网量测配置优化方法

吴家毓<sup>1</sup>

(1. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

## Measurement Configuration Optimization Method of Distribution Network Based on Accuracy of Pseudo Measurement and State Estimation

WU Jiayu<sup>1</sup>

(1. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** State estimation plays an important role in detecting the real-time running status of the system. Considering the shortage of measurement configuration in distribution network, this paper presents an optimization method of power measurement configuration for distribution network branches based on accuracy of state estimation. Firstly, the pseudo load measurement model based on Back-propagation neural network (BP) was established, and the influence of real-time branch power measurement on the model was considered. Then, the weight of each pseudo measurement is generated by analyzing the pseudo measurement error, and the real-time state estimation model based on weighted least square method is established. Finally, the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA2) is used to optimize the configuration of branch power measurement in order to minimize the output error of state estimation and the number of real-time measurement configurations. Example analysis shows that the precision of pseudo measurement model and state estimation output can be improved effectively by optimizing the configuration.

**KEY WORDS:** Distribution network; State estimation; Configuration optimization; Pseudo measurement; NSGA2

**摘要:** 状态估计是感知电力系统实时运行状况的重要手段。考虑到配电网量测配置不足的现状, 本文提出了一种基于状态估计精度的配电网支路功率量测配置优化方法。首先, 建立基于前馈神经网络(BP)的负荷伪量测模型, 并考虑实时支路功率量测对模型的影响; 然后, 通过对伪量测误差分析生成各伪量测的权重, 并建立了基于加权最小二乘法的实时状态估计模型; 最后, 最后以状态估计输出结果误差最小和实时量测配置数目最少为目标, 利用非支配排序遗传算法(NSGA2)对支路功率量测进行优化配置。算例分析表明, 通过优化配置可有效提高伪量测模型和状态估计输出结果的精度。

**关键词:** 配电网; 状态估计; 优化配置; 伪量测; NSGA2

**DOI:**

## 0 引言

状态估计是改善电力系统运行数据完整性、提高量测数据精度的关键手段。状态估计程序主要由可观性分析、状态估计算法、不良数据检测和辨识和参数估计等部分构成<sup>[1]</sup>。其中, 通过可观性分析可以确定系统是否可观, 满足系统可观性是完成状态估计的前提。在配电系统中, 由于节点规模大和拓扑结构多变的特点使得系统可观性难以满足<sup>[2]</sup>。在现有文献中, 主要是通过量测配置优化和伪量测建模两种方法来提高系统可观性<sup>[3]</sup>。

量测配置优化主要是通过辨识网络中关键量测节点来指导量测配置的安装, 达到以较少量测满足优化目标的目的。现有量测配置优化的目标主要有满足系统可观性、提高状态估计输出结果准确度、保证数值稳定性、保障系统运行可靠性和提高经济性等<sup>[4-9]</sup>。如文献[8]在优化配置时引入了最大状态量偏差的概念, 以估计误差的数值来评判系统可观性, 并考虑了量测分布对含分布式电源配电网停电损失的影响, 在满足系统可观的前提下提高了系统的供电可靠性; 文献[9]通过确定估计误差表达式的方法对量测节点的重要程度进行了排序, 使得配置的分布既满足了经济性要求, 也提高了状态估计结果的精度。在优化配置过程中, 满足系统可观是必要条件。但考虑到量测配置的安装难度和经济条件限制, 部分大型配电网即使对量测配置进行了优化也无法满足可观条件, 需要在输入中添加一定数量的伪量测。如文献[10]利用母线超短期负荷预测算法获得下一时刻电源节点的注入功率, 并通过潮流算法和功率分配原则得到负荷节点的功率伪量测。该算法所得到的伪量测数据均为预测所得, 实时跟踪系统变化的能力较弱。基于此, 文献[11-13]将实时和部分相关性较大的历史数据作为神经网络

络的输入,将负荷有功功率伪量测和负荷无功功率伪量测分别作为模型的输出,并通过高斯混合模型生成各伪量测权重。该方法考虑了能反映实时潮流的支路功率量测数据,并利用神经网络非线性映射的特点,使输出伪量测的精度达到较高水平。但其建模精度受实时量测数量和量测位置的影响较大。另外,现有关于量测配置优化的文献中对如何提高伪量测建模精度的研究较少。

在目前研究现状的基础上,本文提出了一种考虑状态估计与伪量测建模精度的配电网量测配置优化方法。首先将实时支路功率数据、负荷历史数据、天气数据和日期类型作为BP神经网络的输入,将负荷有功功率伪量测和负荷无功功率伪量测分别作为神经网络的输出建立伪量测模型,之后以实时量测数目最少和状态估计输出结果误差最小为目标函数,采用NSGA2算法确定支路功率实时量测的配置位置,最后在实际配电系统中验证本文所提方法的有效性。

## 1 配电系统状态估计基本原理

在电力系统状态估计中,若网络架构、网络参数和量测信息已知时,量测方程常用下式表示:

$$z = h(x) + v \quad (1)$$

式中:  $z$  为量测相量;  $h(x)$  为量测函数,可以表示量测相量和状态变量之间的函数关系;  $x$  为状态变量;  $v$  为量测量值与真实值之差。

状态估计的目标为求解式(1)中的状态变量  $x$ 。应用较为广泛的估计算法是加权最小二乘法,该算法收敛效果好,估计结果精度较高,其是通过求取量测估计值与输入量测值之差的加权最小平方和的最小值来计算状态变量最佳结果<sup>[14]</sup>。因此,目标函数可以表示为:

$$\min J(x) = (z - h(x))^T R^{-1} (z - h(x)) \quad (2)$$

式中:  $J(x)$  为迭代过程中的目标函数;  $R^{-1}$  为量测权重,常用量测误差方差的倒数表示。先对目标函数进行偏导计算,之后考虑到方程组的非线性特征,采用牛拉法进行迭代计算,同时采用泰勒展开并忽略二次以上非线性项的方式求取状态变量的修正值。得到的修正量的数学表达式为:

$$\Delta x_k = G(x_k)^{-1} H^T(x_k) R^{-1} [z - h(x_k)] \quad (3)$$

式中:  $\Delta x_k$  为状态变量的修正值;下标  $k$  表示迭代的次数;  $G(x_k)$  为增益矩阵,  $H(x_k)$  为雅可比矩阵,相应的计算公式为:

$$G(x_k) = H^T(x_k) R^{-1} H(x_k) \quad (4)$$

$$H(x_k) = \left[ \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right]_{x=x_k} \quad (5)$$

状态变量的迭代公式为:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta x_k \quad (6)$$

按照式(3)和式(6)进行迭代计算,直至修正值  $\Delta x_k$  小于收敛精度,此时所得结果即为最优估计值。最后通过潮流计算得到各支路量和节点量的估计值。

## 2 基于BP神经网络进行伪量测模型的状态估计

### 2.1 BP神经网络原理

BP神经网络是一种基于误差反向传播算法的多层前馈神经网络。BP神经网络算法包括正向的信号传递和反向的误差传播两个过程,其中,信号传递过程就是计算当前神经网络模型输出值与真实值的误差,按照输入到输出方向进行。误差传播过程就是根据误差大小调整神经网络模型的权值和阈值,按照从输出到输入的方向进行。BP网络在输入层与输出层之间还存在若干隐层神经元,称为隐含层,其状态的变化能够直接影响输入与输出之间的关系<sup>[15]</sup>。本文选用带有一个隐含层的BP神经网络作为状态估计伪量测的训练模型,并选择sigmoid函数作为节点之间的作用函数。

在BP神经网络中,常用梯度下降法来训练模型的权值和阈值,使参数沿着误差梯度的反方向变化,直至误差取到极小值,但该方法的线性收敛速度较慢。本文采用的是梯度下降法与高斯-牛顿法相结合的Levenberg-Marquardt(L-M)算法,该算法既保留了梯度法全局收敛的优点,还具有高斯-牛顿法的局部收敛特性,加快了收敛速度,并克服了原有神经网络容易陷入局部最小点的缺陷<sup>[16]</sup>。L-M算法的误差指标函数可由下式表示:

$$E(w) = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^U \|Y_u - Y'_u\|^2 = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^U e_u^2(w) \quad (7)$$

式中:  $Y_u$  为期望的神经网络输出;  $Y'_u$  为实际的神经网络输出;  $U$  为样本数目;  $w$  为网络的权值和阈值组成的变量;  $e_u(w)$  为误差。

L-M是一种通过牛顿法进行迭代计算使误差指标  $E(w)$  达到最小的算法。在每次迭代过程中,权值增量  $\Delta w$  的计算公式为:

$$\Delta w = [J^T(w)J(w) + \mu I]^{-1} Q^T(w)e(w) \quad (8)$$

式中： $\mathbf{I}$ 为单位矩阵； $\mu$ 为设定的学习率； $Q(w)$ 为权值对应的雅可比矩阵，计算公式为：

$$Q(w) = \frac{\partial e(w)}{\partial w} \quad (9)$$

## 2.2 伪量测模型的训练阶段

本文对负荷节点的注入功率进行了伪量测建模。

本文采用2.1节所示的BP神经网络对各负荷节点的有功功率和无功功率进行伪量测建模，共需训练两类BP神经网络模型。第一类神经网络的输入为配置量测支路的支路实时有功功率、负荷节点历史注入有功功率、历史和当前时刻的天气类型以及日期类型，输出为各负荷节点当前时刻的注入有功功率伪量测；第二类神经网络的输入为配置量测支路的支路实时无功功率、负荷节点历史注入无功功率、历史和当前时刻的天气类型以及日期类型，输出为各负荷节点当前时刻的注入无功功率伪量测。其中，各时刻伪量测输入的历史数据均取前7天内相同时刻对应的数据；日期类型包括周日期（周一至周日）和是否节假日。以第一类BP神经网络为例，某负荷节点有功功率伪量测的训练过程如下所示：

(1) 采集日前一年的负荷数据，并利用潮流程序计算一年的全网潮流；

(2) 将各时刻有功功率由对应的输入数据串联成相量表示，并将各时刻的相量组合生成的输入特征矩阵作为模型的输入；

(3) 通过L-M算法训练BP神经网络的权值和阈值，得到网络的输出，即负荷节点的注入有功功率伪量测；

(4) 将网络实际输出与负荷潮流真值作比较，得出误差信号，通过误差信号来调整BPNN权值连接的强度；

(5) 判断误差信号是否低于设定的误差阈值，若已满足，则转入步骤(5)，否则，转为步骤(3)；

(6) 记录各时刻BP神经网络的输出值和相应的误差。

综上所述，BP神经网络的输出误差即为伪量测误差。同理，可以完成负荷无功功率伪量测的BP神经网络训练，并获得所需伪量测值和伪量测误差。

在基于加权最小二乘法的状态估计中，量测权重直接影响估计结果的精度。本文将BP神经网络输出的伪量测误差输入到高斯混合模型中获得各误差的概率分布，之后通过概率密度函数确定各误

差对应的高斯分量。各误差高斯分量方差数值的倒数即为对应伪量测的权重。实时伪量测权重一般由与当前时刻相关性较大历史时刻对应的权重代替。

## 2.3 基于伪量测模型的实时状态估计阶段

完成负荷功率伪量测的训练和量测误差拟合之后，即可对配电系统进行实时状态估计。首先将当前时刻的实时支路量测数据、天气因素、日期类型和历史数据输入训练好的神经网络中，获得当前时刻负荷的伪量测值；之后通过误差生成伪量测权重；最后将实时量测、伪量测和虚拟量测以及各量测对应权重输入到状态估计程序中，求得状态变量和各量测的估计值。

## 3 基于NSGA2算法的量测优化配置模型

由第2节可知，该文所用伪量测模型输出结果的精度受实时支路功率量测的影响较大。为进一步提高伪量测建模精度、减小状态估计计算结果的误差，本章对实时支路功率量测进行了优化配置。

### 3.1 目标函数

在建立配电网支路功率最优量测配置数学模型时候，首先要考虑到的估计结果的精度，目标函数1应为状态估计输出结果误差最小，另外，考虑到建设成本，应综合考虑量测配置的数量，因此目标函数2设置为支路功率量测配置数量最少。

(1) 目标函数1：状态估计输出结果误差最小

当配置情况确定时，将具有量测配置支路的功率数据作为输入对第2节所示的伪量测模型进行训练，得到各负荷节点的注入有功功率伪量测和注入无功功率伪量测。之后将实际量测和伪量测构成量测集合进行第1节所示的状态估计过程。在配电系统中，电力负荷波动较小，导致状态估计输出的电压相量变化不明显。因此本文选用输出量测估计误差平均值最小作为目标函数，具体公式为：

$$F_1 = \min \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{M+N_j} [(P_{ij}^e - P_{ij})^2 + (Q_{ij}^e - Q_{ij})^2]} \quad (10)$$

式中：下标 $t$ 和下标 $j$ 分别表示估计时刻和功率编号，其中功率编号中同时包括支路功率的编号和负荷节点的编号； $M$ 和 $N_j$ 分别表示网络的支路数目和负荷节点数目； $P$ 、 $Q$ 分别表示状态估计程序输出的有功功率和无功功率的量测估计值； $P$ 、 $Q$ 分别表示潮流计算所得的有功功率和无功功率的真值； $M$ 为状态估计的计算次数，本文取96。

(2) 目标函数2：量测配置数量最少

本文采用二进制的方式对进行编码，并用向量 $L$ 来表示量测配置情况，向量中的元素数目与配电网络的支路数目相同。若某条支路安装量测配置，



赋值为“1”，若未安装量测配置，则赋值为“0”。因此，目标函数2可以设置为向量 $L$ 中元素“1”的个数最少。数学表达如下所示：

$$F_2 = \min \text{sum}(L) \quad (11)$$

### 3.2 NSGA2 算法配置及流程

本文建立的是多目标优化模型，目的是在两个目标函数中进行综合权衡，使目标函数均达到较优解。对于多目标优化问题，常用的方法是多目标函数通过加权的方式合并为单目标函数，但该方法在权重赋值方面具有较大的主观性，且权重固定时只能求出一个可行解，无法保证 Pareto 解集的多样性。近年来，对于求解多目标优化问题，NSGA2 算法表现出了更加优越的性能。相较于传统优化方法，NSGA2 算法包含了快速非支配排序、拥挤度和拥挤度比较算子的计算、精英策略选择等步骤，能够有效降低运行的复杂度，并保证解集均匀分布且具有多样性。因此，本文选用 NSGA2 算法求解所提多目标优化模型。

## 4 算例仿真

### 4.1 算例描述

本文选取安徽省某配电线路进行算例验证，电压等级为 10.5kV，其网络拓扑图及节点编号如图 1 所示。该网络共包含 8 个零注入节点、12 个负荷节点和 20 条支路。本文算例是由 MATLAB R2019b 编程实现。



图 1 配电线路系统结构图

Fig 1 System structure diagram of distribution line

### 4.2 量测优化结果及精度提高效果分析

本算例采用 NSGA2 算法求解量测配置多目标优化模型，在求解目标函数时，分别建立了基于 BP 神经网络的伪量测模型和基于加权最小二乘法的状态估计模型。伪量测模型中，选择系统 2019 年 5 月 1 日至 2020 年 5 月 1 日的负荷数据及相关特征数据作为训练集，2020 年 5 月 2 日的相关数据作为测试集。其中，支路数据是由负荷数据经过潮流计算获得，并以潮流计算结果作为真实值。之后基于 5 月 2 日的伪量测数据、实时数据、虚拟量测数据以及各量测权重完成状态估计过程，其中实时数据是由真值叠加随机误差生成。在配置 NSGA2 算法时，种群数设为 50，迭代次数为 100，种群中个体的元素数为 20，即网络支路数。量测优化配置完成后，可得到图 4 所示的 Pareto 解集的分布。

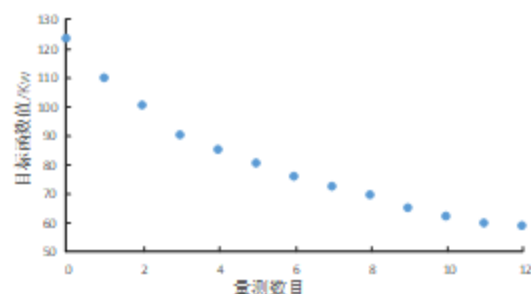


图 2 优化模型 Pareto 解的分布

Fig 2 Distribution of Pareto solution of optimization model

图 2 纵坐标可以表示状态估计误差。从图 2 可以看出，本文模型达到了较好的收敛效果。当量测配置位置合理时，随着量测配置数目的增多，状态估计的精度会逐步提高。另外，当配置数量为 0 至 6 之间时，状态估计输出结果的误差降低得较为明显；当配置数量超过 10 时，再增加量测配置数目，状态估计输出结果误差的变化幅度变得较小。因此，量测配置数量在 6 至 10 之间时最为合适。配置数量为 6 至 10 时量测配置的具体位置如表 1 所示。之后可以根据配置位置权衡安装难度和安装成本等因素，进而确定最佳的配置方案。

表 1 量测最优布点

Table 1 Optimal position of measurement

| 配置数目 | 状态估计误差/kW | 最优配置位置                                               |
|------|-----------|------------------------------------------------------|
| 6    | 75.92866  | 支路 2-3、2-7、9-10、10-11、12-13、3-18                     |
| 7    | 72.50165  | 支路 2-3、5-6、2-7、7-8、9-10、10-11、3-18                   |
| 8    | 69.61065  | 支路 2-3、4-5、5-6、2-7、7-8、10-11、12-14、10-15             |
| 9    | 65.13704  | 支路 2-3、4-5、5-6、2-7、7-8、10-11、12-13、15-16、18-19       |
| 10   | 62.25408  | 支路 2-3、4-5、5-6、2-7、7-8、10-11、12-13、12-14、15-16、18-19 |

为验证本文所提优化模型输出的量测配置也可有效提高伪量测建模精度，本算例还计算了 Pareto 解集中各量测集合对应有功伪量测模型和无功伪量测模型的输出结果误差，分别用平均有功功率绝对百分误差和平均无功功率绝对百分误差来表示，计算公式如式(12)和式(13)所示。

$$M_{PEM} = \frac{1}{N_f} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{t=1}^T \left| \frac{P_{i,act}(t) - P_{i,out}(t)}{P_{i,act}(t)} \times 100\% \right| \quad (12)$$

$$M_{QEM} = \frac{1}{N_f} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{t=1}^T \left| \frac{Q_{i,act}(t) - Q_{i,out}(t)}{Q_{i,act}(t)} \times 100\% \right| \quad (13)$$

式中： $M_{PEM}$  和  $M_{QEM}$  分别表示各负荷有功功率伪量测和各负荷无功功率伪量测的平均绝对百分误差的值； $T$  表示每个负荷伪量测建模的次数，应与优化过程中状态估计次数相同，取 96； $P_{i,act}(t)$  和  $Q_{i,act}(t)$  分别表示第  $i$  个负荷在  $t$  时刻有功功率伪量测模型和无功功率伪量测模型的输出； $P_{i,out}(t)$  和

$Q_{i,act}(t)$  分别表示第  $i$  个负荷在  $t$  时刻有功功率量测和无功功率量测的真实值。有功伪量测误差和无功伪量测误差的分布情况分别如图 3(a) 和 3(b) 所示:

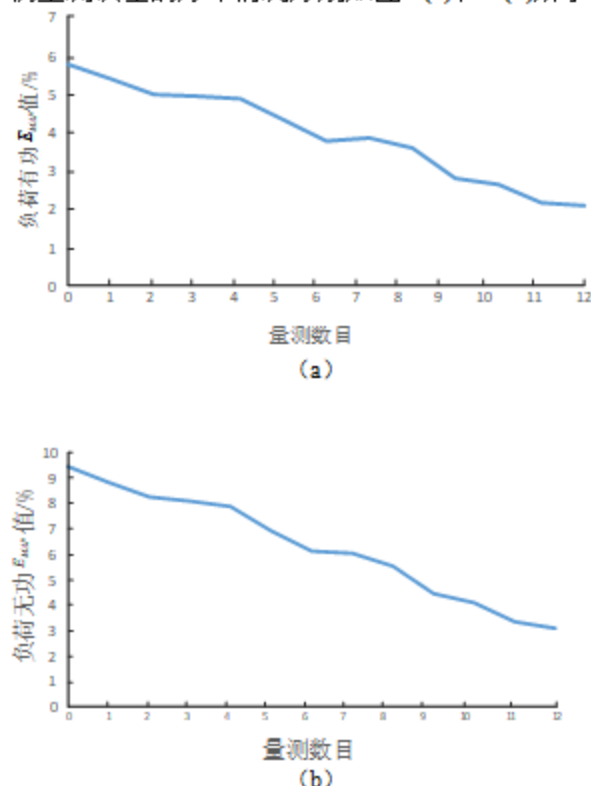


图 3 Pareto 解对应的伪量测误差分布

Fig.3 Pseudo-measurement error distribution corresponding to Pareto solution

从图 3 可以看出,伪量测误差也会随着量测数量的增多而减小,在量测配置数量为 6 至 10 时,输出伪量测的精度也达到较高水平。

## 5 结论

为进一步提高配电网实时感知系统运行状况的性能,本文提出了一种基于伪量测与状态估计精度的配电网量测配置优化方法。该优化模型充分考虑了支路功率实时量测配置的数量和位置对伪量测和状态估计模型的影响,以状态估计输出结果误差最小和量测配置数量最少为目标函数,采用 NSGA2 算法对支路功率量测进行了优化配置。算例结果表明,本文所建立的优化模型收敛性能好,优化结果较为理想,可以通过尽量少的量测配置来有效提高伪量测模型和状态估计程序输出结果的精度。

## 参考文献

- [1] 吴在军,徐俊俊,余星火,等.主动配电网状态估计技术评述[J].电力系统自动化,2017,41(13):182-191. DOI: 10.7500/AEPS20161123001.
- [2] 李易群,张强,陈凡,蒋天琪,徐慧敏.配电网状态估计综述[J].电工技术,2019(09):19-23.
- [3] 徐巨,余皓鑫.提高配电网状态估计精度的量测配置优化方法[J].电力自动化设备,2009,29(07):17-21.

- [4] Kandenkavil S V, Bhattacharya K. Optimization approaches to distribution system state estimation for optimal meter placement[C]// IEEE Electrical Power and Energy Conference. Toronto, Canada, 2018.
- [5] Wu Zhi, Du Xiao, Gu Wei, et al. Optimal PMU placement considering load loss and relaying in distribution networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 33645-33653.
- [6] Brinkmann B, Scott R, Bicevskis K, et al. A practical approach to meter placement in distribution networks[C]// IEEE Manchester PowerTech. Manchester, England, 2017.
- [7] 戴桂木,王萌萌,周力.基于支路可观的有源配电网信息采集点优化布置研究[J].电工电气,2015(10):12-15,45.
- [8] 戴桂木,吴在军,徐俊俊,等.有源配电网 FTU 优化布置研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(23):86-93.
- [9] 徐巨,余皓鑫.提高配电网状态估计精度的量测配置优化方法[J].电力自动化设备,2009,29(7):17-21.
- [10] 卫志农,谢铁明,孙国强.基于超短期负荷预测和混合量测的线性动态状态估计[J].中国电机工程学报,2010,30(01):47-51.
- [11] 孙国强,钱峰,陈亮,等.基于深度信念网络伪量测建模的配电网状态估计[J].电力自动化设备,2018,38(12):94-99.
- [12] Manitsas E, Singh R, Pal B C, et al. Distribution system state estimation using an artificial neural network approach for pseudo measurement modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1888-1896.
- [13] 黄基云,孙国强,卫志农,等.基于脉冲神经网络伪量测建模的配电网三相状态估计[J].电力系统自动化,2016,40(16):38-43+82. DOI: 10.7500/AEPS20151207006.
- [14] 张明光,张钰.基于 ANN 伪量测建模的配电网状态估计[J].计算机工程与应用,2016,52(17):253-256+260.
- [15] 怀金,侯小虎,何良策,等.一种含分布式电源的中低压配电网状态估计方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(21):69-77.
- [16] 陈得治,郭志忠.基于表计配置的配电网可观性分析[J].中国电机工程学报,2005(12):35-41.

收稿日期:

作者简介:

吴家骥(1999 年),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: wjy2223@163.com;



吴家骥

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于改进 DeepLab V3+神经网络的多栋屋顶建筑 图像语义分割研究

康 澜, 欧阳森, 彭 琦, 赵睿凯, 张杰宁

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

## Research on Semantic Segmentation of Images of Multi-building Roofs Based on Improved DeepLab V3+ Neural Network

KANG Lan, OUYANG Sen, PENG Qi, ZHAO Ruikai, ZHANG Jiening

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**ABSTRACT:** Distributed photovoltaics (PV) has surpassed centralized PV in power generation and construction operation, making rapid extraction of rooftop areas crucial for reducing barriers to distributed PV development. To achieve semantic segmentation of complex multi-building rooftop images, this paper proposes a rooftop area extraction method based on an improved DeepLab V3+ neural network. First, addressing the issue of publicly available datasets being ambiguous and not representative of Chinese architectural features, we curated a dataset covering five common rooftop types. Second, to enhance accuracy in rooftop extraction, we employed an improved DeepLab V3+ neural network incorporating the CBAM attention module. Finally, testing on actual datasets from the Jiangmen area validated the effectiveness of the proposed algorithm.

**KEY WORDS:** Semantic Segmentation; Improved DeepLab V3+ Neural Network; CBAM Attention Module; Multi-building Roofs; Image Dataset

**摘要:** 分布式光伏在发电运行建设方面现已超过集中式光伏, 如何快速提取屋顶区域成为减少分布式光伏发展阻力的重要问题。为了实现面向复杂多栋屋顶图像的语义分割, 本文提出了一种基于改进 DeepLab V3+神经网络的屋顶区域提取方法。首先, 针对公开数据集模糊且不符合我国建筑特征的问题, 本文制作了覆盖五种常见屋顶类型的多栋屋顶图像数据集。其次, 为了提升屋顶提取的准确率, 本文采用引入了CBAM注意力模块的改进 DeepLab V3+神经网络。最后, 通过实际江门地区数据集进行测试, 验证了本文提出算法的有效性。

**关键词:** 语义分割; 改进 DeepLab V3+神经网络; CBAM注意力模块; 多栋屋顶建筑; 图像数据集;

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

### 0 引言

自2020年提出双碳目标以来, 我国新型电力系统建设不断向高比例新能源接入和高比例电力电子化设备方向发展。分布式光伏的发展趋势不断增高, 如何实现分布式光伏资源快速精确测算成为了光伏发展的重要问题。屋顶光伏资源的测算需要以屋顶区域的提取作为基础, 由卫星遥感图像进行屋顶区域提取可以实现提取的高效性, 大大减少计算屋顶面积所耗费的人力资源。

非神经网络式的传统屋顶区域提取算法依赖于人工构建提取规则, 难以满足复杂场景下的屋顶区域提取。文献[1]提出的EDlines直线提取算法充分利用了图像梯度信息, 通过锚点生长的方式准确且快速获得图像直线, 但无法避免直线形状的非屋顶边缘噪声。文献[2]提出一种基于主方向信息约束的建筑物边缘提取算法, 通过旋转图像计算最小秩的方式得到屋顶边缘方向信息, 以此作为屋顶边缘的识别依据, 但不适合排列混乱的多栋屋顶识别。文献[3]将Otsu法从单阈值图像分割扩展至多阈值图像分割, 可以大致区分图像前景和背景, 但无法满足屋顶区域识别的精度要求。

卷积神经网络作为目前提取屋顶区域的主流算法, 相较于传统算法有着准确率高、泛用性强的特点。屋顶区域提取属于图像分割中的语义分割任务, 相应的主流神经网络有U-Net、DeepLab等。U-Net是一种适用于小样本数据的神经网络, 其网络结构呈现出“U”形, 具有编码器-解码器结构(Encoder-Decoder), 可以通过待训练对象的特征复杂度对网络进行结构调整[4]。Mask-RCNN是一种实例分割神经网络, 网络包含特征金字塔网络FPN、区域建议网络RPN、感兴趣区域对齐层, 可以同时实现检测目标的框定和分割[5]。DeepLab系

列神经网络是 Google 公司研发的语义分割神经网络,截止至 2018 年经历过 3 次版本更新,采用了空洞卷积(Atrous Convolution, AC)、空洞空间金字塔池化(Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP)、深度可分离空洞卷积(Depthwise Separable Atrous Convolution, DSAC)、Encoder-Decoder 等技术,适用于多尺寸对象的高精度识别[6~8]。数据集的选择对神经网络的性能至关重要,现有的多栋屋顶建筑公开数据集大多取自国外建筑[9],所含屋顶不符合我国建筑复杂多样的特点。

注意力模块机制是一种对待处理信息的加权处理优化,其原理基于生物注意力机制,可以加强神经网络对重要特征的提取并弱化次要特征的干扰。SE 注意力模块将输入特征张量按通道分解并采用全连接层训练各通道权重[10];ECA 模块在 SE 模块的基础上,将全连接层改进为卷积层,提高了训练精度[11];CA 注意力模块在输入特征张量分解时考虑了图像的空间结构,分为了水平和垂直分量[12];CBAM 注意力模块综合考虑了通道特性与空间特性,通过通道注意力模块和空间注意力模块有效提取了输入信息的权重[13]。

本文提出一种基于改进 DeepLab V3+神经网络的屋顶区域分类提取方法,通过引入 CBAM 注意力模块机制,提高了神经网络识别屋顶的准确性。网络训练、验证、测试采用 804 张从江门市截取的多栋屋顶图库和 204 张全球城市图库,并通过 200 张额外的江门屋顶图片进行仿真。下图为本文提出的算法流程。



图1 本文算法流程图

Fig.1 Flow of algorithm

## 1 数据集

### 1.1 全球城市数据集

全球城市数据集(Global City dataset, GC)是 Ji 等人收集的多栋屋顶图像数据集,属于卫星数据集(satellite imagery data set)的子集[9]。该数据集取自世界各国城市地区和 QuickBird、Worldview 系列等资源,含有 204 张  $512 \times 512$  像素的多栋屋顶建筑图像与标注图,分辨率范围是每像素 0.3m~2.5m。

全球城市数据集图内建筑的复杂程度和密集程度接近国内建筑,十分适合作为国内屋顶建筑语

义分割的神经网络训练和验证图像。

### 1.2 江门数据集

考虑到国内建筑类型多样、楼宇间距不一、地貌特征多异的特点,本文将国内多栋屋顶建筑概括为密集杂乱型、密集整齐型、高楼型、工业建筑型和郊区型五种类别,各类特征明显,可以涵盖大部分国内建筑。其中,密集杂乱型屋顶与密集整齐型屋顶以建筑之间是否相隔适当距离且排列整齐作为划分依据。

本文制作了含 804 张多栋屋顶建筑图像的江门数据集,其中包含 196 张密集杂乱型屋顶图片、164 张密集整齐型屋顶图片、157 张高楼型屋顶图片、130 张工业建筑型屋顶图片和 157 张郊区图片。所有图片尺寸均为  $512 \times 512$  像素,且分辨率为每像素 0.32m。

## 2 改进的 DeepLab V3+神经网络

### 2.1 DeepLab V3+神经网络

DeepLab 系列神经网络是由 Google 公司研发,专门处理图像语义分割任务的神经网络。截止至 2018 年,该系列一共发布了 V1、V2、V3、V3+四个版本。通过 AC、ASPP、DSAC 和 Encoder-Decoder 技术,DeepLab V3+相比于同时期的其它语义分割神经网络具有准确率高、效率高、适用于不同尺度对象识别的优点。

#### 2.1.1 空洞卷积

AC 通过扩大卷积核的感受野,使网络可以在不增加计算需求的同时提取任意尺度的对象特征。

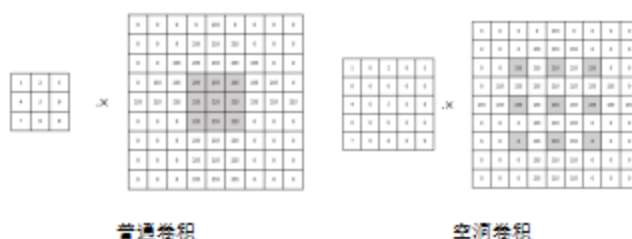


图2 普通卷积与空洞卷积

Fig.2 Regular convolution and dilated convolution

以提取图 2 的箭头中心处特征为例,假设普通卷积核尺寸为  $l \times l$ ,普通卷积的卷积核只能提取中心像素邻域为  $l \times l$  范围内的图像特征,而 AC 通过对卷积核进行填充 0 的处理,使卷积范围扩大为  $(l+r_a-1) \times (l+r_a-1)$ ,其中  $r_a$  为空洞率,即卷积核

有效权重之间的距离, $r_a=1$ 时空洞卷积退化为普通卷积。

AC 在保持计算量不变的前提下, 扩大了卷积的感受野。但感受野并非越大越好, 过大的感受野会减少卷积的有效计算量, 故感受野应该匹配图像的特征尺寸。

### 2.1.2 空洞空间金字塔池化

为了识别同一图像内不同尺寸的对象, DeepLab 神经网络内包含了 ASPP 模块。ASPP 模块通过不同空洞率的卷积核对特征图进行卷积, 并将各个卷积结果按通道叠加, 可以输出包含不同尺寸的特征图。

本文采用的 ASPP 模块如图 3 所示。由于每条支路采用了不同空洞率的卷积核, 输出特征张量可以存储图中五种尺寸的特征信息。

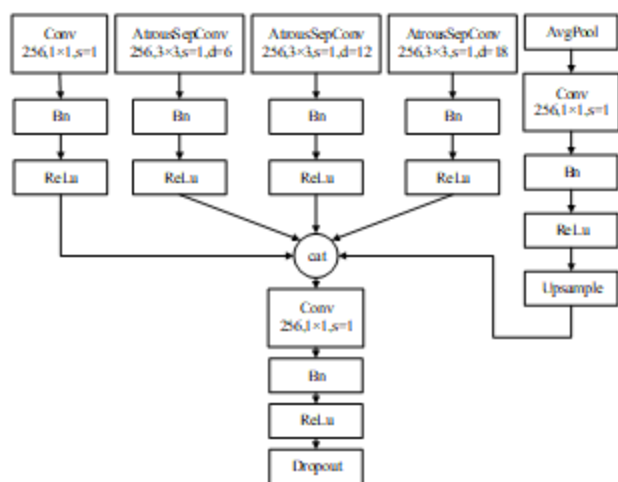


图3 ASPP 模块

Fig.3 ASPP module

### 2.1.3 编码器-解码器结构

Encoder-Decoder 强调神经网络把特征逐层下采样后, 逐层上采样的特点。编码器负责提取图像特征, 并逐层提取更深、更抽象的特征图; 解码器负责将高分辨的深层特征图恢复至原图尺寸, 即恢复特征图在编码过程中损失的细节。

DeepLab V3+的 Encoder-Decoder 结构如图 4 所示。DeepLab V3+的编码器可以是 Xception、DeepLab V3 等; 解码器先提取主干网络里的低层特征图, 再和经过逐点卷积、上采样的 ASPP 模块输出级联, 最后卷积并上采样得到分割结果。

### 2.1.4 空洞深度可分离卷积

DSAC 是在深度可分离卷积 (Depthwise Separable Convolution, DSC) 的基础上, 使用 AC 的技术, 可以在保持 AC 效果的同时, 减少卷积的计算量[11]。

DSC 将普通卷积分解成空间卷积和逐点卷积, 其中空间卷积只用一种卷积核, 逐点卷积用  $1 \times 1$

尺寸的卷积核, 计算量占普通卷积的  $\frac{1}{N} + \frac{1}{D_k^2}$ 。

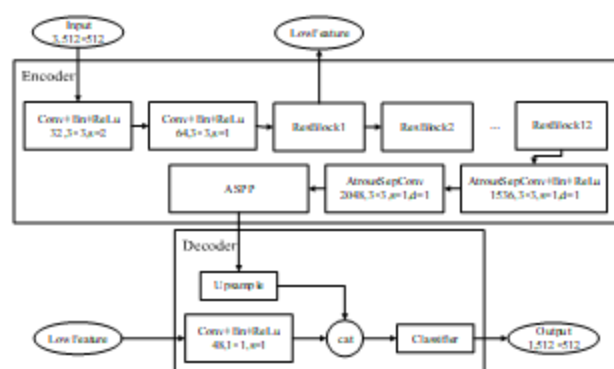


图4 Encoder-Decoder 结构

Fig.4 Encoder-Decoder structure

### 2.2 CBAM 注意力模块

CBAM 注意力模块模仿了生物注意力机制, 通过通道注意力模块和空间注意力模块分别计算输入特征张量的通道权重与空间权重, 以达到提高重要特征的目的。

如图 5 所示, CBAM 会依次提高重要通道特征和重要空间特征的关注意度。通道注意力模块通过对各个通道分别进行平均池化和最大池化, 并由  $1 \times 1$  卷积提取权重分量, 最后叠加并激活即可得到通道权重。空间注意力模块与通道注意力模块类似, 不同在其计算平均与最大信息时针对的维度是空间维度。

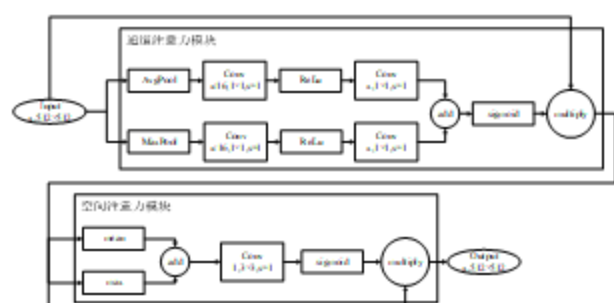


图5 CBAM 注意力模块

Fig.5 CBAM attention module

CBAM 注意力模块可以保持输入与输出的尺寸不变, 可以灵活地添加在网络的不同节点之中。本文通过将 CBAM 注意力模块添加在每个卷积层之后, 提高了 DeepLab V3+ 的提取特征能力。

## 3 算例仿真

### 3.1 实验环境与训练参数

本文神经网络的训练、验证、测试平台为基于 Python 3.12.2 的 Pytorch 2.2.2 开源机器学习库, 采用的设备是 NVIDIA Geforce RTX 4080Super GPU

显卡。训练参数如表 1 所示。

表 1 神经网络训练参数

| Table 1 Neural network training parameters |                          |
|--------------------------------------------|--------------------------|
| 训练集与验证集数量                                  | 706+151 (数据集对比仿真: 江门+GC) |
|                                            | 568+120 (注意力模块对比仿真)      |
| 测试集数量                                      | 100 (数据集对比仿真)            |
|                                            | 120 (注意力模块对比仿真)          |
| 单批训练批量                                     | 16                       |
| 总训练代数                                      | 3000 (数据集对比仿真)           |
|                                            | 30000 (注意力模块对比仿真)        |
| 验证间隔                                       | 1000                     |
| 数据增强操作                                     | 随机缩放[0.8~1.2]            |
|                                            | 随机水平翻转                   |
| 编码器主体                                      | Xception                 |
| 输出步长                                       | 16                       |
| 学习率                                        | 0.01                     |
| 学习率衰减策略                                    | Poly                     |
| 权重衰减率                                      | 0.0001                   |

### 3.2 评估指标

屋顶区域提取应用属于二分类的语义分割任务, 各类相关的评估指标以混淆矩阵为基础。混淆矩阵的定义如表 2 所示, 其中“实际真”指图像中实际属于屋顶区域的像素, “预测真”指预测结果为屋顶区域的像素, “实际假”与“预测假”定义类似。

表 2 混淆矩阵

| Table 2 Confusion matrix |     |     |
|--------------------------|-----|-----|
|                          | 预测真 | 预测假 |
| 实际真                      | TP  | FN  |
| 实际假                      | FP  | TN  |

以混淆矩阵衍生出的评估指标有准确率 (Accuracy)、精确率 (Precision)、F1 分数 (F1 score)、交并比 (Intersection Over Union, IoU) 等, 本文以 Accuracy 与 IoU 作为评估网络的指标, 相关公式如式 1 和式 2 所示。

#### (4) 准确率

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (1)$$

准确率是预测正确的像素个数与像素总数的比例, 可以体现网络的预测能力, 但无法针对单一类别体现预测能力。

#### (2) 交并比

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (2)$$

IoU 是预测正确的前景像素个数与前景附近区域像素总数的比例, 前景附近区域像素包含前景与预测溢出像素, 因此若预测错误而溢出的像素越多, IoU 将越小, 使得 IoU 具有评价前景类别预测能力的功能。

### 3.3 数据集对比仿真

为验证江门数据集与全球城市数据集适用于我国屋顶建筑提取任务, 以江门地区的 100 张多栋建筑数据集作为测试集, 分别用由 GC 数据集单独训练、由江门数据集和全球城市数据集共同训练得出的 DeepLab V3+神经网络进行预测, 预测结果如表 3 所示。

从实验结果可知, 由江门数据集与 GC 数据集共同训练的 DeepLab V3+ 可提高 Accuracy 约 11.06%, 提高 IoU 约 22.04%。

表 3 不同数据集训练结果的评估对比

| Table 3 Simulation results comparison across different dataset |          |        |
|----------------------------------------------------------------|----------|--------|
| 训练用数据集                                                         | Accuracy | IoU    |
| 江门+GC                                                          | 88.74%   | 53.59% |
| GC                                                             | 77.68%   | 31.55% |

### 3.4 注意力模块对比仿真

为验证通过 CBAM 注意力模块提高 DeepLab V3+ 的网络性能的优越性, 以江门数据集与 GC 数据集随机 120 张数据集作为测试集, 分别设置不添加注意力机制、添加 CBAM 模块至主干各个卷积层后与 ASPP 模块末端 (简称主干和末端) 两种方案的对比, 预测结果如表 4 所示。

表 4 不同注意力模块方案结果的评估对比

| Table 4 Simulation results comparison across different attention module |          |        |
|-------------------------------------------------------------------------|----------|--------|
| 注意力模块方案                                                                 | Accuracy | IoU    |
| 不添加注意力机制                                                                | 85.31%   | 49.78% |
| 添加 CBAM 模块至主干与末端                                                        | 88.02%   | 58.72% |

从实验结果可知, 添加 CBAM 至主干与末端可以提高 Accuracy 约 2.71%, 提升 IoU 约 8.94%。

## 4 结论

本文针对当前开源多栋屋顶数据集难符合国内屋顶建筑特点的问题, 提供了 804 张江门市数据集, 并通过数据集对比仿真证明了江门数据集和 GC 数据集的实用性。针对神经网络语义分割精度问题, 本文提出了添加 CBAM 注意力模块的改进 DeepLab V3+神经网络, 并通过注意力模块对比仿



真证明了 CBAM 模块在改进网络提取多栋屋顶区域应用的优越性。

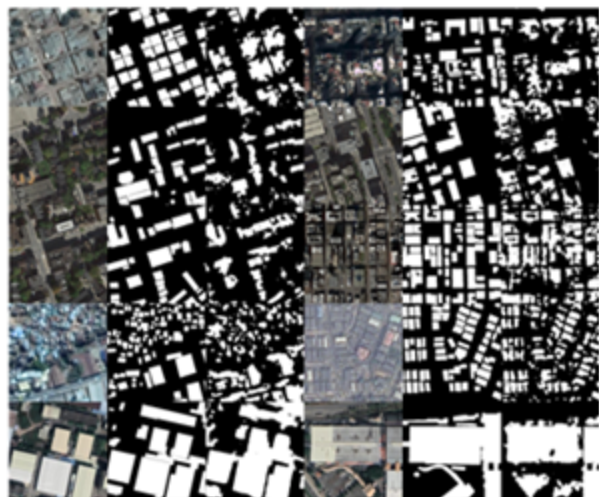


图 6 最优 IoU 算例效果展示  
Fig.6 Display of Best IoU Cases

[14] F Chollet . Xception Deep Learning with Depthwise Separable Convolutions[J]. arXiv, 2017.

作者照片  
康润(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为计算机图像识别、配电网规划与电能质量研究, E-mail: 1799523697@qq.com;  
欧阳森(1974), 男, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为电力系统规划与运行等, E-mail: ouyangs@scut.edu.cn.

## 参考文献

- [1] Cuneyt Akinlar, Cihan Topal . EDLines A real-time line segment detector with a false detection control [J] . Pattern recognition letters, 2011.
- [2] 郝东川. 高分辨率可见光遥感图像建筑物提取方法研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2020 年.
- [3] 王 磊, 殷会川. Otsu 方法在多阈值图像分割中的应用[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(11): 2844-2845.
- [4] 苏健明, 杨真心, 景维鹏. 基于 U-Net 的高分辨率遥感图像语义分割方法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(7): 207-213.
- [5] 夏德祥, 刘 渝, 赵程钱, 等. 基于子空间多尺度特征融合的遥感语义分割 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2023, 49(3): 429-438.
- [6] Liang-Chieh Chen, George Papandreou, Iasonas Kokkinos, et al. Deeplab Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs[J]. arXiv, 2017.
- [7] Liang-Chieh Chen, George Papandreou, Florian Schroff, et al. Rethinking Atrous Convolution for Semantic Image Segmentation[J]. arXiv, 2017.
- [8] Liang-Chieh Chen, Yukun Zhu, George Papandreou, et al. Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation[J]. arXiv, 2018.
- [9] Shunping Ji, Shiqing Wei, Meng Lu. Fully Convolutional Networks for Multisource Building Extraction From an Open Aerial and Satellite Imagery Data Set[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019.
- [10] Jie Hu, LiShen, Samuel Albanie, et al. Squeeze-and-Excitation Networks[J]. arXiv, 2019.
- [11] Qilong Wang, Banggu Wu, Pengfei Zhu, et al. ECA-Net Efficient Channel Attention for Deep Convolutional neural networks[J]. arXiv, 2019.
- [12] Qibin Hou, Daquan Zhou, Jiashi Feng. Coordinate Attention for Efficient Mobile Network Design[J]. arXiv, 2021.
- [13] Sanghyun Woo, Jongchan Park, Joon-Young Lee, et al. CBAM Convolutional Block Attention Module[J]. arXiv, 2018.

# 基于虚拟现实技术与 SLIC 超像素分割法的电气设备三维红外可视化方案

郜子阳<sup>1</sup>, 廖晓辉<sup>1</sup>, 蔡志龙<sup>2</sup>

(郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网漯河供电公司, 河南 漯河 462324)

## Three-dimensional Infrared Visualization Scheme for Electrical Equipment Based on Virtual Reality Technology and SLIC Superpixel Segmentation Method

GAO ZiYang<sup>1</sup>, LIAO XiaoHui<sup>1</sup>, CAI ZhiLong<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. State Grid Luohe Power Supply Company, Luohe 462324, Henan)

**Abstract:** This paper focuses on the problem that the operating status of equipment cannot be presented in the virtual substation of the power system. It proposes a solution for constructing three-dimensional infrared visualization models of electrical equipment by integrating virtual reality technology with infrared thermal imaging technology. Through the approach of three-dimensional texture mapping, the infrared images of electrical equipment extracted by means of nonlinear filters, the SLIC superpixel segmentation method, and the MRSM region fusion method with maximum similarity are fused with the texture images of electrical equipment captured in the virtual substation based on feature weight. Subsequently, the fused images are assigned to the three-dimensional models of the equipment by applying virtual reality technology to realize the three-dimensional infrared visualization of electrical equipment. Comparative experiments with common segmentation methods demonstrate that this approach can effectively enhance the segmentation effect and accuracy. The extraction effect of infrared images of equipment shows a remarkable improvement compared with common methods. Taking lightning arresters and circuit breakers as examples, this paper successfully constructs their three-dimensional infrared visualization models, verifying the feasibility of the proposed scheme. This research holds significant importance for the simulation of the power system, facilitating operation and maintenance personnel to observe the infrared thermal imaging temperature measurement data in detail and assisting technicians in their analysis.

**Keywords:** Three-dimensional infrared visualization; Virtual reality; Superpixel segmentation method; Regional integration method; Nonlinear filtering techniques

**摘要:** 本文针对电力系统虚拟变电站中无法体现设备运行状态的问题, 将虚拟现实技术与红外热成像技术相结合提出一种构建电气设备三维红外可视化模型的方案。采用三维纹理贴图的方式, 将用非线性滤波器、SLIC 超像素分割法和 MRSM 最大相似度的区域融合法所提取的电气设备红外图像与虚拟变电站中拍摄的电气设备纹理图像通过特征权融合后, 运用虚拟现实技术将融合图像赋予到设备三维模型上以实现电气设备的三维红外可视化。通过与常用分割法的对比实验表明, 本方法可有效提高分割效果及分割精度, 设备红外图像提取效果相较于常用方法有明显提升。本文以避雷器和断路器为例成功构建了其三维红外可视化模型, 验证了该方案的可行性。该研究对电力系统的仿真具有重要意义, 有助于运维人员详细观察红外热成像测温数据, 辅助技术人员进行分析。

**关键词:** 三维红外可视化; 虚拟现实技术; 超像素分割法; 区域融合法; 非线性滤波技术

## 0 引言

电气设备的三维红外可视化模型相较于三维虚拟模型<sup>[1]</sup>可以更直观的观测电气设备的内部特征及其运行情况。实现电气设备的三维红外可视化模型的关键在于如何把红外特征信息与真实纹理信息同时体现在电气设备的三维模型上。曾晗<sup>[2]</sup>等运用分割算法对变压器套管红外图像分割后, 采用激光雷达扫描仪获取变压器套管的三维点云数据, 经点云配准和滤波后构建了变压器套管的三维红外模型。沈小军<sup>[3]</sup>等提出了一种融合红外热像图和彩色纹理图像的方法, 通过

**基金项目:** 河南省自然科学基金 (232300421198)

Project Supported by Natural Science Foundation of Henan Province (232300421198)

特征点匹配技术将彩色图像与灰度图像拼接,从而生成融合图像,实现了红外热像测温数据的三维实景可视化。目前电气设备的三维红外可视化相关工作仍处于起步阶段,构建的模型也相对简单,制作更为精细准确的三维红外模型对设备检修等工作有重大意义。本文在现有研究的基础上,将以避雷器与断路器的三维模型为载体,在运用图像处理技术实现设备红外特征图像与真实纹理图像的融合后,通过虚拟现实技术将融合图像赋予到设备的三维模型上以期构建其三维红外可视化模型。设备红外特征图像将基于 SLIC 超像素分割法和 MRSIM 最大相似度的区域融合法<sup>[4]</sup>,在经非线性滤波处理后进行分割、合并和提取,设备纹理图像将以虚拟变电站中拍摄的彩色纹理图像代替可见光图像,最后通过特征权重融合法实现红外特征图像与真实纹理图像的融合<sup>[5]</sup>。并通过与常用分割法对提取不同目标设备进行对比实验验证该方法的提取效果。

## 1 红外图像提取

红外设备所拍摄的红外图像中往往包含较多的非电气设备元素,因而在红外图像与三维虚拟模型进行融合前需要对所拍摄的红外图像进行分割,使电气设备与其背景、导线及所连绝缘设备分割开来,在此基础上再对目标图像进行分析。

本文所设计的目标设备红外图像提取方案如图 1 所示。

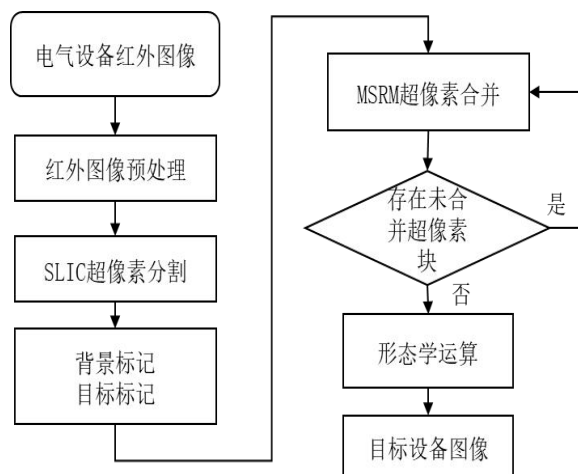


图 1 设备红外图像提取流程图

Fig.1 Flow diagram of infrared image extraction from the device

### 1.1 红外图像预处理

非线性扩散技术是一种用于图像处理和计算机视觉中的图像增强和分割的常用方法。它的

目标是改善图像的质量,突出图像中的特定特征或结构。非线性扩散方法通常涉及将图像的像素进行变换,以减少噪声、增强边缘、分割物体或实现其他图像增强任务。在此利用非线性扩散技术对原始红外图像进行预处理。

设含噪声红外图像的模型如下所示:

$$u_0 = u + n \# (1)$$

式中  $u$  为理想红外图像,  $u_0$  为对图像  $u$  的观测,  $n$  为噪声。则图像的边界条件和初始条件可以表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial \theta(\hat{n})} = 0, (x, y, t) \in \partial \Omega \times [0, T] \# (2)$$

$$u(x, y, t)|_{t=0} = u_0(x, y), (x, y) \in \Omega \# (3)$$

式中  $\Omega$  为图像区域,  $\partial \Omega$  为图像边界,  $\partial \theta(\hat{n})$  为边界单位外矢量  $\hat{n}$  的方向角度,  $T$  为停止迭代时间<sup>[6]</sup>。

非线性扩散方程的表达式可表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \beta \operatorname{div}[\alpha \nabla u] \# (4)$$

式中  $\alpha = \alpha(x, y, t)$ ;  $\beta = \beta(x, y, t)$  为系数。

选取 Sochen 非线性扩散方程进行求解:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{1 + |\nabla u|^2}} \operatorname{div} \left[ \frac{\nabla u}{\sqrt{1 + |\nabla u|^2}} \right] \# (5)$$

系数表达式模型为:

$$\alpha \beta = \frac{1}{1 + \left[ \frac{|\nabla u|}{k} \right]^2} \# (6)$$

式中  $k$  为正整数, 在图像区域内部有  $\nabla u \rightarrow \infty$ ,  $\alpha \beta \rightarrow 1$ ; 在边缘附近  $\nabla u \rightarrow \infty$ ,  $t_i < T$ 。

### 1.2 超像素分割

在对设备红外图像进行预处理之后使用简单线性迭代聚类算法 (Simple Linear Iterative Clustering, SLIC) 对该图像进行分割<sup>[7]</sup>。由于电力系统中的环境复杂, 各种电气设备的外形存在较大差异, 在此选择使用六角网络对原始红外图像进行分割, 其标准间距如下:

$$S = \sqrt{\frac{R \times C}{k \times \frac{\sqrt{3}}{2}}} \# (7)$$

式中  $R$  是红外图像中的行数;  $C$  是红外图像的列数;  $k$  为超像素的个数。

定义初始化聚类中心, 以五维数据表示:

$$C_k = [l_k, a_k, b_k, x_k, y_k]^T \# (8)$$

式中  $l_k$  表示色彩空间的亮度,  $a_k, b_k$  表示色彩的对立维度;  $x_k, y_k$  表示聚类中心的行和列。

为聚类中心周围的每个像素点 $i$ 分配标签 $lab$ , 保存像素点属于哪个聚类中心的信息, 以 $dis$ 保存点到其所属像素中心的距离。然后对每个聚类中心循环在 $2S \times 2S$ 范围的所有像素点 $i$ 循环, 如果该像素点到聚类中心 $x$ 的距离小于原来的到超像素中心的距离, 则说明该像素点属于聚类中心 $x$ , 然后更新 $lab$ 标签, 更新 $dis$ 。引入测量距离 $D$ 表示像素距离测量中心的距离,  $D$ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} d_c = \sqrt{(l_i - l_k)^2 + (a_i - a_k)^2 + (b_i - b_k)^2} \\ d_s = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \\ D = \sqrt{\left(\frac{d_c}{m}\right)^2 + \left(\frac{d_s}{S}\right)^2} \end{cases} \quad \#(9)$$

$i, k = 1, 2, \dots, n$

式中 $d_c$ 表示像素点与聚类中心颜色上距离;  $d_s$ 表示空间上距离;  $l_i, a_i, b_i, x_i, y_i$ 表示像素点的空间信息。

### 1.3 超像素合并

对红外图像进行超像素分割之后, 需要将包含目标设备红外信息的超像素块合并, 基于最大相似度的区域融合算法 (MSRM) 在超像素分割的基础上根据相似度度量, 对最相似的区域进行合并。

在使用 MSRM 算法时, 应先对超像素分割后的红外图像进行标记, 图像共分为两部分, 目标及背景, 根据红外测温拍摄要求, 目标设备应在红外图像的中心, 因此在标记时把图像中心且亮度较高的超像素块标记为目标, 把亮度较暗和亮度高但处于图像边缘的超像素块标记为背景。

算法的合并流程分为两步:

#### (1) 背景及其邻域合并

对标记的背景超像素块 $p \in N$ 构建其邻域集合 $\overline{S_B} = \{A_i^0\}_{i=1,2,\dots,r}$ , 对每个 $A_i$  ( $A_i \notin M_B$ ) 构建相邻区域集合 $\overline{S_{A_i}} = \{S_j^{A_i}\}_{j=1,2,\dots,k}$ , 并计算 $A_i$ 与 $\overline{S_{A_i}}$ 中每个元素的相似性 $\rho(A_i, \overline{S_{A_i}})$ , 若 $B$ 与 $A_i$ 满足最大相似度合并规则式 (10), 将 $A_i$ 与 $B$ 合并, 新的区域被附加 $B$ 的标记, 否则不合并。

$$\rho(R, Q) = \max_{i=1,2,\dots,q} \rho(Q, S_i^q) \quad \#(10)$$

#### (2) 未标记的超像素块之间的合并

循环执行第一步之后, 区域 $M_B$ 的范围逐渐扩大, 直至 $M_B$ 的邻域内找不到新的合并对象, 停

止迭代。此时仍有非标记性的区域由于颜色相似度大于标记区域之间的得分, 因而未合并, 需要对非标记性区域执行合并。步骤如下:

对未合并的每个非标记区域 $p \in N$ 构建其相邻域集合 $\overline{S_p} = \{H_i\}_{i=1,2,\dots,p}$ , 再对每个 $H_i$  ( $H_i \notin M_B \cap H_i \notin M_o$ ) 构建相邻区域集合 $\overline{S_{H_i}} = \{S_j^{H_i}\}_{j=1,2,\dots,k}$ , 对 $\overline{S_p}$ 内的每个元素计算其与 $p$ 的相似度, 若满足式 3.10, 合并 $p$ 与 $H_i$ 。直至 $p$ 的邻域内找不到新的合并对象, 停止迭代。循环执行步骤一和二, 直到没有超像素块被合并。

在对设备红外图像进行预处理、分割及融合后进行形态学运算即可提取出所需的电气设备红外图像。

### 1.4 目标提取对比实验

为验证算法的实际应用效果, 本节对常用的分割方法对比, 选取不同背景下的不同目标设备进行实验。使用阈值分割算法、区域生长算法、熵率算法+MSRM 算法与本文提出的算法对比, 表 1 是其中一些代表性图案。

表 1 图像分割算法对比

Tab.1 Comparison of image segmentation algorithms

| 原始图像 | 本文算法 | Otsu阈值 | Regional Growth | Entropy Rate+MSRM |
|------|------|--------|-----------------|-------------------|
|      |      |        |                 |                   |
|      |      |        |                 |                   |
|      |      |        |                 |                   |
|      |      |        |                 |                   |
|      |      |        |                 |                   |

表中红外图像分别是变压器、避雷器、电压互感器、电流互感器和断路器, 通过对复杂电力环境下红外图像中目标电力设备的提取来验证算法。可以看出 Otsu 阈值法能够有效的去除红外图像中的环境背景, 但是由于该方法是根据阈值来分割图像中的像素的, 在同一红外图像中含有多个相同设备, 无法有效的甄别提取的目标。区域生长算法使用全局阈值分割, 在处理复杂图片时相较于 Otsu 阈值法在分割的精度上有提高, 但是由图表可知, 该算法在分割目标设备的边界定位并不精确, 出现了大量欠分割的情况。对比熵率算法和本文提出的算法的分割结果, 可以看出经过非线性滤波器处理后, 本文提出的算法在



对图像进行处理后保留图像边界信息的同时,图像内的多余纹理被去除,分割精度有明显提高。

为使得分割结果更加客观,使用 Jaccard 和 Dice 这两个指标对图像分割后的效果进行评估。

Jaccard 和 Dice 系数的均值和标准差如表 2 所示。由该表可以看出,本文提出的分割算法分割精度最高,算法鲁棒性也较好。原因是使用非线性滤波器滤波处理后,图形的信噪比有了明显提高,再通过 SLIC 超像素分割和背景标记处理之后极大提高了超像素块融合的精准度。

表 2 不同算法分割结果数据统计对比

Tab.2 Statistical comparison of segmentation results of different algorithms

| 算法   | Jaccard (%) |      | Dice (%) |      |
|------|-------------|------|----------|------|
|      | 均值          | 标准差  | 均值       | 标准差  |
| 本文算法 | 78.98       | 5.22 | 88.11    | 3.87 |
| Otus | 62.61       | 6.52 | 76.81    | 4.92 |
| 生长算法 | 68.40       | 8.30 | 81.11    | 6.58 |
| 熵率算法 | 70.35       | 8.77 | 82.54    | 5.84 |

通过与目前的目标提取算法对比,分析得出本算法有效加强了分割精度,提高了目标设备提取的准确度。

## 2 纹理图像处理

由于在融合红外图像与纹理图像时需保证拍摄角度、拍摄方位及图像像素等要求完全一致,本文将以三维虚拟变电站取代真实变电站,以在虚拟变电站中拍摄的彩色纹理细节图像替代真实的可见光图像。运用虚拟现实技术构建的虚拟变电站是由真实变电站一比一建设的,其内部电气设备的彩色纹理图像与可见光图像一样,均可以表现电气设备的纹理、色彩和轮廓等信息。同时相较于可见光图像,运用虚拟现实技术所截取的设备真实纹理图像可免受天气、光照角度等因素影响,由红外图像提供的方位,人为的在计算机中截取所需图像,可以不考虑目标设备与采集设备之间的位置关系,可以较好满足两张图像坐标一致性的原则,且所截取的纹理图像背景较为干净并不包含其它非电气元素可以简化算法步骤。

## 3 三维红外可视化实现

### 3.1 图像融合方案

本文使用特征权重融合法来进行红外图像和纹理图像的融合,对融合后的图像运用三维模型纹理拼接技术对虚拟变电站中的电气设备进行贴图以构建其红外特征三维模型。首先使用高

斯滤波器和引导滤波器提取红外特征图像和真实纹理图像以及边缘信息,然后进行图像混合信息分解并确定特征,再确定权重值,最后完成红外图像与真实纹理图的融合<sup>[3]</sup>。红外特征图像和真实纹理图像及边缘信息的提取使用高斯滤波和引导滤波混合进行信息分解<sup>[3]</sup>。

结合第 1 节和第 2 节所提出的图像处理方法,本文所提出的电气设备三维红外可视化步骤如图 2 所示。

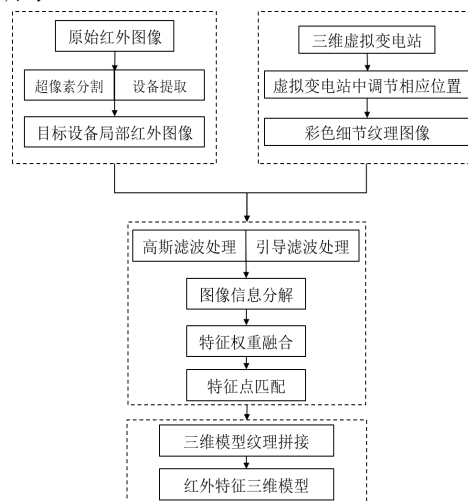


图 2 三维红外模型实现流程图

Fig.2 Flow chart of the implementation of the 3D infrared model

### 3.2 三维红外模型

根据上图三维红外可视化流程首先对避雷器均压环及断路器的原始红外图像进行非线性滤波处理并进行超像素分割,并对分割后的红外图像进行 MRSM 合并并进行形态学运算,所得的目标设备红外图像如图 3 所示。

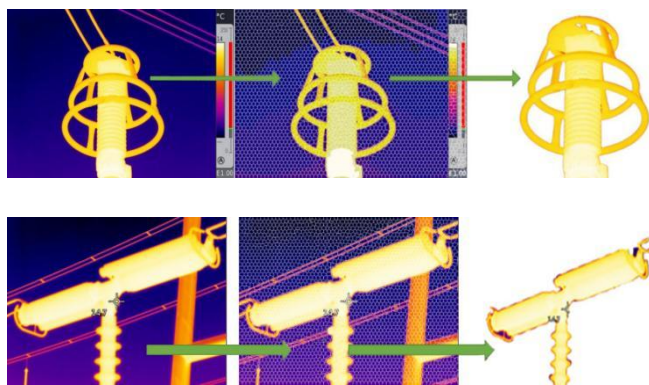


图 3 避雷器均压环与断路器红外提取图像

Fig.3 Arrester equalizing ring and circuit breaker infrared extraction image

由上图可以看出经过滤波处理后分割的目标电气设备图像轮廓较为贴合,与非目标图像边界较为清晰具有更高的贴合度,可本文所用算法可较好得提取目标设备的红外图像。获取设备红

外图像后,在已建好的虚拟变电站中在同一方位运用虚拟现实技术拍摄该设备的真实纹理图像,截取的设备真实纹理图像如图4所示。

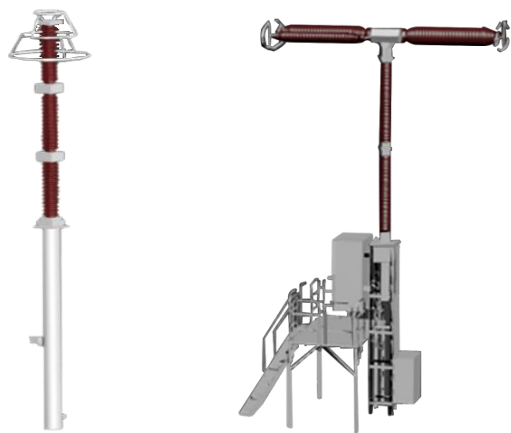


图4 避雷器与断路器真实纹理图像  
Fig.4 Real texture image of lightning arrester and circuit breaker

对设备真实纹理图像进行处理,去除黑色背景并调整拍摄视角得到所需要的同方位同角度背景无杂质的纹理图像,在此需注意所得纹理图像需与设备红外图像同像素。按上文提出的三维红外模型实现方案对设备纹理图像和红外图像使用 SIFT 算法进行融合。避雷器纹理图像与融合红外图像如图5所示。

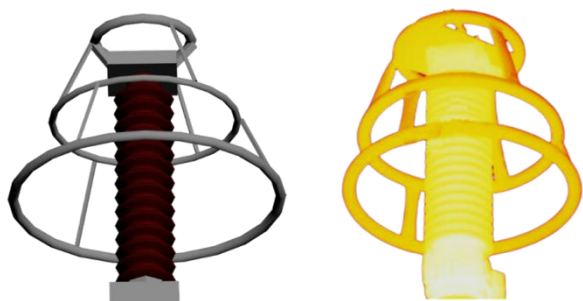


图5 避雷器均压环纹理图像与融合红外纹理图像  
Fig.5 The texture images of the grading ring of the lightning arrester and the fused infrared texture images

如图5所示,红外特征图像可以通过 SIFT 算法很好的匹配到真实纹理图像之中,得到特征融合图像之后,运用虚拟现实技术把融合图像的像素与未附加材质的避雷器及断路器三维模型坐标相匹配将融合材质图像赋予到设备三维模型上,即可得到兼具红外与真实纹理的避雷器和断路器的三维模型,纹理拼接过后的避雷器和断路器三维模型如图6所示。

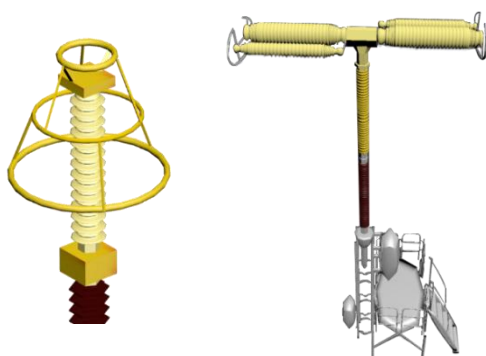


图6 三维红外可视化模型  
Fig.6 3D Infrared visualization model

从图7可以看出,三维模型的可视化效果良好,以三维模型为载体从立体视觉层面展示电气设备的红外特征,更便于实现对电气设备的监测,可以依据不同数据类型对电气设备实现多元化检测。

#### 4 总结

本文基于虚拟现实技术,以虚拟变电站中相关电气设备的三维模型为载体,结合 SLIC 超像素分割法提出了一种新型三维红外可视化方案。运用虚拟现实技术规避了设备纹理图像与红外图像需确保拍摄方位及角度一致等问题,同时用非线性滤波技术对设备红外图像进行预处理后使用超像素分割法与 MRSIM 算法可以更精准地提取设备红外特征图像,通过对比常用提取方法与实现避雷器和断路器的三维红外可视化模型验证了该方案的优越性与可行性。

#### 5 参考文献

- [1] 徐金财,李朝奎,陈建辉.一种基于 3ds Max 与 Smart 3D 的三维模型构建方法[J].测绘通报,2020,(11): 61-65.
- [2] 曾晗,林文莹,郭思雨,等.基于 SLIC 超像素分割和 ICP 配准的牵引变压器套管红外三维立体重构方法[J].铁道学报,2022,44(12): 37-45.
- [3] 沈小军,于忻乐,王远东,等.变电站电力设备红外热像测温数据三维可视化方案[J].高电压技术,2021,47(02): 387-395.
- [4] 徐少平,刘小平,李春泉,等.基于区域最大相似度的快速图像分割算法[J].光电子·激光,2013,24(05): 990-998.
- [5] 李扬,杨海涛,孔卓,等.像素级红外与可见光图像融合方法综述[J].计算机工程与应用,2022,58(14): 40-50.
- [6] 张亚亚,刘小伟,刘福太,等.基于改进 SLIC 方法的彩色图像分割[J].计算机工程,2015,41(04):205-209.
- [7] 王明,崔冬,李刚,等.融合判别区域特征与标签传播的显著性目标检测[J].燕山大学学报,2019,43(05): 455-461.



---

作者简介:

郜子阳, 男, 硕士研究生, 研究方

向为电力系统仿真与检测, E-mail:

gao\_ziyang0219@163.com;

廖晓辉, 女, 副教授, 硕士生导师,

研究方向为电能质量扰动检测与

识别, E-mail:

liaoxiaohui0001@zzu.edu.cn;

蔡志龙, 男, 硕士研究生, 研究方

向为虚拟变电站仿真系统, E-mail:

1393797704@qq.com

文章编号:

中图分类号:

文献标志码:

学科代码:

# 基于双模传感器的电力设备表面温度 三维模型构建方法

王俊超, 吴翔\*, 张世杰, 黄启铭, 马元豪

(1.河南工业大学 电气工程学院 郑州 450001)

## Construction method of 3D surface temperature model of power equipment based on dual mode sensor

Wang Junchao, WU Xiang, Zhang Shijie, Huang Qiming, Ma Yuanhao

(1. School of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy and efficiency of power equipment fault diagnosis, it helps realize remote operation and intelligent management of equipment, so that fault diagnosis can cope with complex and changeable environment, so as to promote the intelligent upgrade of power equipment. In this paper, an infrared modeling method is proposed. First, the data acquisition and processing of power equipment in the real scene are carried out, and the three-dimensional point cloud data obtained by three-dimensional scanning technology and the physical data based on the overall structure obtained by infrared thermal imager are organically integrated to obtain the three-dimensional coordinate data with temperature information. Then, format conversion, point cloud and downsampling are performed on the standard model of power equipment. Finally, the depth and infrared data of the power equipment in the environment are merged with the standard model to complete the infrared modeling of the power equipment, and the standardized model of the power equipment including temperature information is obtained.

**Key words:** Point cloud registration, 3D reconstruction, data fusion, power equipment

**摘要:** 为了提高电力设备故障诊断准确率和效率,助力实现设备的远程运维和智能化管理,让故障诊断可以应对复杂多变的环境,从而促进电力设备的智能化升级。本文提出了一种红外建模方法,首先,对现实场景中电力设备进行数据采集与处理,把三维扫描技术得到的三维点云数据和红外热成像仪得到的基于整体结构的物理数据有机融合起来,得到附带有温度信息的三维坐标数据。然后,对电力设备的标准模型进行格式转换、点云化和下采样等操作。最后,将环境中电力设备的深度和红外数据与标准模型进行配准融合,完成电力设备的红外建模,得到包含温度信息的电力设备标准化模型。

**关键词:** 点云配准, 三维重建, 数据融合, 电力设备

## 0 引言

电力能源无疑是支撑当今社会正常运作的核心动力,其稳定供应的重要性不言而喻。而作为电力系统的关键枢纽,变电站和升压站等节点在电能传输和转换过程中扮演着至关重要的角色<sup>[3]</sup>。在变电站设备故障诊断上,目前红外图像无法体现设备景物深度信息,难以定位设备具体故障位置,而三维模型仅能展示空间维度,不能反映设备温度信息,易造成设备内部放电故障难以检测<sup>[6]</sup>。建立电力设备表面温度三维模型既能直观地展示设备真实状态,又能用于状态仿真分析,可以更好的对设备状态进行预测与评估<sup>[15]</sup>。方舟等根据电力设备表面温度数据模拟内部温度切片图像,再将切片数据作为断层重建的原始数据,对电力设备进行了三维重建,但没有实现自动化<sup>[16]</sup>;彭昊等研究了变电站三维点云模型与三维设计贴图模型的融合方法,实现了变电站整体模型的立体展示,但未能细分到设备层面的状态展示<sup>[17]</sup>;许宝杯等使用深度相机和热成像仪对二者进行了数据融合,实现了多视角信息匹配,但没有将数据更好的进行可视化<sup>[18]</sup>;姜蹇等人实现了全自动化的电力设备多源异构数据空间合成与立体展示,但是过程较为复杂<sup>[19]</sup>。上述研究工作没有系统的实现采集设备数据处理完全自动化,依旧需要人工参与对电力设备进行建模等数据处理操作。因此,如何自动化的将温度信息与三维模型准确的结合起来并与标准模型进行融合,对解决电力设备中的工程问题有重要意义。

## 1 双模传感器系统构建

双模传感器系统构建工作主要包括采集设备硬件本体、计算机控制软件和系统标定三部分。整

体框架如图 1 所示。

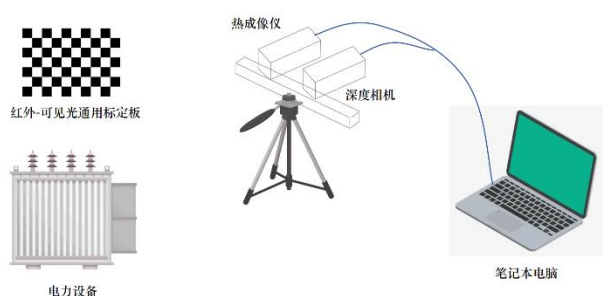


图 1 电力设备采集系统示意图

### 1.1 基于双模传感器的采集设备

采集设备使用相机快装板和阻尼云台将深度相机和热成像仪平行固定在一起，其结构如图 1-1 所示。右边是 Genmini2 XL 深度相机，负责获取可见光图像和点云，左边是 X640D 热成像仪，负责获取热值图像。二者通过集线器与笔记本电脑连接，电脑控制两个设备在同一时间对电力设备进行信息采集。如图 2 所示。



图 2 基于双模传感器的采集设备

Genmini2 XL 是奥比中光推出的高标准通用性户外及远距 3D 相机。具备大视野高精度等特点，即使面对高低反物体、室内外敏感光照等苛刻条件，也能输出完整准确的深度信息。相机的工作距离拉长之 20m 以上，最关键的是支持户外拍摄，配合全量程内的 RGB 画质级高精度深度图像，支持相机内参和关键参数导出。X640D 红外热像仪是格物优信推出的精确型非接触温度探测器，采用丰富的热成像细节信息强化使用性能，具备高敏感性，能够辨别小至 50mK 的温差，支持相机内参和关键参数导出。Genmini2 XL 和 X640D 技术参数指标如下表 1 所示。

表 1 采集设备传感器关键参数

| 传感器参数     | Genmini2 XL     | X640D        |
|-----------|-----------------|--------------|
| 分辨率       | 1280*800        | 640*480      |
| 帧率 (fps)  | 10              | 30           |
| 视场角 (HxV) | 64*68           | 67*50        |
| 外部触发      | 有               | 有            |
| 测量范围      | 0.4~20m+        | -20~150° C   |
| 测量精度      | ±3mm            | ±2° C        |
| 数据输出形式    | USB 通信          | 以太网通信        |
| 尺寸        | 124 x 29 x 26mm | 67x58x61.1mm |

### 1.2 计算机控制系统

采集设备在对电力设备进行数据采集的时候，热成像仪和深度相机需要同时触发采集，需要设计一套控制软件方便控制调试设备。本设备的控制软件基于 C++ 和 QT 开发，可以实时显示热值图像、可见光图像和点云，两种采集模式，日志窗口实时显示采集状态。控制系统的交互界面如图 3 所示。

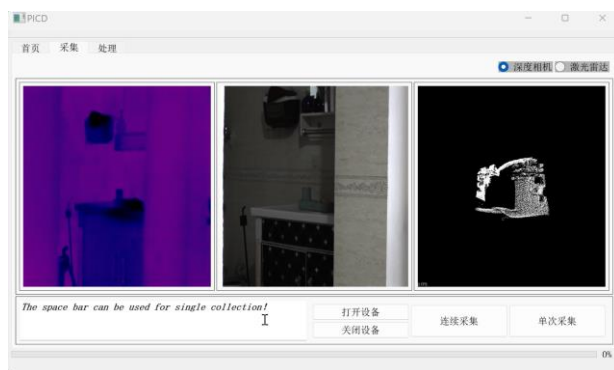


图 3 基于双模传感器的采集设备控制软件

### 1.3 系统标定

在受限的空间当中，把深度和温度检测设备集成在一套系统是一种实现三维温度成像的可行思路。但深度设备与红外热成像仪在成像原理、分辨率、焦距等方面存在较大差异。深度相机与热成像仪组合的系统标定难点在于统一二者的世界坐标系与图片融合。在标定的时候使用同一块标定板同时对二者进行标定就可以了。可见光相机对颜色敏感，红外热成像仪对温度变化敏感，所以购置一块儿铝基标定板进行标定就可以，它是根据白色铝板氧化后发射率 0.1-0.25，标定板上黑色区域（哑光黑漆）发射率为 0.87-0.97，显然白色区域发射率小于黑色区域发射率。而当二者的事实温度相同时，二者在红外热像仪拍摄的热图像上也会显现出较大差异的温度值，这就为热像仪几何标定提供了特征。结合这些特点，我们设计了一套本文采集系统的标定方法，系统标定方法如图 4 所示。

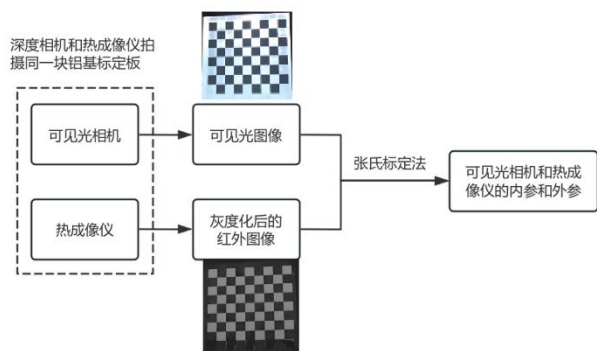


图4 深度相机和热成像仪联合标定过程

让深度相机和热成像仪同时拍摄一块儿铝基标定板，热成像的图像做一次灰度化处理，深度相机只使用可见光图像，使用张氏标定法进行标定，可以得到深度相机中可见光相机部分的内参矩阵

$$\text{为} \begin{bmatrix} 1818.2 & 0 & 390.9 \\ 0 & 1821.3 & 484.3 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{热成像仪的内参矩阵}$$

$$\text{为} \begin{bmatrix} 1791.1 & 0 & 391.7 \\ 0 & 1788.1 & 464.7 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{二者的外参矩阵为}$$

$$\begin{bmatrix} 0.9997 & 0.0050 & -0.0251 & -58.4764 \\ -0.0052 & 0.9999 & -0.0093 & 2.0101 \\ 0.0250 & 0.0094 & 0.9996 & -13.4627 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

本文选用的热成像仪和深度相机的畸变都很小，对目标的测量可以忽略不计。根据深度相机与温度相机之间的外参我们就可以统一二者的世界坐标系。

## 2 数据处理与融合

### 2.1 可见光图像与红外图像配准

在1.3中经过标定，已经可以使用得到的二者之间的外参将深度相机中的可见光相机和热成像仪统一在一个世界坐标系下，然后结合相机模型使用各自内参将二者的图像统一在一个像素坐标系下就可以实现可见光图像和红外图像的配准。配准过程如图5所示。

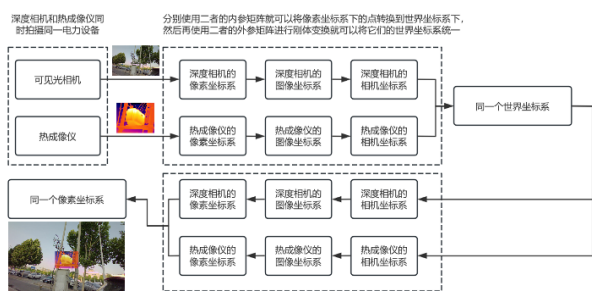


图5 可见光图像和红外图像的配准过程

深度相机和热成像仪采用普通镜头，可以简化

为针孔成像与径向畸变和切向畸变相结合的模型。在相机成像模型中涉及到像素坐标系 $O-uv$ 、图像坐标系 $O_i-xy$ 、相机坐标系 $O_c-x_cy_cz_c$ 和世界坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$ 之间的转换。像素坐标系 $O-uv$ 中的点和图像坐标系 $O_i-xy$ 的点转换关系如下：

$$\begin{cases} u = \frac{x}{dx} + u_0 \\ v = \frac{y}{dy} + v_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $dx$ 、 $dy$ 分别表示为单位像素在图像坐标系的 $x$ 、 $y$ 轴方向上的物理尺寸， $u_0$ 、 $v_0$ 是相机镜头光轴在像素坐标系中投影位置坐标，一般为图像像素尺寸的1/2。将式(1)写成齐次坐标的形式可以表示为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

相机坐标系转换到图像坐标系中的点其实是一种透视投影变换，也就是三维转换到了二维。相机坐标系 $O_c-x_cy_cz_c$ 中的点和图像坐标系 $O_i-xy$ 中的点转换关系如下：

$$\begin{cases} x = f \frac{x_c}{z_c} \\ y = f \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $f$ 为相机的焦距，即镜头中心到成像平面的距离，这个距离决定了相机能够捕捉到的画面范围和细节程度。将式(3)写成齐次坐标的形式可以表示为：

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

世界坐标系中的点是通过刚体变换转换到相机坐标系下的。世界坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$ 和相机坐标系 $O_c-x_cy_cz_c$ 的转换关系如下：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (5)$$

其中 $R$ 表示旋转矩阵，含有旋转角度信息， $T$ 为平移向量。将式(5)写成齐次坐标的形式可以表示为：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

上边我们得到了各坐标系之间两两转换的关



系,就可以推导出像素坐标系 $O-uv$ 和世界坐标系 $O_w-x_wy_wz_w$ 之间的关系如下:

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $f_x = \frac{f}{dx}$ ,  $f_y = \frac{f}{dy}$ 。等式右边第一个矩阵跟相机内部参数有关,被称作相机内参矩阵,等式右边第二个矩阵跟相机外部参数有关系,被称作相机外参矩阵。根据这个公式我们就可以找到世界中的三维坐标点与相机拍摄的图片里的二维像素点之间的对应关系。

## 2.2 深度相机点云和可见光数据融合

Genmini2 XL 深度相机是一款双目结构光相机,采用结构光增强双目技术,使用双目成像模块采集场景图像,并通过红外激光发射模块在场景中投射散斑结构光,增强纹理信息,采集到的双目图像经过 3D 相机内置预处理和深度引擎计算模块,转换为视差或深度图。我们可以调用相机 SDK 获取到可见光相机的内参,可见光相机和雷达的外参,这里是把深度相机抽象成可见光相机和雷达。通过这些参数,我们可以将每个点云与像素点对应起来,这样就可以给深度相机获取的点云着色,深度相机点云与可见光数据融合算法如图 6 所示:

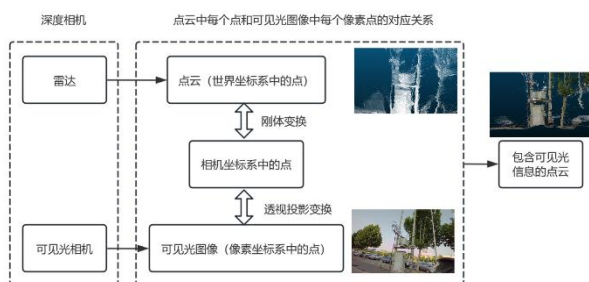


图 6 深度相机点云与可见光数据融合算法

把深度相机抽象成可以获得点云的雷达和可以获得可见光图像的可见光相机。根据 2.1 中的推导的像素坐标系与世界坐标系之间的转换关系,通过深度相机提供的外参,点云中的点通过刚体变换可以变换到可见光相机的相机坐标系下,然后再根据内参通过透视投影变换就可以变到像素坐标系下,反过来,像素坐标系下的像素点也可以变换到世界坐标系下,这样就可以得到点云和像素的一一对应关系,从而将深度相机的点云和可见光数据进行融合,得到包含可见光信息的点云。

## 2.3 深度和红外相机数据融合

深度相机和红外相机的内参矩阵和外参矩阵

都是可以通过经典的相机标定准确得到。但是通过对设备的深入了解,我们购买的这两款设备在出的时候厂家已经做过精确的标定,并且把标定好的参数集成到了 SDK 中,通过调用相关函数就可得到。结合在 1.3 中得到两个相机之间的外参矩阵,在 2.1 中已经进行了数据对齐。接下来我们只需要将红外图像信息和点云进行融合。深度和红外相机数据融合流程如图 7 所示。

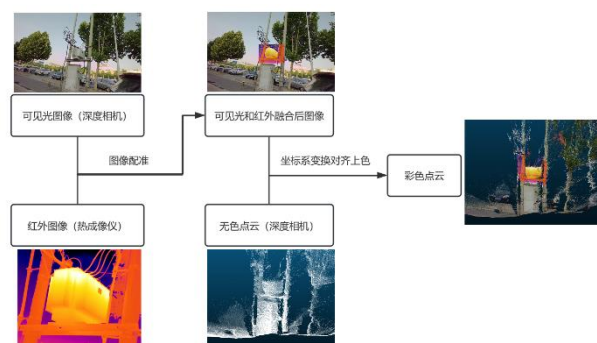


图 7 深度和红外相机数据融合算法

首先将深度相机得到的可见光图像与热成像仪得到的红外图像使用 2.1 中的方法进行图像配准,然后根据 2.2 中的深度相机可见光和点云融合算法将融合后的图像和深度相机得到的点云一一对应,最后根据对应关系给点云着色,得到包含可见光和温度信息的点云。

## 3 基于标准模型的电力设备红外建模

### 3.1 标准模型点云配准

要实现标准模型与点云的配准,首先要将电力设备的标准模型转化为模版点云 $Q$ ,然后与采集设备采集到的某个视角的目标点云 $P$ 进行匹配。点云之间的变换关系满足:  $Q = HP$ 。其中 $H$ 为对应点对之间的变换矩阵,  $H = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , 其中 $R$ ,  $T$ 分别为旋转矩阵和平移矩阵。目前,点云配准技术主要包括传统和基于学习的配准方法。点云配准分两步进行,粗配准和精配准。精配准算法可靠且精度高,但是对于一个初始位置距离相差很大的两片点云来说,直接使用精准配准算法极易陷入局部最优解,导致匹配失败。

本文采用的是 3D-NDT 算法来进行点云匹配<sup>[1]</sup>,它通过划分网格把网格中的点用三维正态分布函数表示,而这些概率分布函数可以简单清晰地描绘出这些点云在空间中的分布情况,包括每个局部点云的朝向和平整度,实质上是把求解两组点云间的刚体变换矩阵转化为求解概率分布函数的最大值。

3D-NDT 算法流程如表 2 所示:

表 2 3D-NDT 算法流程

| 3D-NDT 算法流程                         |
|-------------------------------------|
| 输入: 模版点云和目标点云                       |
| 输出: 旋转和平移矩阵                         |
| 步骤 1: 将模版点云划分为指定大小的网格或体素            |
| 步骤 2: 计算每个体素的均值和协方差矩阵               |
| 步骤 3: 将目标点云中的点映射到模版点云的对应体素, 并计算概率分布 |
| 步骤 4: 计算配准得分 score                  |
| 步骤 5: 对目标函数进行优化, 找到最大 score         |
| 步骤 6: 更新概率分布, 跳转到步骤 2, 直到找到最佳 score |

### 3.2 电力设备红外建模

本文提到数据有可见光数据、温度数据、深度数据和标准模型数据。在第二节中可见光数据、温度数据和点云数据已经融合完成, 融合的结果本质上是带有颜色的点云。标准模型和采集的红外点云融合算法如图 8 所示。

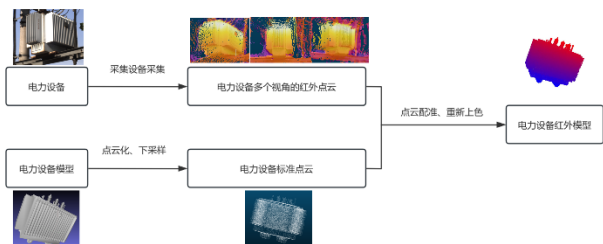


图 8 标准模型和采集的红外点云融合算法

首先, 使用采集设备对户外的一款变压器进行数据采集, 得到多个视角下的红外点云。从模型库中找到该变压器的标准模型, 将模型转成点云, 对点云进行下采样得到电力设备标准模型点云。然后使用 3D-NDT 算法将采集的多视角点云逐个与电力设备标准模型点云进行匹配, 裁切掉标准点云以外的其他点云, 这样标准模型点云的外表面就会逐渐充满温度信息, 最后根据配准好的温度信息重新对标准模型的点云进行上色。

## 4 结语

本文提出的基于双模传感器的电力设备表面温度三维模型构建方法对于电力设备数据融合和快速可视化工作具有通用性和高效性, 给电力设备故障诊断中多维信息融合与可视化提供了一个新的思路。

## 参考文献

- [1] 郭超, 尚俊云, 罗华, 等. 复杂零件点云配准方法综述[C]//第 23 届中国系统仿真技术及其应用学术年会会议论文集. 西安航天精密机电研究所, 2022: 6.
- [2] 杨诗曼, 孙艳丽, 韩孟孟, 等. 红外与可见光图像配准技术研究进

展[J]. 探测与控制学报, 1-11.

- [3] 赵明星, 李国明, 刘思远, 等. 基于 5G 技术的输变电设备智能巡检应用[C]. 吉林省电机工程学会 2023 年学术年会获奖论文集, 2023: 7.
- [4] 李富权, 李涛, 马创堂, 等. 基于单目结构光的手型、脚型三维轮廓测量系统设计[J]. 装备制造技术, 2023, (07): 32-35.
- [5] Jiang, Qian, et al. A contour angle orientation for power equipment infrared and visible image registration. IEEE Transactions on Power Delivery 36.4 (2020): 2559-2569.
- [6] 林文萱. 基于超像素分割和点云配准的电力设备红外三维建模与应用[D]. 华东交通大学, 2022.
- [7] 宋丽梅, 张继鹏, 李云鹏, 等. 基于多视角红外传感器的三维重建方法[J]. 液晶与显示, 2023, 38(6): 759.
- [8] 刘昊宇, 郭建伟, 姜海勇, 等. 基于边界感知与特征匹配的无重叠三维点云拼接方法[J]. 计算机科学技术学报, 2023, 38(3): 492-509.
- [9] 张旭春, 周洪军, 郑津津, 等. 基于多尺度特征及点距离约束的点云配准[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 333-341.
- [10] 苏海锋, 赵岩, 武泽君, 等. 基于改 RetinaNet 的电力设备红外目标精细化检测模型[J]. 红外技术, 2021, 43(11): 1104-1111.
- [11] 沈小军, 于忻乐, 王远东, 等. 变电站电力设备红外热像测温数据三维可视化方案[J]. 高电压技术, 2021, 47(02): 387-395.
- [12] 刘亚东, 严英杰, 严波, 等. 电力装备内部状态反演重构研究框架与应用展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(08): 2883-2896.
- [13] 姜嵩, 刘亚东, 严英杰, 等. 电力设备多源异构数据空间合成与立体展示方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(01): 66-74.
- [14] 曾晗, 林文萱, 郭思雨, 等. 基于 SLIC 超像素分割和 ICP 配准的牵引变压器套管红外三维立体重构方法[J]. 铁道学报, 2022, 44(12): 37-45.
- [15] 刘亚东, 陈思, 丛子涵, 等. 电力装备行业数字孪生关键技术与应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(05).
- [16] 方舟. 基于红外图像的电力设备三维重建和故障检测[D]. 华北电力大学, 2013.
- [17] 彭昊, 徐敬海, 倪绍强. 地面三维激光扫描技术在变电站精细测量中的应用[J]. 测绘通报, 2017, (12).
- [18] 许宝杯. 基于深度相机的三维热成像重建技术研究[D]. 浙江大学, 2019.
- [19] 姜嵩, 刘亚东, 严英杰, 等. 电力设备多源异构数据空间合成与立体展示方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(01): 66-74.

收稿日期:

作者简介:

王俊超(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为计算机视觉, E-mail: 2023930997@stu.haut.edu.cn;



王俊超

吴翔(1983), 男, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为三维重建与数字孪生、机器人智能控制等, E-mail: xiangw@haut.edu.cn;



吴翔



文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于灰狼算法的电网静态等值方法

魏开建, 林圣\*, 刘健

(西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 611756)

## Static Equivalent Parameter Estimation Method of Power Grid Based on Grey Wolf Optimization Algorithm

WEI Kaijian, LIN Sheng\*, LIU Jian

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** Aiming at the problems of complex calculation process and limited application scope of traditional static equivalent method of power grid, this paper proposes a static equivalent parameter estimation method of power grid based on Grey Wolf Optimizer (GWO). Firstly, for the conventional multi-port interconnection network, the extended voltage source Ward equivalent network considering the ground capacitance is selected to model the external power grid. Then, based on the network sensitivity, the historical measurement data is processed to obtain effective historical measurement data, and the network equivalent parameter solution optimization model is constructed with the goal of minimizing the power difference between the external power grid input to the boundary node before and after the equivalence. Finally, the GWO algorithm is used to realize the iterative optimization of the objective function to obtain a set of optimal network equivalent parameters, so that the state quantity of the equivalent grid model can better match the state quantity of the pre-equivalent grid. The CERPI36v7 system simulation verifies the accuracy and effectiveness of the proposed method.

**KEY WORDS:** Power Grid; Equivalence Method; Genetic Algorithm; Power System Analysis Synthesis Program

**摘要:** 针对传统电网静态等值方法计算过程复杂、计算条件要求苛刻的问题, 提出了一种基于灰狼算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)的电网静态等值方法。首先, 针对常规的多端口互联网络, 选取考虑对地电容的扩展电压源 Ward 等值网络对外部电网等值建模。然后, 基于网络灵敏度对历史量测数据处理进而获取有效的历史量测数据, 并构建以等值前后外部电网输入到边界节点的功率差最小为目标的网络等值参数求解优化模型。最后, 通过 GWO 算法实现对目标函数的迭代优化进而获得一组最优的网络等值参数, 使得等值后电网模型的状态量能较好匹配等值前电网的状态量。CERPI36v7 系统仿真验证了本文方法的准确性与有效性。

**关键词:** 电网; 静态等值; 灰狼算法; 电力系统分析综合程序

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号

### 0 引言

随着电力系统规模的不断扩大, 相邻电网之间的影响越来越紧密, 将复杂电网等值简化进而进行一体化仿真计算显得尤为重要<sup>[1]</sup>。然而, 不同地方电网采集信息时刻与接受相邻电网信息传递时刻不一致, 实时获取相邻电网传递过来的信息存在困难<sup>[2]</sup>。因此, 在缺少外部电网信息的条件下, 研究仅基于内部电网信息的电网静态等值方法具有重要意义。

针对缺少外部电网信息条件下外部电网如何等值的问题, 国内外研究都基于内部电网的量测数据, 通过各种方法估计出外部电网等值参数。文献[3]提出了单端口戴维南等值方法, 将外部电网等值为电压源串联阻抗的形式, 并通过边界节点量测数据求解等值参数, 但该方法难以适应复杂网络。文献[4]提出了多端口网络等值方法, 用常规 Ward 等值模型描述外部电网, 并根据内部电网支路多次开断的量测数据求解外部电网等值参数, 但实际系统难以实现内部电网支路的多次开断操作, 导致方法的实用性有限。为解决电网静态等值方法的工程可实施性的问题, 文献[5]通过节点功率扰动模拟内部电网支路开断, 提出了基于支路开断模拟灵敏度分析的等值方法。文献[6]提出了基于量测数据的外部电网在线等值实用方法, 基于历史数据补充求取外部电网等值参数, 但是该方法还需要获取外部电网的量测数据, 计算量较大且限制了适用范围。

为此, 本文提出了基于 GWO 算法的电网静态等值方法。该方法选取考虑对地电容的扩展电压源 Ward 等值网络对外部电网等值建模, 可有效反映外部电网之间的电气耦合关系, 并保留原始网络特性。这一方法基于内部电网任意多个时刻的量测数据,

以等值前后外部电网输入到边界节点的功率之差作为目标函数,利用 GWO 算法求解得到等值后外部电网模型的等值参数,解决了传统等值参数求解条件要求苛刻、求解过程复杂等问题。为了提升参数估计的可靠性与稳定性,本文提出了基于灵敏度的内部电网历史量测数据处理方法,避免了对内部电网支路进行非计划开断。通过 CERPI36v7 系统验证了本文所提方法的有效性。

## 1 外部电网等值网络及优化模型

### 1.1 考虑对地电容的扩展电压源 Ward 等值网络

有效建立电网等值模型的关键在于选取合理的外部电网等值网络,为使等值网络尽可能全面保留原网络特性,本文采用考虑对地电容的扩展电压源 Ward 等值模型对外部电网进行等值建模<sup>[7]</sup>,等值之后的电网模型如图 1 所示。该等值网络中,以电压源串联等值支路的形式与每一边界节点相连,通过建立边界节点之间的耦合支路来反映外部电网之间的电气耦合关系,同时,通过增加对地电容以提高等值网络的全面性和无功功率的描述能力。

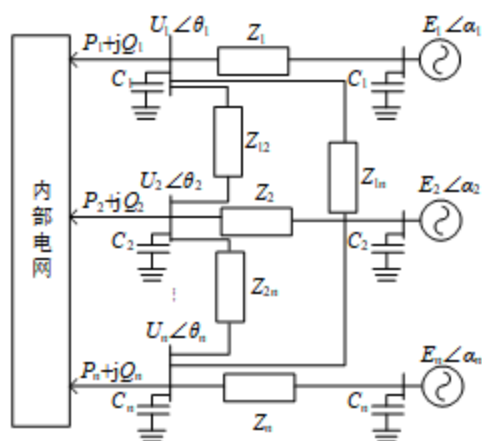


图 1 考虑对地电容的扩展电压源 Ward 等值模型

Fig.1 Extended voltage source Ward equivalent model considering ground capacitance

图 1 中,  $n$  为边界节点的个数,  $U_i \angle \theta_i$  表示边界节点  $i$  的电压相量;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为外部电网等值后通过边界节点  $i$  输入到内部电网的有功功率和无功功率,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $Z_{ij}$  为边界节点  $i$  到边界节点  $j$  之间耦合支路的阻抗参数;  $Z_i$  为边界节点  $i$  与其对应的等值发电机之间扩展支路的阻抗参数;  $C_i$  为边界节点  $i$  与其对应的等值发电机之间支路的对地电容;  $E_i \angle \alpha_i$  表示与边界节点  $i$  对应的等值发电机的电压相量。

### 1.2 网络参数求解优化模型

对于图 1 所示的考虑对地电容的扩展电压源

Ward 等值模型,外部电网输入到内部电网的功率在等值前后必须保持一致。为了实现外部电网等值参数的合理估计,本文基于内部电网多时段的量测数据,构建以等值前后外部电网输入到内部电网的有功功率及无功功率差值的绝对值和最小为优化目标,以等值支路的阻抗及对地电容在一定范围内为约束条件的网络参数求解优化模型。具体表达式为:

$$\begin{cases} \min(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (|P_i - P_{ce,i}| + |Q_i - Q_{ce,i}|)) \\ s.t. \quad R_{\min} < R < R_{\max} \\ X_{\min} < X < X_{\max} \\ C_{\min} < C < C_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $R_{\min}$ 、 $R_{\max}$  分别表示等值支路电阻的下限与上限;  $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$  分别表示等值支路电抗的下限与上限;  $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$  分别表示对地电容的下限与上限。  $P_{ce,i}$ 、 $Q_{ce,i}$  分别为等值前外部电网输入到内部电网的有功功率及无功功率;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为等值后外部电网输入到内部电网的有功功率及无功功率,其计算公式如式(2)所示<sup>[8]</sup>。

$$\begin{cases} P_i = U_i E_i (G_i \cos \theta_{ie} + j B_i \sin \theta_{ie}) + \\ U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + j B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i E_i (G_i \sin \theta_{ie} - j B_i \cos \theta_{ie}) + U_i^2 \omega C_i \\ U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - j B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\theta_{ie}$  为边界节点  $i$  的电压与等值发电机的电压相角之差;  $\theta_{ij}$  为边界节点  $i$  的电压与边界节点  $j$  的电压相角之差;  $\omega$  表示角速度;  $Y_i = G_i + j B_i$  为边界节点  $i$  与其对应的等值发电机之间扩展支路阻抗参数的倒数;  $Y_{ij} = G_{ij} + j B_{ij}$  为边界节点  $i$  到边界节点  $j$  之间耦合支路阻抗参数的倒数。

式(2)中,待求解变量为  $E_i$ 、 $\theta_i$ 、 $G_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ 、 $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$ , 对于一个具有  $n$  个边界节点的系统,网络等值参数待求解变量  $E_i$ 、 $\theta_i$ 、 $G_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  各有  $n$  个,  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  各有  $n(n-1)/2$  个,因此待求解变量总数为  $n^2 + 4n$ 。

## 2 基于网络灵敏度的内部电网历史数据处理方法

传统基于内部电网信息的网络参数求解方法本质上是通过获取多个时间段的内部电网量测信息,每个时间段可获得的量测方程有  $2n$  个,则  $m$  个时间段可获得的量测方程有  $2mn$  个,为使网络等值参数可解,需满足量测方程数大于网络等值参数,

即

$$2nm > n^2 + 4n \quad (3)$$

随着边界节点数量增多,为使网络等值参数求解所要求的量测方程数也线性增加。然而在相近的几个时间段内部电网量测数据可能相差不大,导致迭代收敛性差或不收敛<sup>[9]</sup>。为了克服这一问题,本文采用优化算法求解网络等值参数,通过优化算法求解网络模型等值参数流程框图如图2所示。

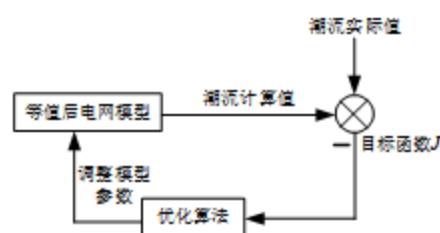


图2 基于优化算法求解模型参数流程框图

Fig.2 Flow chart of solving model parameters based on optimization algorithm

然而,基于优化算法求解网络等值参数理论上获取的内部电网量测数据越多,网络等值参数求解结果越精确。为了能够准确估计外部电网等值参数,且避免对电网支路开断或功率扰动,本文提出基于网络灵敏度的内部电网历史数据处理方法,来获取有效的内部电网量测数据。

以等值开始前的最后一次内部电网量测值为当前内部电网量测基准,若第 $k$ 个量测数据与基准差别较大,这种差别无非是内部电网、外部电网或外部电网与内部电网同时某处结构或参数发生改变。只有当外部电网结构或参数几乎不发生变化情况下,才能基于内部电网量测数据获取准确的外部电网等值参数,因此需筛选仅当内部电网某处结构或参数变化而变化的历史量测数据。内部电网各节点的功率表达式为:

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^v U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + j B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^v U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - j B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $U_i \angle \theta_i$  表示节点 $i$ 的电压相量;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为节点 $i$ 的有功功率和无功功率,  $i = 1, 2, 3, \dots, v$ ,  $v$  为内部电网除边界节点的节点个数;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别为节点 $i$ 到节点 $j$ 之间支路的电导和电纳;  $\theta_{ij}$  为节点 $i$ 与节点 $j$ 的电压相角之差。

式(4)为内部电网线路传输功率的非线性表达式,将功率表达式在初值点处进行泰勒展开,并忽

略二次及以上高次项,可得:

$$\begin{cases} P_i = P_i^{(0)} + \sum_{j=1}^{v-1} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial P_i}{\partial U_j} \Delta U_j \\ Q_i = Q_i^{(0)} + \sum_{j=1}^{v-1} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^m \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j \end{cases} \quad (5)$$

式中: 节点 $1, 2, \dots, m$ 为PQ节点,  $m+1, \dots, v-1$ 为PV节点。

对于内部电网某处参数发生改变,可以第 $k$ 个历史内部电网量测数据与内部电网量测基准对比得到各节点有功功率扰动量 $\Delta P$ 和无功功率扰动量 $\Delta Q$ ;对于内部电网某处支路开断,通过基于补偿法的节点功率扰动来模拟内部电网支路开断<sup>[10]</sup>,由补偿法可以计算得到各节点有功功率扰动量 $\Delta P$ 和无功功率扰动量 $\Delta Q$ 。进而根据各节点功率的扰动量,通过式(6)计算得到内部电网各节点在内部电网某处结构或参数发生改变后的电压与相角值。

$$\begin{cases} H \Delta Q + R \Delta P = \Delta V \\ M \Delta Q + T \Delta P = \Delta \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $H$ 、 $R$ 分别为无功、有功电压灵敏度矩阵,  $M$ 、 $T$ 分别为无功、有功相角灵敏度矩阵,将式(5)写为矩阵形式并求逆,即可得到电压/无功、电压/有功、相角/无功与相角/有功灵敏度矩阵。

仅当内部电网某处结构或参数发生变化时,通过式(6)计算得到内部电网各节点电压与第 $k$ 个历史内部电网各节点电压几乎一致<sup>[11]</sup>,而若外部电网某处结构或参数发生变化或内部电网与外部电网某处结构或参数同时发生变化,通过式(6)计算得到内部电网各节点电压与第 $k$ 个历史内部电网各节点电压有所区别。利用内部电网与外部电网结构或参数变化而呈现的不同特征,定义历史数据与当前时段内部电网量测基准的拟合优度来确定内部电网各节点电压变化的主要来源,拟合优度如式(7)所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中:  $y_i$ 是由式(6)计算得到的内部电网各节点电压,  $\bar{y}$ 为第 $k$ 个内部电网历史各节点电压,通常认为拟合优度达到0.9以上就认为内部电网量测数据改变主要来源于内部电网。

### 3 基于灰狼算法的外部电网等值参数估计方法

GWO算法是受自然界灰狼种群在狩猎过程中表现出来的等级制度启发得到的优化算法<sup>[12]</sup>,具有

操作简便、调节参数少与较好的全局收敛性等优点。本文使用 GWO 算法对外部电网等值参数进行求解,主要思想是通过多次迭代找到一组使得目标函数取得最优解的参数组,主要计算步骤如下:

1) 输入实测数据。本文需要的实测数据包括多时段边界节点的电压及外部电网输入到边界节点的功率。

2) 设置灰狼种群规模、最大迭代次数与待优化参数上下限,并初始化灰狼种群。不合理的待优化参数上下限设置可能会导致灰狼算法迭代计算出现收敛困难或者不收敛等问题。由于电网的运行方式必然处于最大、最小运行方式之间,因此参考这两种运行方式下支路的阻抗及对地电容值来设置等值支路阻抗及对地电容的上下限值。对于等值发电机的电压上下限,参考潮流计算收敛的条件,设置为[0.95,1.05]。

3) 计算种群的适应度值。根据目标函数式(1),定义适应度函数为:

$$f = \sum_{j=1}^t \sum_{i=1}^n (|P_i - P_{ced}| + |Q_i - Q_{ced}|) \quad (8)$$

式中:  $f$  为适应度值,  $f$  越小说明等值精度越高;  $t$  为获取的内部电网量测数据时段数;  $n$  为边界节点的个数。

4) 对种群进行适应度值排序,并根据适应度值标记  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 、 $\omega$  灰狼。其中,  $\alpha$  灰狼是最优解,负责带领整个种群狩猎猎物;  $\beta$  灰狼是次优解,负责协助  $\alpha$  灰狼;  $\delta$  灰狼是一般解,听从  $\alpha$  灰狼与  $\beta$  灰狼的决策;  $\omega$  灰狼是待选解,追随上面三层狼群的行动。

5) 检测当前迭代次数是否大于最大迭代次数设定值,若满足则迭代结束,输出一组迭代过程中的最优解;若不满足则利用  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  灰狼指导  $\omega$  灰狼继续位置更新,返回继续迭代。

## 4 算例分析

### 4.1 仿真对象

仿真算例系统: CERPI36v7 节点系统。其中,在 CERPI36v7 节点系统中设置 4 个边界节点,分别为边界节点 9、14、16、19,节点 6、7、8、11、12、13、25、26、27、28、29、30、31、33、34、51、52 属于外部电网节点,其他节点属于内部电网节点。由于目前实际工程计算大多基于直接挂等值机法进行电网等值<sup>[13]</sup>,本文通过直接挂等值机法对照仿真实验,以比较验证本文所提方法的等值精度。

本文采用潮流平均相对误差和潮流最大误差

两个评价指标来衡量等值方法的等值精度。

潮流平均相对误差  $\xi_{ave}$  为:

$$\xi_{ave} = \text{ave} \left| \frac{U_i - U_{i,eq}}{U_i} \right| + \text{ave} \left| \frac{\theta_i - \theta_{i,eq}}{\theta_i} \right| \quad (9)$$

式中:  $U_i$ 、 $U_{i,eq}$ 、 $\theta_i$ 、 $\theta_{i,eq}$  分别表示等值前后内部电网节点的电压幅值及相角;  $\text{ave}$  表示对表达式求均值。

潮流最大相对误差  $\xi_{max}$  为:

$$\xi_{max} = \max \left| \frac{U_i - U_{i,eq}}{U_i} \right| + \max \left| \frac{\theta_i - \theta_{i,eq}}{\theta_i} \right| \quad (10)$$

式中:  $\max$  表示对表达式求最大值。

## 4.2 仿真结果分析

### 4.2.1 基于灵敏度的历史数据处理方法

为了验证本文所提历史数据处理方法是否有效,在系统中设置 4 种电网结构或参数改变方案下计算得到的潮流解作为历史数据,以系统典型运行方式下潮流解为内部电网量测基准,基于 4 种不同方案计算得到的拟合优度如表 1 所示。

表 1 不同方案计算下得到的拟合优度

Table 1 The goodness of fit calculated by different schemes

| 电网结构或参数改变方案                    | $R^2$  |
|--------------------------------|--------|
| 内部电网节点发电机功率节点变化 40%            | 0.9528 |
| 内部电网与外部电网节点发电机功率节点变化 40%       | 0.6408 |
| 内部电网负荷节点 21 变化 100%            | 0.9956 |
| 内部电网负荷 21 及外部电网负荷节点 29 变化 100% | 0.8314 |

由表 1 可以看出,在内部电网量测数据改变主要来源于内部电网下计算得到的拟合优度明显大于 0.9,本文方法可以基于内部电网历史量测数据有效筛选出仅在内部电网结构或参数发生变化对应的内部电网量测数据。

### 4.2.2 基于灰狼算法的网络参数求解结果

首先基于灰狼算法对 CERPI36v7 节点系统的外部网络等值参数进行求解,等值参数迭代结果如图 3 所示。直接挂等值机法将外部电网等值为每一边界节点串联的等值机,等值机的功率即为外部电网输入到边界节点的功率,如表 2 所示。

表 2 直接挂等值机法计算得到的外部网络等值参数

Table 2 The external network equivalent parameters calculated by the direct hanging equivalent machine

| m       | e               | t | h               | o | d |
|---------|-----------------|---|-----------------|---|---|
| 等值机所接节点 | $P/\text{p.u.}$ |   | $Q/\text{p.u.}$ |   |   |
| 9       | -3.851          |   | 0.1798          |   |   |
| 14      | -1.0982         |   | -0.0992         |   |   |
| 16      | 2.276           |   | 1.299           |   |   |
| 19      | 2.429           |   | -0.4645         |   |   |

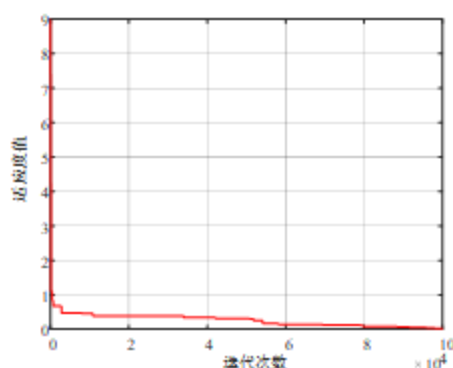


图3 CERPI36v7节点系统外部电网等值参数迭代结果

Fig.3 CERPI36v7 node system external network equivalent parameter iteration results

将所求得的外部电网等值参数代入等值后电网模型中并进行潮流计算,潮流平均相对误差及潮流最大相对误差如表3所示。

表3 不同等值方法电网潮流结果的等值误差

Table 3 Equivalent error of power flow results of different equivalent methods

| 方法      | $\xi_{ave}/\%$ | $\xi_{max}/\%$ |
|---------|----------------|----------------|
| 本文方法    | 0.0009         | 0.0023         |
| 直接挂等值机法 | 0.0006         | 0.0017         |

由表3可以看出,本文所提方法与直接挂等值机法潮流平均相对误差和潮流最大相对误差均保持在0.1%以内,满足等值精度的要求。

#### 4.2.3 负荷功率增长对等值误差的影响

通常情况下,等值网络不能精确代表外部电网,当电网某处结构或参数发生变化时潮流误差可能较大。为使仿真结果具有代表性,表4给出了内部电网节点负荷功率增长情况下,本文方法和直接挂等值机法的潮流误差变化情况。

表4 内部电网节点21负荷功率增加时的等值误差

Table 4 The equivalent error of the internal grid node 21 when the load power increases

| 负荷增量 | 方法      | $\xi_{ave}/\%$ | $\xi_{max}/\%$ |
|------|---------|----------------|----------------|
| 1%   | 本文方法    | 0.0024         | 0.0053         |
|      | 直接挂等值机法 | 0.0043         | 0.11           |
| 2%   | 本文方法    | 0.0048         | 0.11           |
|      | 直接挂等值机法 | 0.0086         | 0.23           |
| 3%   | 本文方法    | 0.0071         | 0.16           |
|      | 直接挂等值机法 | 0.13           | 0.35           |
| 10%  | 本文方法    | 0.24           | 0.54           |
|      | 直接挂等值机法 | 0.44           | 1.17           |

从表中可以看出本文方法潮流平均相对误差和潮流最大相对误差保持在0.6%以内,满足等值精度的要求,而直接挂等值机法潮流最大相对误差超过了1%。相比于直接挂等值机法,本文所提方法

在电网状态发生变化时仍能保持较高的精度,更适应于潮流状态变化的实际情况。

## 5 结语

本文提出了一种基于灰狼算法的电网静态等值方法。该方法基于内部电网多个时段的量测数据,以等值前后外部电网输入到边界节点的功率之差最小为优化目标,通过灰狼算法求解外部电网等值参数。为了实现网络等值参数的良好估计,本文提出了基于网络灵敏度的历史量测数据处理方法,避免了对电网支路开断或功率扰动,提升了该方法的实用性。CERPI36v7节点系统的仿真结果表明了本文方法有效性,本文方法计算过程简单且适用范围广,有望在实际工程中应用。

## 参考文献

- [1] Su H Y, Liu T Y. Robust Thevenin equivalent parameter estimation for voltage stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4637-4639.
- [2] 谢仕伟,胡志坚,吴方勤,等.基于递推最小二乘法的多端口外部电网静态等值参数辨识方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(03): 26-34.
- [3] 孙华东,陈树勇,常晓璐,等.适应大扰动的电力系统戴维南等值参数跟踪算法[J].中国电机工程学报,2012,32(22): 126-132.
- [4] Contaxis G, Debs A S. Identification of external equivalent for steady state security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(2): 409-414.
- [5] 颜伟,王雪,卢建刚,等.基于支路开断模拟的双端口黑箱外部电网静态等值方法[J].中国电机工程学报,2018,38(11): 3154-3162.
- [6] 肖健,甘明,刘有志,等.基于量测数据的外部电网在线等值实用方法[J].电力系统自动化,2021,45(02): 157-163.
- [7] 张京伟.考虑拓扑结构特征的电力系统静态等值方法研究[D].南宁:广西大学,2023.
- [8] 王锡凡.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.
- [9] 杨豪岭,曹德欣.关于解一类奇异非线性方程组的牛顿法的收敛性[J].郑州大学学报(理学版),2015,47(03): 1-6.
- [10] 甘明.电网在线等值新方法[J].上海电气技术,2020,13(04): 17-21.
- [11] 贺春光,王涛,杨书强,等.基于“先无功-后有功”功率补偿的配电网电压协同控制策略[J].工程科学与技术,2024,56(02): 26-36.
- [12] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey Wolf Optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46-61.
- [13] 余婧,朱柳,颜伟,等.基于内部电网实测信息的多端口外部电网静态等值方法[J].电力自动化设备,2013,33(06): 32-37.

收稿日期: 2013-07-04.

作者简介:

魏开建(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定分析,Email: wkj\_2019@163.com

林圣(1983),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统稳定分析等,Email: slin@swjtu.edu.cn

刘健(1996),男,博士研究生,研究方向为交

直流混联电网控制,Email: jlin-swjtu@foxmail.com

魏开建

(编辑 五号楷体,居右,段前空 6pt)

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 含贯通式供电的电气化铁路负荷与电力系统联合潮流计算方法

曹昭祺, 林圣\*, 刘健

(西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 611756)

## Combined power flow calculation method of electrified railway load and power system with continuous power supply

CAO Zhaoqi, LIN Sheng\*, LIU Jian

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** With the rapid development of the railway, the fluctuation and impact of the power interaction between the electrified railway traction load and the power system are increasing. How to accurately describe the power interaction between the traction load and the power system is particularly important. Therefore, this paper first establishes the power flow calculation model of traction load. On this basis, the power interaction between traction load and power system is analyzed, and the joint power flow calculation method of power system and traction load is proposed. According to the example analysis, the proposed method has good accuracy, convergence and applicability. Compared with the non-combined power flow, the proposed method can describe the power interaction between the two systems more accurately.

**KEY WORDS:** power system, traction load, power flow calculation, joint power flow

**摘要:** 随着铁路的飞速发展, 电气化铁路牵引负荷与电力系统功率交互的波动和冲击不断增大, 如何准确的描述牵引负荷与电力系统间的功率交互显得尤为重要。因此, 本文首先建立了牵引负荷的潮流计算模型, 在此基础上分析了牵引负荷与电力系统的功率交互, 提出了电力系统与牵引负荷的联合潮流计算方法。根据算例分析, 所提方法具有较好的准确性、收敛性和适用性。与未联合潮流相比, 所提方法能更准确描述两个系统的功率交互。

**关键词:** 电力系统, 牵引负荷, 潮流计算, 联合潮流

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号

## 0 引言

电气化铁路作为电力系统中最大的单体负荷<sup>[1]</sup>, 具有波动性和冲击性等特点。牵引负荷接入电力系统后会引起节点电压波动以及支路功率波动等隐患<sup>[2]</sup>, 随着电气化铁路的飞速发展, 电气化铁路牵引负荷的用电量不断增大, 其与电力系统功率交互

的波动和冲击也越来越大, 对电力系统潮流影响也越来越严重, 因此有必要研究含牵引负荷的电力系统潮流计算。

目前, 针对电力系统的潮流计算已较为成熟, 如牛顿-拉夫逊法、快速解耦法等<sup>[3]</sup>。同时对牵引供电系统潮流计算也有较为深入的研究。文献[4]建立了电气化铁路牵引网统一数学模型, 便于牵引供电系统潮流计算。文献[5]利用迭代法和叠加原理进行供电区间多列车运行的潮流计算。文献[6]针对目前常见的全并联自耦变压器模型(autotransformer, AT), 建立了车网耦合的潮流计算模型。文献[7]将机车作为恒功率负荷, 采用电力系统潮流算法对牵引供电系统进行了潮流计算, 提升了计算精度。文献[8]基于牵引负荷的概率模型, 建立了牵引负荷与电力系统的相序混合潮流模型, 研究了牵引负荷随机性和不平衡性对电力系统的影响, 但所建立的负荷模型不具备时序性。文献[9-10]对高速铁路牵引供电系统进行动态建模, 实现了动态潮流计算, 提高了牵引供电系统的模型精度。但对外部电网进行了等值, 未考虑其与外部电网的功率交互。

此外, 电力系统与牵引供电系统结构不同, 高压电力系统三相对称, 一般采用其中一相进行潮流计算。而牵引供电系统较为复杂, 包含牵引变压器和牵引网, 同时机车位置不断变化, 使其潮流计算模型更加复杂。同时也增加了电力系统和牵引负荷联合建模难度。

因此, 本文在牵引供电系统动态潮流模型和电力系统潮流模型的基础上, 研究两个系统之间的功率交互, 实现含牵引负荷的电力系统潮流计算。通过建立两部分的潮流模型, 研究了两者的潮流迭代方法, 将其进行联合潮流计算, 所提方法能较好地



收敛。将潮流结果与 Matlab/Simulink 的结果进行对比,验证了所提方法的准确性。

## 1 牵引供电系统动态潮流计算模型

### 1.1 电气化铁路牵引负荷模型

牵引负荷的功率受列车运行路况和行车密度等因素的影响。通过对列车功率、牵引网、牵引变压器建模,通过导纳矩阵连接,可以建立电气化铁路牵引负荷确定性模型。本文牵引供电系统采用贯通式复线 AT 供电方式<sup>[10]</sup>。

#### 1.1.1 列车功率计算

对于某一确定的铁路线路,可根据线路参数对列车进行受力分析,并结合动力学方程计算列车的运动特性函数,在此基础上可进一步根据列车参数计算该列车的牵引功率特性曲线<sup>[11]</sup>。

列车牵引控制策略如图 1 所示,通过区段最大限速与列车实时运行速度差值的大小,来确定列车牵引力的大小<sup>[12]</sup>,进行列车受力分析。

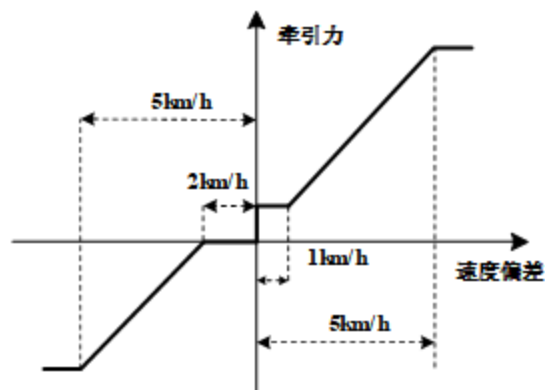


图 1 列车牵引控制策略示意图

Fig. 1 Schematic diagram of train traction control strategy

根据受力分析,将列车运行过程分为牵引、惰行和制动三种运行工况。列车运行过程中速度、位置、合力和加速度不断变化,假设在很小时间间隔  $\Delta t$  内列车所受合力不变,则列车的运行速度和位置可由式(1)求解。

$$\begin{cases} v_{t+1} = v_t + a_t \cdot \Delta t \\ s_{t+1} = s_t + v_t \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a_t \cdot \Delta t^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $a_t$  为列车在  $t$  时刻的加速度;  $v_t$ 、 $v_{t+1}$  和  $s_t$ 、 $s_{t+1}$  分别为列车  $t$ 、 $t+1$  时刻的速度和位置。

根据列车运动方程和牵引控制策略,可求解列车在线路中每时刻的牵引力、制动力、速度和位置。将列车等效为随运动过程不断变化的功率源模型,根据实时的速度、牵引力和式(2),求得列车牵引电机实时的输出功率。

$$P_{tr} = F_{tr} \cdot v \quad (2)$$

式中:  $P_{tr}$  为牵引电机输出功率;  $v$  为列车的速度;  $F_{tr}$  为牵引电机输出的牵引力或电制动力。

考虑到牵引传动系统的传输损耗和车载辅助供电系统能耗,列车受电弓侧的功率为<sup>[10]</sup>:

$$P_a = \frac{P_{tr}}{\eta} + P_a \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为牵引传动系统的传输效率;  $P_a$  为辅助供电系统消耗的功率。

#### 1.1.2 牵引网模型

根据 AT 供电方式,将牵引网等效为链式模型,以牵引所、AT 所和分区所在位置进行分割,再根据列车位置和数量进行动态切割<sup>[9]</sup>。牵引网链式电路如图 2 所示。

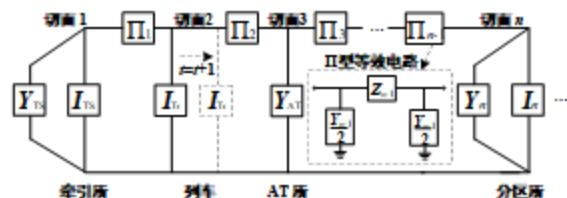


图 2 牵引网动态链式电路模型

Fig. 2 Dynamic chain circuit model of traction network

#### 1.1.3 牵引变压器模型

目前铁路负序等电能质量问题能够有效的治理,但机车过分相问题难以解决<sup>[13]</sup>。而贯通式供电减少过分相,提升供电能力。采用单相接线牵引变压器可以消除牵引变电所出口位置的电分相。单相接线牵引变压器的等值电路如图 3 所示。

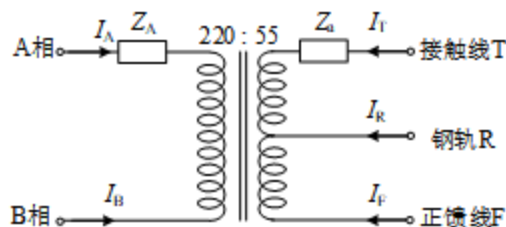


图 3 单相接线牵引变压器等值模型

Fig. 3 Equivalent model of single-phase traction transformer

#### 1.2 外部电源等值模型

通常采用 220 kV 的外部电源为牵引负荷供电,其等值电路模型由区域电网和输电线路两部分组成。将区域电网等效为电流源与电阻并联的诺顿等效电路,等值电路模型如图 4 所示。

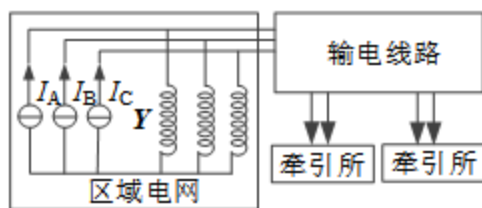


图 4 外部电源等值模型

Fig. 4 External power equivalent model

### 1.3 动态潮流计算

在 1.1 和 1.2 节中建立了牵引负荷和外部电网模型,通过潮流方程将外部电源、牵引供电系统、电力机车耦合,建立牵引供电系统动态潮流计算模型。由于牵引供电系统结构复杂,传输导线数量多,导纳矩阵复杂。而高斯-赛德尔迭代法,具有运算速度快、收敛性好、简单直观易实现的优点,将求解复杂的节点电压方程简化<sup>[10]</sup>。

高斯-赛德尔迭代法主要包括系统导纳矩阵和节点注入电流。基于牵引供电系统与机车的耦合模型可以求得系统节点导纳矩阵。电流出现在牵引所切面和列车切面位置,牵引变电所来源于外部电源注入电流,而列车等效为功率源模型,将列车功率转换为列车取流<sup>[4]</sup>。得到外部电源和列车的电流后,根据牵引变电所、AT 所和列车位置,形成潮流计算注入电流向量  $I$ ,结合系统节点导纳矩阵  $Y_{tr}$ ,采用高斯-赛德尔进行潮流计算。迭代第  $k$  次的节点电压如式(4)所示,当电压迭代误差满足式(5)的时,潮流满足收敛条件,输出潮流结果。

$$U_{tr}^{(k)} = Y_{tr}^{-1} I_{tr}^{(k)} \quad (4)$$

式中:  $U_{tr}^{(k)}$  为迭代第  $k$  次时系统节点电压向量;  $Y_{tr}^{-1}$  为系统节点导纳矩阵的逆;  $I_{tr}^{(k)}$  为迭代第  $k$  次时系统节点注入电流向量。

$$\max(|U_{tr}^{(k)} - U_{tr}^{(k-1)}|) < \varepsilon_{tr} \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_{tr}$  为牵引供电系统潮流收敛精度。

考虑机车位置变化,建立动态外部电源-牵引供电系统-机车耦合模型,  $t$  时刻潮流计算步骤如下:

(1) 输入列车参数、线路参数,确定  $t$  时刻线路上运行的列车数量、位置、输出功率,求解  $t$  时刻牵引供电系统节点导纳矩阵;

(2) 初始化潮流计算电压向量和潮流计算迭代次数;

(3) 根据式(4)计算  $t$  时刻的节点电压,判断是否达到收敛条件,若否,则更新迭代次数  $k=k+1$ ,更新节点电压,重复执行步骤(3);若是,则  $t$  时刻的牵引潮流计算完成。

## 2 含电气化铁路的电力系统潮流计算方法

### 2.1 联合潮流计算原理

由于牵引供电系统具有一定的三相不对称性,外部电源为等效的三相电源,会出现一定的三相不平衡。当外部电源短路容量越大,牵引供电系统的三相不平衡度越低<sup>[15]</sup>。因此,本文考虑牵引负荷接入高压电力系统,其三相不平衡度较低,对高压电力系统三相对称性影响较小。此时联合潮流只需考虑电力系统与牵引供电系统两个系统间的功率交互问题。如图 5 所示,两个系统间的功率交互通过联络线进行,电力系统边界母线节点电压幅值为  $U_1$  和  $U_2$ ,节点为牵引负荷提供的功率为  $P_1+jQ_1$  和  $P_2+jQ_2$ ,牵引供电系统外部电源电压为  $U_{T1}$  和  $U_{T2}$ ,牵引负荷消耗的功率为  $P_{T1}+jQ_{T1}$  和  $P_{T2}+jQ_{T2}$ 。

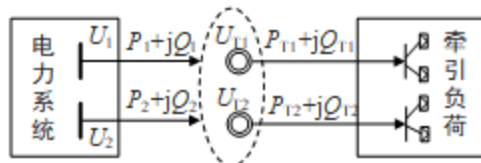


图 5 系统联合示意图

Fig. 5 System joint schematic diagram

其中边界母线的状态包括电压幅值、相角、有功和无功,牵引负荷的状态包括电压、有功和无功。将边界节点作为 PQ 型节点,电力系统可进行潮流计算求出各个变量的状态。而牵引负荷确定母线的电压状态后,可以求解负荷的有功和无功。若电力系统和牵引供电系统潮流收敛,且满足:

$$\begin{cases} U_1 = U_{T1} \\ U_2 = U_{T2} \\ P_1 + jQ_1 = P_{T1} + jQ_{T1} \\ P_2 + jQ_2 = P_{T2} + jQ_{T2} \end{cases} \quad (6)$$

则可判断两个系统间潮流达到收敛。若式(6)的条件不满足,则得到电压和功率的偏差,可用偏差作为联合潮流收敛的判定条件。

### 2.2 联合潮流计算方法

借鉴前推回代法潮流计算的思路,运用来回迭代将偏差控制在一定范围内,以实现潮流收敛。牵引负荷接入电力系统时,将外部电源电压设为节点电压,以保证电压相等。牵引供电系统潮流收敛后,可以求得此时的牵引负荷功率。将此功率代入电力系统节点,以保证功率平衡。电力系统潮流计算收敛后,求得接入节点的电压,此时的电压与外部电源电压会有偏差,根据此偏差判定潮流是否收敛。第  $m$  次迭代时边界电压和功率如式(7)所示,当电压

迭代误差满足式(8)的时,潮流满足收敛条件。

$$\begin{cases} P_T^{(m)} + jQ_T^{(m)} = f_{\text{牵引侧}}(U_T^{(m)}) \\ U_T^{(m+1)} = f_{\text{电网侧}}(P_T^{(m)} + jQ_T^{(m)}) \\ P_T^{(m)} + jQ_T^{(m)} = P_T^{(m)} + jQ_T^{(m)} \\ U_T^{(m)} = U_T^{(m)} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_T^{(m)}$ 、 $Q_T^{(m)}$ 和  $U_T^{(m)}$ 分别为第  $m$  次迭代下牵引侧的有功、无功和电压;  $U_T^{(m+1)}$ 为第  $m$  次迭代后计算的电网侧节点电压;  $P_T^{(m)}$ 、 $Q_T^{(m)}$ 和  $U_T^{(m)}$ 分别为第  $m$  次迭代下电网侧的有功、无功和电压。

$$\max(|U_T^{(m+1)} - U_T^{(m)}|) < \varepsilon \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon$ 为联合潮流收敛精度。

则电力系统-牵引供电系统联合潮流流程图如图6所示,计算步骤如下:

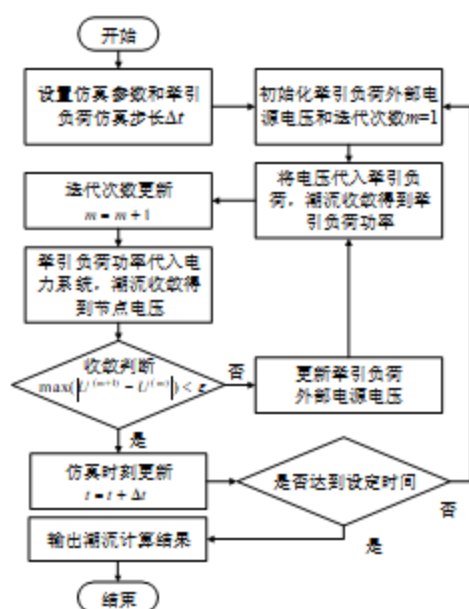


图6 联合潮流计算流程图

Fig. 6 Joint power flow calculation flow chart

(1) 设置联合潮流收敛精度和牵引负荷仿真时长,选择电力系统模型、牵引负荷接入电力系统节点位置,设置牵引负荷仿真步长  $\Delta t$ 。

(2) 初始化牵引负荷外部电源电压,初始化联合潮流迭代次数  $m=1$ 。

(3) 将电压代入牵引负荷,其潮流收敛后,计算牵引负荷功率。将牵引负荷功率代入电力系统,作为 PQ 节点进行潮流计算,潮流收敛后,得到牵引负荷接入节点电压,此时联合潮流迭代次数  $m=m+1$ 。根据式(8)判断联合潮流是否收敛。若收敛,则继续步骤(4),若不收敛,更新牵引负荷外部电源电压,继续执行步骤(3)。

(4) 当  $t$  时刻的联合潮流计算完成,令  $t=t+\Delta t$ ,

判断是否达到设定的仿真时长,若是,输出潮流计算结果,结束程序,若否,跳转至步骤(2)。

### 3 算例分析

#### 3.1 参数设置

基于 MATPOWER 中的 Case 39 算例进行仿真分析,电力系统和牵引供电系统的连接拓扑图如图7所示。电气化铁路通过 220 kV 线路和变压器接入节点 19 和 22,根据文献[10],牵引供电系统采用复线 AT 供电方式,铁路全长 123.25 km,一共 2 个外部电源、5 个牵引变电所和 4 个分区所,发车间隔为 10min,停站时间为 6min。仿真计算通过 Matlab16a 完成,仿真步长为 1s,总时长 4700s。

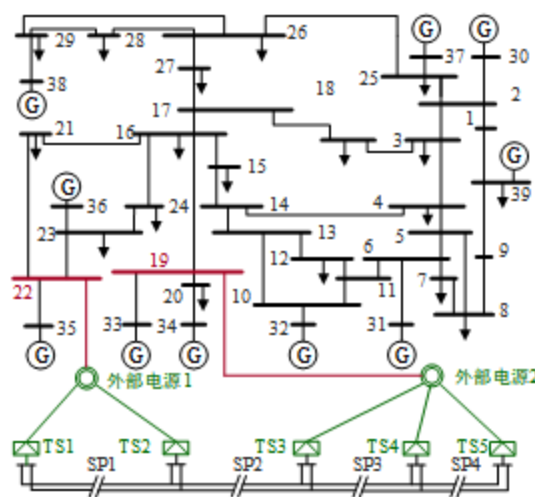


图7 Case 39 算例与牵引供电系统连接拓扑图

Fig. 7 Case 39 example and traction power supply system connection topology diagram

#### 3.2 准确性测试

为验证计算结果的正确性,计算结果与 Matlab/Simulink 仿真结果进行对比,进一步测试联合潮流准确性,改变联合潮流收敛精度  $\varepsilon$ ,测试结果如表1所示。其中  $\|\Delta U\|_{\infty}$  和  $\overline{\Delta U}$  分别为联合潮流中整个仿真过程中,牵引负荷接入节点电压幅值最大偏差和算数平均值。

表1 本文联合潮流与 Simulink 仿真的计算结果偏差

Tab.1 Deviations between the results from the joint power flow and Simulink simulation

| 精度   | $\ \Delta U\ _{\infty}$ /p.u. | $\ \Delta U\ _{\infty}$ /p.u. | $\overline{\Delta U}_{10}$ /p.u. | $\overline{\Delta U}_{25}$ /p.u. |
|------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1e-4 | 2.6789e-6                     | 1.2052e-6                     | 2.7767e-8                        | 9.9173e-9                        |
| 1e-5 | 2.6789e-6                     | 1.0646e-6                     | 2.6516e-8                        | 8.0015e-9                        |
| 1e-6 | 2.6789e-6                     | 1.0646e-6                     | 2.6455e-8                        | 7.8209e-9                        |
| 1e-7 | 2.6771e-6                     | 1.0644e-6                     | 2.6445e-8                        | 7.8217e-9                        |

从表1可知,本文算法与 Matlab/Simulink 仿真结果相同,证明了本文联合潮流的正确性。此外随着收敛精度的提高,计算误差变小,在后续仿真中取  $\varepsilon=1e-6$  即可。

### 3.3 准确性分析

为了比较联合潮流与不考虑联合潮流的准确度,将牵引负荷外部电源电压设置为 1.0p.u.潮流计算得到功率后,将其接入电网进行潮流计算。边界母线的电压、有功和无功偏差的最大值如表 2 所示。联合潮流后电压、有功和无功的误差均减少,特别是牵引负荷的有功和无功偏差。

表 2 联合潮流前后对比

Tab. 2 Comparison before and after combined tidal current

| 母线    | 参数  | $\ \Delta U\ _{\infty}/\text{p.u.}$ | $\ \Delta P\ _{\infty}/\text{p.u.}$ | $\ \Delta Q\ _{\infty}/\text{p.u.}$ |
|-------|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| BUS19 | 联合  | 2.6789e-6                           | 3.2276e-05                          | 3.3292e-4                           |
|       | 未联合 | 1.9838e-4                           | 0.0025                              | 0.0246                              |
| BUS22 | 联合  | 1.0646e-6                           | 1.0627e-5                           | 1.3218e-4                           |
|       | 未联合 | 9.9491e-5                           | 0.0010                              | 0.0121                              |

其中牵引负荷接入节点 19 的无功功率偏差值如图 8 所示,可见,联合潮流后,能更精确的描述牵引负荷与电力系统的功率交互。

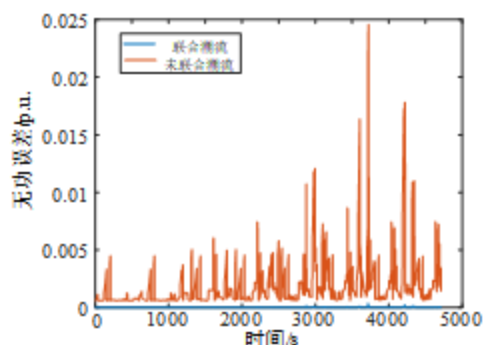


图 8 牵引负荷无功偏差

Fig. 8 Traction load reactive power deviation

### 3.4 收敛性测试

采用 Case39、Case118、Case145、Case300、Case1888rte 算例和实际系统 130 节点算例在各自仿真时长中,联合潮流迭代的最大迭代次数和平均误差测试结果如表 3 所示。由表 3 可见,联合潮流具有较强的收敛性和适用性,适合不同潮流计算方法 and 系统间求解功率交互,使其潮流稳定。

表 3 不同系统的最大迭代次数和最大偏差电压

Tab. 3 The maximum number of iterations and the maximum deviation voltage of different systems

| 测试系统        | 联合潮流迭代次数 | $\ \Delta U\ _{\infty}/\text{p.u.}$ | $\ \Delta U\ _{\infty}/\text{p.u.}$ |
|-------------|----------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Case39      | 3        | 2.6789e-6                           | 1.0646e-6                           |
| Case118     | 4        | 1.2073e-5                           | 1.2509e-5                           |
| Case145     | 4        | 6.9421e-6                           | 6.4012e-7                           |
| Case300     | 3        | 8.9524e-7                           | 1.1800e-6                           |
| Case1888rte | 4        | 1.4556e-5                           | 2.8820e-6                           |
| 实际系统        | 4        | 1.0944e-5                           | 7.4009e-6                           |

## 4 结论

本文基于牵引负荷与电力系统功率交互,提出了联合潮流方法。通过类似前推回代法的联合迭代,

求解两个系统的功率交互,使系统间电压和功率平衡。研究结果发现:

本文提出的联合潮流计算方法准确性高、收敛性较好,在多个系统中均能较快的收敛。同时,联合潮流方法不受电网拓扑限制,也不需要每次建立电网与牵引负荷的耦合模型。在计算时,可以灵活选择电网模型和接入节点,减少了建模的工作量。还可以用于牵引负荷和电网概率模型潮流计算中。

## 参考文献

- [1] 魏波, 胡海涛, 王科, 等. 基于实测数据和行车运行图的高铁牵引变电站负荷预测方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 179-188.
- [2] Matta V, Kumar G. Unbalance and voltage fluctuation study on AC traction system[C]/Proceedings of 2014 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ). Rakvere, Estonia: IEEE, 2014.
- [3] 郭峰, 吴文传, 张伯明, 等. 节点类型扩展潮流计算的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 81-87.
- [4] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52-58.
- [5] 何正友, 方慧, 郭东, 等. 基于 AT 等值电路的牵引网潮流计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2008(1): 1-7.
- [6] 胡海涛, 何正友, 王江峰, 等. 基于车网耦合的高速铁路牵引网潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 101-108, 192.
- [7] 王芳, 王瑞娟. 基于恒功率负荷的牵引供电系统潮流计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(03): 59-64, 70.
- [8] 陈维荣, 姜天, 戴朝华, 等. 电气化铁路接入下的电力系统概率潮流分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6899-6907, 7103.
- [9] 王科. 高速铁路牵引供电系统动态建模及电能质量分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [10] 朱恒性. 薄弱电源条件下的牵引供电系统供电能力评估方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [11] 马棚, 陈金强, 孙小军, 等. 考虑电气化铁路接入的山区电网可靠性评估研究[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1172-1183.
- [12] 李寅军, 冯晓云, 王利军, 等. 高速动车组自动过分相控制策略研究与仿真[J]. 电工技术学报, 2007, (07): 181-185.
- [13] 李群湛, 王辉, 黄文勋, 等. 电气化铁路牵引变电所群贯通供电系统及其关键技术[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 1064-1074.
- [14] Wang K, Hu H, Zheng Z, et al. Study on Power Factor Behavior in High-Speed Railways Considering Train Timetable[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 220-231.
- [15] 陈民武, 宫衍圣, 李群湛, 等. 电气化铁路电能质量评估及新型控制方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 141-147.



杨茜

收稿日期: 2024-07-04.

作者简介:

曹阳祺(2002), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: zqcao@nxy.swjtu.edu.cn;

林圣(1983), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制、轨道交通供电系统健康诊断, E-mail: slin@swjtu.edu.cn;

刘健(1996), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: jlu@swjtu@foxmail.com.

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 光伏组件开路故障前后参数变化分析

张旭瑞, 张文硕, 王湘军, 王东昊, 苏勋文

(黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 哈尔滨 150022)

## Analysis of parameter changes before and after open circuit faults in photovoltaic modules

ZHANG Xurui, ZHANG Wenshuo, WANG Xiangjun, WANG Donghao, SU Xunwen

(School of Electrical &amp; Control Engineering, Heilongjiang University of Science &amp; Technology, Harbin 150022, China)

**ABSTRACT:** The fault diagnosis of photovoltaic modules has a significant impact on photovoltaic power generation systems. To study the parameter changes of photovoltaic modules before and after open circuit faults, a single diode simulation model of photovoltaic modules was established using MATLAB/Simulink simulation software based on the mathematical characteristics of photovoltaic modules. The open circuit faults of photovoltaic modules were simulated, and the parameters of photovoltaic modules after open circuit faults were identified using the Osprey Optimization Algorithm (OOA). Five parameter data of photovoltaic modules under open circuit faults were obtained. By comparing the values of the five parameters of photovoltaic modules under open circuit faults with those before faults, analyzing the data changes and drawing conclusions, effective references are provided for the determination of open circuit fault types in photovoltaic module single diode models.

**KEY WORDS:** photovoltaic; Open circuit fault; OOA; parameter identification

**摘要:** 光伏组件故障诊断对于光伏发电系统有着重要的影响。为研究光伏组件开路故障前后的参数变化,通过光伏组件数学特性并利用 MATLAB/Simulink 仿真软件建立光伏组件单二极管仿真模型,对光伏组件的开路故障进行仿真,同时利用鱼鹰优化算法(OOA)对开路故障后的光伏组件进行参数辨识,并得出开路故障下的光伏组件五参数数据。通过比较开路故障下光伏组件五参数与故障前光伏组件五参数的值,分析数据变化并得出结论,为光伏组件单二极管模型开路故障类型判断提供有效参考。

**关键词:** 光伏组件; 开路故障; 鱼鹰优化算法; 参数辨识

**DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号 (小五号 Times New Roman 字体加黑)**

**基金项目:** 2021 年度黑龙江省省属高校基本科研业务费项目”, 项目编号 2021-KYYWF-1467

Project 2021 Basic Research Business Fee Project for Provincial Universities in Heilongjiang Province, Project No. 2021-KYYWF-1467

## 0 引言

随着光伏发电在发电系统中的占比的增长,人们也对光伏组件的各项参数加以重视,作为光伏发电系统的重要组成部分,光伏组件的输出特性及状态变化将会直接影响到整个光伏发电系统的性能<sup>[1]</sup>,同时也对合理安排机组出力及大规模光伏发电系统的并网运行与调度至关重要<sup>[2]</sup>。因此对于光伏组件的各个参数的掌握就成为了掌握光伏发电的重要途径<sup>[3]</sup>。光伏组件由大量单体光伏电池通过串联及并联的方式连接组成,能够健康平稳的工作,是保证光伏发电系统安全运行的关键<sup>[4]</sup>。而在光伏装机容量快速增加的同时,光伏组件出现故障的概率也随之增加,如何评估光伏组件运行状态已经成为亟待解决的问题<sup>[5]</sup>。光伏组件的五参数即光伏电池单二极管拓扑中光生电流、二极管反向饱和电流、二极管理想因子、串联电阻和并联电阻与光伏组件的开路故障息息相关,因此快速准确地辨识这些参数是确保光伏组件长期稳定运行的必要前提<sup>[6]</sup>。

文献[7]对光伏阵列常见的故障类型及其形成原因进行了分析,并对近年来光伏阵列在线故障诊断研究进行了分类。文献[8]利用 MATLAB/Simulink 建立了仿真模型,对光伏阵列在典型故障条件下进行了仿真模拟和数据分析,为故障诊断模型提供了输入特征变量的理论依据。文献[9]提出了一种基于径向基神经网络的光伏组件故障诊断方法。

本文通过 MATLAB/Simulink 仿真软件建立光伏组件模型,并对其开路故障进行仿真模拟,同时利用一种新型的元启发式算法,即鱼鹰优化算法(Osprey Optimization Algorithm, OOA)<sup>[10]</sup>进行开路故障前后光伏组件的参数辨识,通过对比故障前后光伏组件五参数的变化确定光伏组件的开路故障的影响,为光伏组件运行状态及故障诊断提供参考。

# 1 光伏组件数学模型及开路故障模型分析及目标函数确定

## 1.1 光伏组件单二极管数学模型

光伏电池是光伏组件的重要组成部分，光伏电池最常用的模型有单二极管模型和双二极管模型。而与双二极管模型相比，单二极管模型结构简单、计算精度高且准确，因此选择光伏电池单二极管模型进行研究。图1为光伏电池单二极管模型的等效电路。

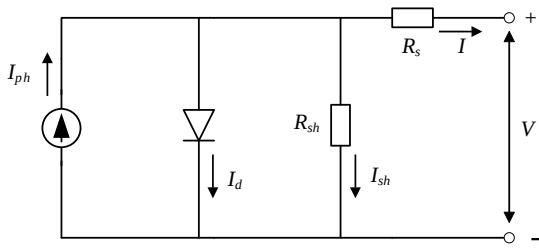


图1 单二极管模型等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of single diode model

其模型的数学表达式为：

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} = I_{ph} - I_a \left[ e^{\frac{q(V + I R_s)}{n k T}} - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中， $I$ ——光伏电池整体输出电流； $I_d$ ——二极管支路电流； $I_{sh}$ ——并联电阻支路电流； $n$ ——二极管理想因数； $V$ ——光伏电池整体输出电压； $q$ ——电子电荷数； $I_a$ ——二极管饱和电流； $R_s$ ——光伏电池串联电阻； $T$ ——光伏电池工作时的绝对温度； $R_{sh}$ ——光伏电池并联电阻； $k$ ——玻尔兹曼常数；

## 1.2 光伏组件数学模型及目标函数确定

光伏组件模型由若干单二极管模型经串并联组合而成，如图2所示。

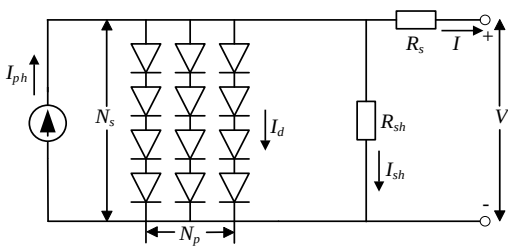


图2 光伏组件模型等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of pv module model

其模型的数学表达式为：

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_a \left[ e^{\frac{q(V + I R_s)}{n k T}} - 1 \right] - \frac{N_p V + N_s I R_s}{N_s R_{sh}} \quad (2)$$

式中， $N_p$ ——光伏电池并联数量； $N_s$ ——光伏电池串联数量；

## 1.3 光伏组件开路数学模型分析

光伏组件开路故障本质上是光伏组件中某个或某些光伏电池断开，表现在光伏组件中的形式为并联数减少，具体如图3所示：

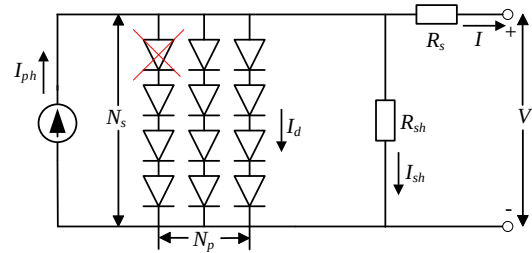


图3 光伏组件开路故障模型等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of photovoltaic module open circuit fault model

## 1.4 光伏组件正常状态与开路故障状态仿真模型

为了更直观的进行光伏组件在开路故障前后的模拟实验，利用 MATLAB/Simulink 仿真软件进行建模，光伏组件正常运行仿真模型及开路故障仿真模型分别如图4和图5所示：

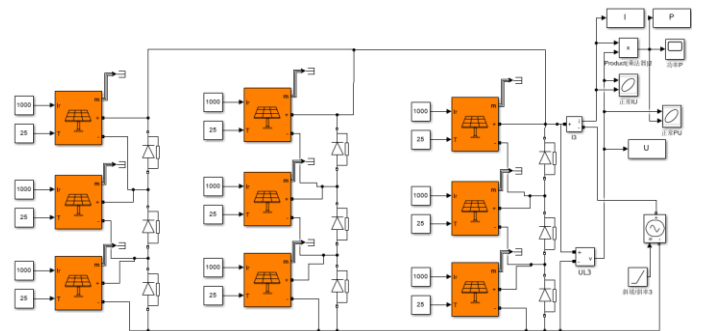


图4 光伏组件正常状态模型等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of normal state model for photovoltaic modules



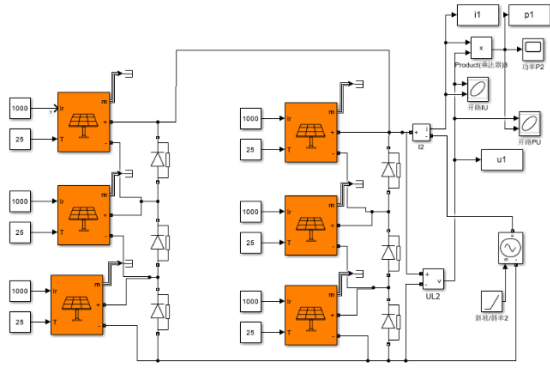


图5 光伏组件开路故障模型等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of photovoltaic module open circuit fault model

光伏组件正常运行状态下由9个光伏组件经串并联组成，其中光伏电池数据来自文献[11]，光伏组件开路故障状态下将第三列并联的3个光伏组件进行开路处理，即切除，只余下6个光伏组件。通过对这两个模型进行实验，分别得出输出电压与输出电流，并通过输出电压与输出电流进行参数辨识，得出故障前后的光伏组件五参数。

### 1.5 目标函数确定

本文采用均方根误差作为目标函数，如式(3)所示。

$$RMSE(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - I_e)^2}{N}} \quad (3)$$

式中， $N$ ——使用数据的数量； $I_i$ ——实测电流； $I_e$ ——辨识电流。这样就可以通过均方根误差的最小值得出最精确的辨识结果。

## 2 鱼鹰优化算法(OOA)

鱼鹰优化算法(OOA)是2023年由穆罕穆德·德赫加尼和帕维尔·特罗乔夫斯基共同提出的一种新型的元启发式算法，该算法通过模拟鱼鹰捕猎的行为来进行寻优。该算法主要分为两个阶段，分别为勘探阶段与开采阶段。

### 2.1 勘探阶段

在OOA设计中，对于每只鱼鹰，在搜索空间中具有更好目标函数值的其他鱼鹰的位置被视为水下鱼类。使用(4)指定每个鱼鹰的鱼组，即搜索空间。

$$FP_i = \{X_k | k \in \{1, 2, \dots, N\} \wedge F_k < F_i\} \cup \{X_{best}\} \quad (4)$$

式中， $FP_i$ ——第*i*个鱼鹰的鱼组； $X_{best}$ ——最优解。

鱼鹰在鱼组中随机检测一条鱼的位置并攻击它。基于鱼鹰向鱼移动的行为进行数学建模，使用式(5)计算鱼鹰相应的新位置。如果该新位置的目标函数值优于先前位置的目标函数值，则根据式(6)替换鱼鹰的位置。

$$I_i = \begin{cases} 1, rand < 0.5 \\ 2, rand \geq 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{i,j}^{P1} = x_{i,j} + r_{i,j} (SF_{i,j} - I_i \cdot x_{i,j})$$

$$x_{i,j}^{P1} = \begin{cases} x_{i,j}^{P1}, lb_j \leq x_{i,j}^{P1} \leq ub_j \\ lb_j, x_{i,j}^{P1} < lb_j \\ ub_j, x_{i,j}^{P1} > ub_j \end{cases}$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P1}, F_i^{P1} < F_i \\ X_i, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $rand$ —— $[0,1]$ 区间中的随机数； $I_i$ ——集合 $\{1, 2\}$ 中的随机数； $X_i^{P1}$ ——第1阶段的第*i*只鱼鹰的新位置； $x_{i,j}^{P1}$ ——第*i*个解的第*j*个变量的值； $F_i^{P1}$ ——第*i*个解的目标函数值； $F_i$ ——原第*i*个解的目标函数值； $SF_i$ ——第*i*只鱼鹰所选择的鱼； $SF_{i,j}$ ——第*j*个变量； $r_{i,j}$ —— $[0,1]$ 区间中的随机数； $lb_j$ ——第*j*个变量的下界； $ub_j$ ——第*j*个变量的上界。

### 2.2 开采阶段

鱼鹰在猎杀完一条鱼后，会把它带到一个合适的位置并在那里吃。为了模拟鱼鹰的这种自然行为，首先，对于种群的每个成员，使用式(7)计算一个新的随机位置作为“适合吃鱼的位置”。然后，如果目标函数的值在这个新位置上得到改善，则根据式(8)，替换相应鱼鹰的先前位置。

$$x_{i,j}^{P2} = x_{i,j} + \frac{lb_j + r \cdot (ub_j - lb_j)}{t} \quad (7)$$

$$x_{i,j}^{P2} = \begin{cases} x_{i,j}^{P2}, lb_j \leq x_{i,j}^{P2} \leq ub_j \\ lb_j, x_{i,j}^{P2} < lb_j \\ ub_j, x_{i,j}^{P2} > ub_j \end{cases}$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{P2}, F_i^{P2} < F_i \\ X_i, \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中， $X_i^{P2}$ ——第2阶段第*i*只鱼鹰的位置； $x_{i,j}^{P2}$ ——第*i*个解的第*j*个变量； $F_i^{P2}$ ——第*i*个解的目标函数值； $r$ —— $[0,1]$ 区间中的随机数； $t$ ——算法当前迭代次数。

### 2.2 OOA在光伏组件参数辨识中的操作步骤

1) 通过光伏组件正常状态与开路故障下得到的输出电压和输出电流, 利用式(4)生成初始种群。

2) 通过式(5)对种群进行迭代并进行界限调整, 通过式(6)比较迭代前后目标函数值选择最佳种群。

3) 通过式(7)对种群进行迭代并进行界限调整, 通过式(8)比较迭代前后目标函数值选择最佳种群, 最后得出的最佳种群值就分别是光伏组件正常状态和开路故障状态下的五参数辨识值。

### 3 结果与分析

通过运行 1.4 小节中建立的光伏组件正常运行状态模型及光伏组件开路故障状态模型, 运行环境为辐照度  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , 温度  $25^\circ\text{C}$ , 迭代次数 10000, 独立运行 30 次分别得到正常状态和开路故障状态下的输出电压与输出电流, 通过鱼鹰优化算法(OOA)进行参数辨识, 得出光伏组件五参数的辨识结果并取 30 次结果的平均值, 并进行比较, 如表 1 所示:

表 1 正常状态与开路故障状态参数比较

Table 1 Comparison of parameters between normal state and open circuit fault state

|                      | 正常状态                     | 开路故障状态                   |
|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| $I_{ph}/\text{A}$    | 3.406                    | 2.271                    |
| $I_{sd}/\mu\text{A}$ | $1.2657 \times 10^{-10}$ | $8.4380 \times 10^{-11}$ |
| $R_s/\Omega$         | 1.5687                   | 2.3530                   |
| $R_{sh}/\Omega$      | 853.5018                 | 1280.253                 |
| $n$                  | 105.602                  | 105.602                  |

通过得出的输出电压与输出电流做出光伏组件分别在正常状态和开路故障状态下  $V-I$  特性曲线, 如图 6 所示:

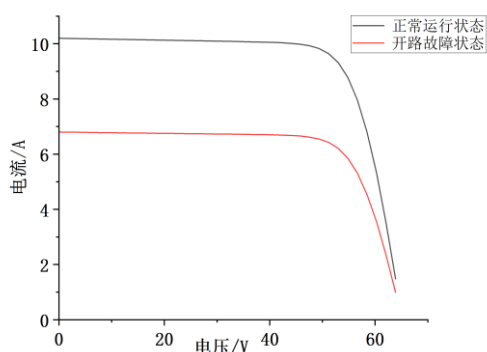


图6 光伏组件伏-安特性曲线

Fig.6 V-I characteristic curve of photovoltaic modules

由表 1 可知, 开路故障状态下, 二极管理想因

子  $n$  保持不变, 而光生电流  $I_{ph}$ 、二极管饱和电流  $I_{sd}$ 、串联电阻  $R_s$  和并联电阻  $R_{sh}$  发生显著变化, 其中光生电流  $I_{ph}$  数值降低 33.32%, 二极管饱和电流  $I_{sd}$  数值降低 33.33%, 串联电阻  $R_s$  数值上升 50.00%, 并联电阻  $R_{sh}$  数值上升 50.00%。同时由图 6 可知, 相比于正常运行状态, 光伏组件运行在开路故障状态时输出电压基本保持不变, 而输出电流随着光伏组件的开路而下降。

光伏组件开路故障会使得光伏组件中光伏电池并联数减少, 即公式(2)中  $N_p$  减小, 而由图 4 与图 5 可看出, 当并联数减少时会导致光伏组件并联电阻与串联电阻增大, 当并联数减少时, 与正常运行状态相比缺少光伏组件, 会使光伏组件整体发出的光生电流减小, 同时输出的电流也会减小, 从而导致流经二极管的饱和电流减少。因此光伏组件开路故障是因为导致并联数  $N_p$  减少, 进而导致并联电阻  $R_{sh}$  与串联电阻  $R_s$  的增加, 光生电流  $I_{sh}$  与二极管饱和电流  $I_a$  的减少, 由本节的仿真结果也证明了这一推断, 因此当光伏组件在运行过程中参数发生如此变化时可以认为是发生了开路故障。

### 4 结论

光伏组件在开路故障状态运行时, 二极管理想因子保持不变, 而光生电流和二极管饱和电流相比于正常状态运行时会显著下降, 串联电阻和并联电阻会显著上升, 因此可以得出, 当工作时光伏组件的光生电流和二极管饱和电流发生下降且串联电阻和并联电阻发生上升时, 可以判断此时光伏组件发生了开路故障。

### 参考文献

- [1] Bauer T, Lips H P, Thiele G, et al. Operational tests on HVDC thyristor modules in a synthetic test circuit for the sylmar east restoration project[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997.
- [2] Dang J, Wang G, Xia C, et al. Research on the parameter identification of PV module based on fuzzy adaptive differential evolution Algorithm[J]. Energy Reports, 2022, 8: 12081-12091
- [3] 徐岩, 高兆, 朱晓荣. 基于混合蛙跳算法的光伏阵列参数辨识方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(7): 1903-1911.
- [4] 刘东. 基于 GA-BP 神经网络的光伏阵列在线故障检测研究[D/OL]. 山东理工大学, 2022.
- [5] Abdel M, Mohamed R, Chakraborty R K, et al. An efficient teaching-learning-based optimization algorithm for parameters identification of photovoltaic models: Analysis and validation[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 227: 614-635
- [6] 吕艳玲, 钟晨, 刘志鹏. 基于光伏组件参数辨识的故障诊断分析

[J/OL]. 上海交通大学学报, 1-16[2024-06-05].

- [7] 夏超浩. 光伏组件模型参数辨识及其故障识别研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [8] 彭雅兰, 李志刚. 太阳能光伏阵列在线故障诊断方法综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(11): 1-7.
- [9] 余玲珍, 杨靖, 龙道银, 等. 典型故障条件下光伏阵列建模与仿真[J]. 电网与清洁能源, 2020,36(10): 103-111.
- [10] 宋文海, 李田泽, 田晖, 等. 基于概率神经网络的光伏阵列故障诊断研究[J]. 电源技术, 2019,43(9): 1525-1527.
- [11] Dehghani M, Trojovský P. Osprey optimization algorithm: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems[J]. Frontiers in Mechanical Engineering, 2023, 8: 1126450.
- [12] Xu S, Wang Y. Parameter estimation of photovoltaic modules using a hybrid flower pollination algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 144: 53

收稿日期: 2024-07-29。

作者简介:



张旭瑞

张旭瑞(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏组件参数辨识, E-mail: 1067678196@qq.com;

张文硕(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网容量配置和经济运行, E-mail: ss15948531383@163.com;

王湘军(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏电池参数辨识, E-mail: 2423673891@qq.com;

王东昊(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析, E-mail: w785553839@163.com;

苏勋文(1976), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为风电场等值建模、风电场次同步振荡分析等, E-mail: suxunwen@163.com。

文章编号: 中图分类号: 文献标志码: 学科代码:

# 含氢储系统的煤矿微电网经济优化运行

张文硕, 张旭瑞, 王东昊, 王湘军, 苏勋文

(黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 黑龙江省哈尔滨市 150022)

## Economic optimization operation of coal mine microgrid with hydrogen storage system

Zhang Wenshuo, Zhang Xurui, Wang Donghao, Wang Xiangjun, Su Xunwen

(School of Electrical & Control Engineering, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China)

**ABSTRACT:** This article integrates hydrogen storage systems into coal mine microgrids and constructs an optimization model with the goals of maximum annual revenue and minimum carbon emissions. The Copula joint function and clustering reduction are used to process wind speed and lighting data to obtain typical wind/light scenarios. K-means clustering reduction is applied to temperature and load data to obtain temperature and load scenarios, respectively. The obtained scenarios are solved using multi-objective Osprey optimization algorithm, and the solutions in the obtained solution set are selected through fuzzy multi-attribute decision-making method to finally obtain an economic operation plan. The results are compared with the optimization results of coal mine microgrids without hydrogen storage systems obtained in the same way. The results show that coal mine microgrids with hydrogen storage systems have higher profits when carbon emissions are similar.

**KEY WORDS:** economical operation; coal mine microgrid; hydrogen storage system

**摘要:** 本文将氢储系统接入煤矿微电网中, 构建以最大年收益和最小碳排放量为目标的优化模型, 利用 Copula 联合函数和聚类削减对风速和光照数据处理得到风/光典型场景, 对于温度和负荷数据分别进行 K-means 聚类削减得到温度和负荷场景, 利用得到的场景通过多目标鱼鹰优化算法求解, 并通过模糊多属性决策方法对得到的解集中的解进行选择, 最终解得经济运行方案, 将该结果与相同方式求得的不含氢储系统的煤矿微电网优化结果进行对比, 结果显示含氢储系统的煤矿微电网在碳排放相近的情况下收益更高。

**关键词:** 经济运行; 煤矿微电网; 氢储系统

**DOI:**

基金项目: 2021 年度黑龙江省省属高校基本科研业务费项目, 项目编号 2021-KYYWF-1467

2021 Basic Research Business Fee Project for Provincial Universities in Heilongjiang Province, Project No. 2021-KYYWF-1467

## 0 引言

近些年来随着工业化的不断推进, 全世界范围内能源需求不断攀升, 而在当前双碳目标的大环境下传统的化石能源带来的环境问题越发突出, 因此氢能因具有易储存、便于运输、能量密度大等特点被广泛关注<sup>[1-4]</sup>。氢储能在设备上由电解槽、燃料电池和储氢罐组成<sup>[5]</sup>, 因其具有良好的储能效益所以将其接入微电网中是十分可行的。

微电网作为一种分布式电源, 可以有效地利用当地发电资源完成清洁能源的就地消纳, 避免负荷对大电网进行冲击造成许多不必要的影响, 因此具有良好的发展前景, 当前对于微电网的研究已经进行到了一定深度。针对微电网经济运行问题, 文献[6]考虑风光资源时空的互补性, 构建双层多场景多微网协同优化配置模型, 最终验证多能交互的经济型和有效性。文献[7]对煤矿微电网进行容量配置后考虑灵活负荷对微电网进行经济运行研究最终得到经济运行方案。文献[8]对煤矿综合能源系统进行容量配置后利用改进的粒子群算法对综合能源系统进行经济优化运行, 最终得到运行方案。

本文将氢储系统接入煤矿为电网中以最大年收益和最小碳排放为目标构建优化模型, 最终结果显示含氢储系统的煤矿微电网在碳排放相近的情况下收益更高。

## 1 微电网数学模型

本文将氢储系统引入煤矿微电网中, 微电网的整体结构如图 1 所示。在该微电网中, 发电部分包括风电、光伏和煤层气内燃机, 储能部分包括氢储和蓄电池部分, 在本文中发电量有剩余时电池优先充电; 发电量不足时电池优先供给, 依照此方式完成系统的协调运行。

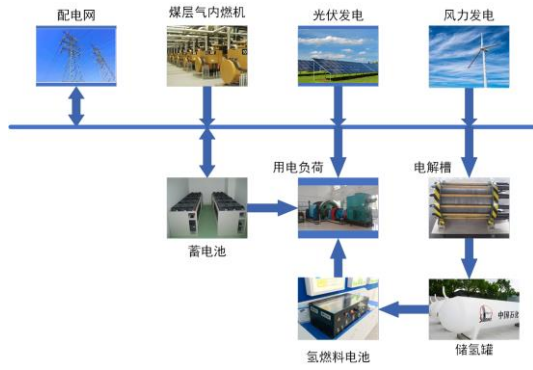


图1 多能源微电网结构图

Fig.1 Multi energy microgrid structure diagram

### 1.1 风力发电机数学模型

风力发电机组的数学模型为

$$P_w = \begin{cases} 0, & v < v_c \\ P_{wN} \frac{v - v_c}{v_n - v_c}, & v_c < v < v_n \\ P_{wN}, & v_n < v < v_o \\ 0, & v_o < v \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P_w$  为风力发电机发出的功率;  $P_{wN}$  为风力发电机的额定发出功率;  $v$  为实际风速;  $v_c$  为切入风速;  $v_n$  为额定风速;  $v_o$  为切出风速。

### 1.2 光伏发电数学模型

光伏发电的数学模型为

$$P_{pv} = P_{pvN} \left[ 1 + k_p (T_C - T_{RC}) \right] \frac{G_C}{G_{RC}} \quad (2)$$

式中,  $P_{pv}$  为光伏电池发出的电量;  $P_{pvN}$  为光伏电池额定功率;  $k_p$  为标准测试环境下的环境温度系数;  $T_C$  为实际环境温度;  $G_C$  为实际太阳辐照度;  $T_{RC}$  为标准环境测试温度;  $G_{RC}$  为标准环境测试太阳辐照度。

### 1.3 煤层气内燃机数学模型

煤层气内燃机数学模型为

$$P_{ERQ} = P_{RQ} \eta_{RQ} \quad (3)$$

式中,  $P_{ERQ}$  为内燃机发出的电功率;  $P_{RQ}$  为消耗的煤层气能量;  $\eta_{RQ}$  为内燃机工作效率。

### 1.4 蓄电池数学模型

蓄电池的数学模型为<sup>[9]</sup>

$$E_D(t) = E_D(t-1)(1-\tau) + (P_D^C(t)\eta_D^C - \frac{P_D^F(t)}{\eta_D^F})\Delta t \quad (4)$$

式中,  $E_D(t)$  为电池在  $t$  时的电量;  $\tau$  为电池的自

放电率;  $\eta_D^C$  为电池充电效率;  $\eta_D^F$  为电池放电效率;  $P_D^C(t)$  为  $t$  时电池的充电功率;  $P_D^F(t)$  为  $t$  时电池的放电功率。

### 1.5 氢储部分数学模型

#### 1.5.1 电解槽数学模型

电解槽的数学模型为<sup>[10]</sup>

$$P_{EH} = \eta_{EH} P_E \quad (5)$$

式中,  $P_{EH}$  为电解槽产生的氢能;  $P_E$  为电解槽消耗的电能;  $\eta_{EH}$  为电解槽制氢的效率。

#### 1.5.2 储氢罐数学模型

储氢罐的数学模型为<sup>[11]</sup>

$$Q_H(t) = Q_H(t-1) + (P_H^C(t)\eta_H^C - \frac{P_H^F(t)}{\eta_H^F})\Delta t \quad (6)$$

式中,  $Q_H(t)$  为储氢罐在  $t$  时的储氢量;  $P_H^C(t)$  为  $t$  时储氢罐充入功率;  $P_H^F(t)$  为  $t$  时储氢罐输出功率;  $\eta_H^C$  为充入氢气的效率;  $\eta_H^F$  为放出氢气的效率。

#### 1.5.3 燃料电池数学模型

燃料电池的数学模型为

$$P_{RL} = \eta_{HR} P_{HR} \quad (7)$$

式中,  $P_{RL}$  为燃料电池释放的电能;  $P_{HR}$  为燃料电池消耗的氢能;  $\eta_{HR}$  为燃料电池的工作效率。

## 2 优化模型配置

### 2.1 目标1: 最大日收益

本文构建的收益目标由成本和收益两部分组成, 成本部分包括运维成本、购电成本和煤层气开采成本, 收益部分包括售电收益、煤层气利用补贴和安全收益, 其中安全收益是煤层气被开采利用后减少安全事故引发带来的收益, 本文将其设为有关开采煤层气体积的一次函数, 构建的收益目标如式(8)所示:

$$\max f_2 = (C_1 V_{gas} + C_2 P_{ST} + C_3 V_{gas}) - (y_{yw} + C_4 P_{GT} + C_5 V_{gas}) \quad (8)$$

式中,  $V_{gas}$  为消耗煤层气体积;  $P_{ST}$  为售电量;  $P_{GT}$  为购电量;  $C_1$  为单位体积煤层气补贴;  $C_2$  为售电价格;  $C_3$  为安全收益系数;  $C_4$  为购电价格;  $C_5$  为单位体积煤层气开采成本。  $y_{yw}$  为运维成本。

$y_{yw}$  具体表达式为:



$$y_{yw,t} = \sum_{t=1}^T [S_{wt} P_{wt}(t) + S_{pvt} P_{pvt}(t) + S_{ERQ} P_{ERQ}(t) + S_D^C P_D^C(t) + S_D^F P_D^F(t) + S_{EH} P_{EH}(t) + S_H^{HC} P_H^{HC}(t) + S_H^{HF} P_H^{HF}(t) + S_{RL} P_{RL}(t)] \quad (9)$$

式中,  $S_{wt}$  为风电单位功率运维成本;  $S_{pvt}$  为光伏单位功率运维成本;  $S_{ERQ}$  为煤层气内燃机单位功率运维成本;  $S_{EH}$  为电解槽单位功率运维成本;  $S_{RL}$  为燃料电池单位功率运维成本;  $S_D^C$  为蓄电池充电单位功率运维成本;  $S_D^F$  为蓄电池放电单位功率运维成本;  $S_H^{HC}$  为储氢罐储氢单位功率运维成本;  $S_H^{HF}$  为储氢罐释放氢单位功率运维成本。

## 2.2 目标 2: 最小碳排放

$$\min f_3 = K_1 V_{gas} \quad (10)$$

式中,  $K_1$  为单位体积煤层气燃烧的碳排放量。

## 2.3 约束条件

建立优化模型应当满足等式约束和不等式约束, 其等式约束与不等式约束如式 (11) 与式 (12) 所示:

$$P_{wt} + P_{pvt} + P_{ERQT} + P_{GT} + E_D + Q_H = F_T + P_{ST} + P_{EHT} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{wt}(t) \leq P_{wtN} \\ 0 \leq P_{pvt}(t) \leq P_{pvtN} \\ 0 \leq P_{ERQ}(t) \leq P_{ERQN} \\ 0 \leq P_D^C(t) \leq P_D^{C,max} \\ 0 \leq P_D^F(t) \leq P_D^{F,max} \\ 0 \leq P_{EH}(t) \leq P_{EHN} \\ 0 \leq P_H^C(t) \leq P_H^{C,max} \\ 0 \leq P_H^F(t) \leq P_H^{F,max} \\ 0 \leq P_{RL}(t) \leq P_{RLN} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P_D^{C,max}$  为蓄电池的最大充电功率;  $P_D^{F,max}$  为蓄电池的最大放电功率;  $P_H^{C,max}$  为储氢罐最大充入氢气功率;  $P_H^{F,max}$  为储氢罐最大放出氢气功率。

## 3 多目标鱼鹰优化算法

本文涉及的微电网经济运行是实际工程中常见的一种多目标优化问题, 本文将采用多目标鱼鹰优化算法对问题进行求解。多目标鱼鹰优化算法是由原始的鱼鹰优化算法和多目标优化策略组成。鱼鹰优化算法是由 Mohammad Dehghani 和 Pavel Trojovský 于 2023 年提出的模拟鱼鹰的捕食行为生成的一种元启发式算法, 该算法在 23 种 CEC(国际

进化计算会议) 测试函数上表现了较为良好的实用性<sup>[12]</sup>, 其算法具体流程如图 2 所示。

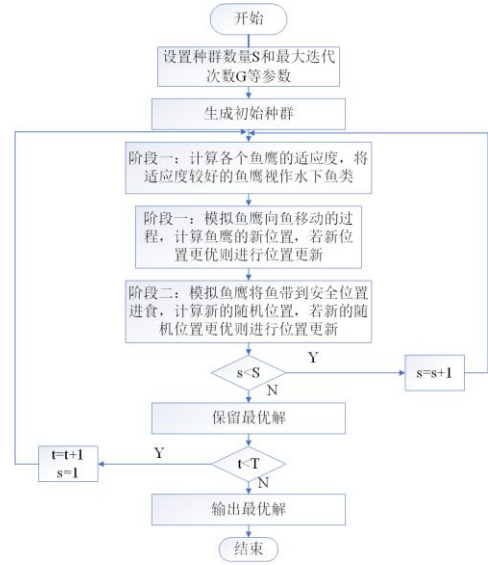


图 2 鱼鹰优化算法流程图

Fig.2 Flowchart of Osprey Optimization Algorithm

$s$  为当前更新位置的鱼鹰,  $t$  为当前迭代次数。

## 4 算例分析

### 4.1 风速/光照/温度/负荷场景生成

风光在时空上存在一定的互补关系, 因此考虑用 Copula 联合函数对风速和光照的概率密度函数建立二者的联合分布函数, 在此基础上进行采样和聚类削减得到典型场景。对于温度和负荷数据分别进行 K-means 聚类削减, 最终得到风速/光照/温度/负荷场景典型场景如图 3 所示。

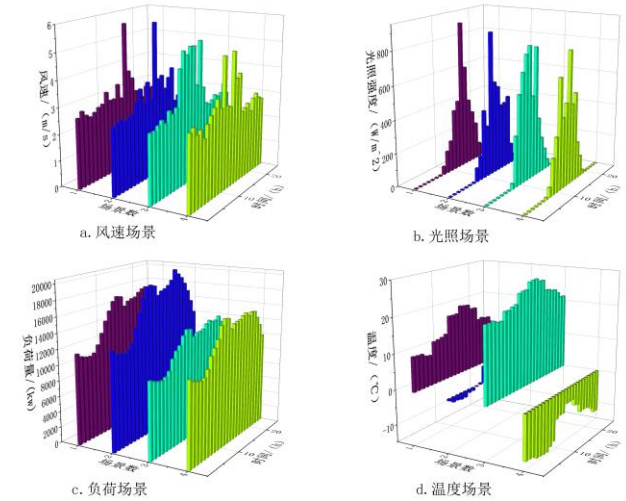


图 3 典型场景

Fig.3 Typical Scenarios

### 4.2 优化结果

通过场景削减得到典型场景后, 利用多目标鱼鹰优化算法对第 2 节建立的双层优化模型求解得到



目标的解集,通过折衷型模糊决策方法对解进行选择,求得的含氢储系统微网和不含氢储系统微网在

各个场景下的目标值如表 1 所示,表中方案 A 表示含氢储系统微网,方案 B 表示不含氢储系统微网。

表 1 优化结果对比

Table.1 Comparison of optimization results

|           | 场景 1    |         | 场景 2    |         | 场景 3    |         | 场景 4    |         |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|           | 方案 A    | 方案 B    | 方案 A    | 方案 B    | 方案 A    | 方案 B    | 方案 A    | 方案 B    |
| 收益/(元)    | 3283066 | 3058112 | 2956876 | 2906339 | 3853449 | 3675496 | 3591982 | 3532672 |
| 碳排放量/(kg) | 722.03  | 672.76  | 658.52  | 646.38  | 830.23  | 788.63  | 761.78  | 765.82  |

由表 1 可知含氢储系统的微电网与不含氢储系统的微电网相比在碳排放量相近的情况下均由更高的收益,当收益目标值相近的情况下碳排放量目标则有所降低,由此可本文所用的含氢储系统的微电网更具优势,机组各部分出力如图 4 所示。

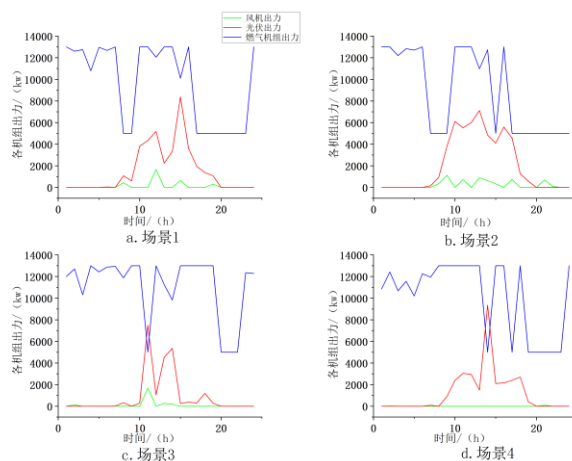


图 4 各部分机组出力图

Fig.4 Output diagram of each unit

## 5 结论

本文将氢储系统接入煤矿微电网中,构建以最大收益和最小碳排放量为目标的优化模型对各部分出力进行求解,最终结果表示在碳排放量相近的情况下微电网收益有所提升,且氢储系统的引入为调度增加了更多可能性,在较低负荷时制备的氢气存在进一步获得效益的能力,同时便于进一步建设煤矿综合能源系统,从本文建立的优化模型和未来建设方面均表现更优。

## 参考文献

- [1] Li J, Zou W, Yang Q, et al. Towards net-zero smart system: An power synergy management approach of hydrogen and battery hybrid system with hydrogen safety consideration[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 263: 115717.
- [2] 范宏,于伟南,柳璐,窦真兰. 双碳目标下考虑电氢互补的智慧园区

多楼宇协调调度[J]. 电力系统自动化,2022,46(21):42-51.

- [3] 郑沛凯,李修乾,车学科,李亮,聂万胜. 氢气/氧气混合气体等离子体放电电动力学机理[J]. 高压电器,2020,56(01):114-120.
- [4] 李争,张丽平,薛增涛,孙鹤旭,王群京. 基于氢储能的双馈风力发电系统功率控制策略[J]. 电测与仪表,2020,57(13):76-83.
- [5] 陈隸,何山,谢少华,胡兵,陈洁,袁至. 基于合作博弈的风-光-电氢微网容量配置[J]. 太阳能学报,2024,45(02):395-405.
- [6] 林顺富,刘持涛,李东东,符杨. 考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J]. 中国电机工程学报,2020,40(05):1409-1421.
- [7] 郭沛璇. 淮南矿区某煤矿微电网容量优化配置与经济运行研究[D]. 山东科技大学,2021.
- [8] 张占维. 含煤层气内燃机的冷热电联供型微电网容量优化配置与优化运行研究[D]. 山东科技大学,2021.
- [9] 齐海涛,刘咄,赵东澳,刘旭. 边防哨所风光耦合制氢系统的配置优化[J]. 北京航空航天大学学报:1-13.
- [10] 胡臻达,姜文瑾,张林垚,杨晓东,邹艺超,王凯. 基于改进猫群算法的氢储能容量优化配置[J]. 中国电力,2023,56(10):33-42.
- [11] 李泽霜,唐忠,程卓,刘欣雨. 基于改进麻雀搜索算法的电-热-气-氢综合能源系统优化[J]. 现代电力:1-11.
- [12] Dehghani M, Trojovský P. Osprey optimization algorithm: A new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving engineering optimization problems[J]. Frontiers in Mechanical Engineering, 2023, 8: 1126450.

收稿日期: 2024-07-29。

作者简介:

张文硕(1999),男,硕士研究生,研究方向为微电网容量配置和经济运行, E-mail: ss15948531383@163.com;

张旭瑞(1998),男,硕士研究生,研究方向为光伏组件参数辨识, E-mail: 1067678196@qq.com;

王东昊(1997),男,硕士研究生,研究方向为风核打捆暂态稳定性分析, E-mail: w785553839@163.com;

王湘军(2000),男,硕士研究生,研究方向为光伏电池参数辨识, E-mail: 2423673891@qq.com;

苏勋文(1976),男,教授,硕士生导师,研究方向为风电场等值建模、风电场次同步振荡等, E-mail: suxunwen@163.com。



张文硕



张旭瑞



王东昊



王湘军



苏勋文

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于暂态电压波形特征的柔性直流输电线路纵联保护方案

王志杰, 刘海南, 李海锋

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省 广州市)

## Pilot protection for flexible HVDC transmission lines based on transient voltage ratio characteristics

Zhijie Wang<sup>1</sup>, Hainan Liu<sup>1</sup>, Haifeng Li<sup>1</sup>

(the School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, China)

**ABSTRACT:** To address the problems of poor speed performance and the large influence of the distributed capacitance of traditional pilot differential protection, a pilot protection scheme based on the characteristics of the transient voltage waveform is proposed. First, the expression of the relationship between the fault voltage of the current-limiting reactor and the measuring point is derived. From the theoretical derivation, it can be inferred that for internal faults, the voltage ratio of the current-limiting reactor to the measuring point on both sides of the HVDC line is a constant over a short period. For external faults, the voltage ratio of the current-limiting reactor to the measuring point varies exponentially on the fault side, while on the other side, it remains constant. Based on the above characteristics, the waveform characteristics of the voltage ratio of the current-limiting reactor to the measuring point are used to establish a protection criterion. A pilot protection scheme based on the standard deviation coefficient is proposed. The simulation results show that this method can reliably identify faults inside and outside the area and has high sensitivity and selectivity; moreover, this method is reliable for different types of faults and fault resistances.

**KEY WORDS:** Voltage waveform characteristics; Pilot protection; HVDC line; Standard deviation

**摘要:** 针对传统纵联差动保护的速动性差、受分布电容影响较大等问题, 提出了一种基于暂态电压波形特征的纵联保护方案。首先, 推导了区内外故障下限流电抗电压与测点电压

之间的关系表达式, 从理论推导中可知, 对于内部故障, 直流线路两侧的限流电抗电压与测点电压之比在短时间内为一常数; 当外部故障发生时, 在故障侧限流电抗电压与测点电压之比呈指数变化, 在另一侧为一常数。基于上述特点, 将限流电抗与测点电压之比的波形特征构成保护判据, 提出一种基于标准差系数的纵联保护方案。仿真结果表明: 该方法能可靠识别区内外故障, 具有较高的灵敏性与选择性。

**关键词:** 电压波形特征; 纵联保护; 直流输电线路; 标准差系数

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号(小五号 Times New Roman 字体加黑)

## 0 引言

基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统具备谐波含量低、可大规模消纳可再生能源以及无换相失败等优势, 在全世界都得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。然而直流电网属于低惯型网络, 直流侧发生短路故障后, 换流站将会向故障点馈入短路电流, 故障电流在短时间内迅速放电, 这使得故障电流上升速度快且幅值大<sup>[4]</sup>。因此, 柔性直流电网故障的快速、可靠识别仍是一个亟待解决的关键问题<sup>[5]</sup>。

传统的电流差动保护利用双端电气量, 具备较强的选择性与灵敏性。由于易受分布电容影响, 因此需设置较长的延时来避开分布电容的暂态放电过程, 导致保护的速动性受到影响<sup>[6]</sup>。为提高纵联保护的快速性, 很多学者从纵联保护方案进行优化改进, 文献<sup>[7]</sup>基于精确的线路模型计算出故障下的差动电流, 其计算方法不受分布电容的影响, 可大幅度提高动作性能。但基于 *bergeron* 模型的差动保护要求精确的波阻抗与线路串联电阻。若参数不准确, 计算的差动电流将会存在较大的误差。

为解决上述问题, 文献<sup>[8]、[9]</sup>利用换流站两

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52077082)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(No. 52077082)。

端限流电抗电压极性构建保护,该方案采样频率低,但存在耐受过渡电阻能力不足等问题。文献[10]利用限流电抗的功率差异识别故障类型。文献[11]利用测量点高低频阻抗之比构成纵联保护方案。文献[12]利用高频信息下的调制电流行波与电压行波相关系数构成正反向故障的识别,文献[13]利用测量点瞬时功率与瞬时电流积分的方法构成故障方向判据。但文献[12-13]但采用采样频率较大,对采样原件要求较高,且没有讨论更低频率的适用性。

为此,本文提出一种基于暂态电压波形特征的直流输电线路纵联保护方案。本文主要贡献如下:

1) 推导了直流输电线路区内外故障下时域解析公式的差异性。通过对区内外故障下时域特性的详细分析可得:限流电抗与测量点电压之比有利于放大直流线路边界引起的区内外故障特征差异。

2) 本文利用标准差系数来衡量正反方向的波形变化趋势,以零模电压大小构成识别故障极判据。不需要进行通信同步即可提高导频保护的可靠性、选择性与灵敏性。

3) 该方案无需频域提取工具即可识别正反方向故障,计算原理简单;在短时间窗、低采样频率下即可识别故障类型,且利用波形趋势受过渡电阻的影响较小,耐受过渡电阻能力较强。

## 1 柔性直流输电线路故障特性分析

本文以真双极模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)柔性直流输电系统为例,开展故障电压行波的分析,其拓扑结构如图1所示。 $M$ 、 $N$ 为线路两端的保护安装处。图1给出典型故障点,其中, $f_1$ 为Line1上故障点, $f_2$ 为MMC1侧区外故障点, $f_3$ 为MMC2侧区外故障点。

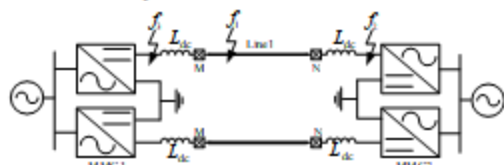


图1 MMC-HVDC系统拓扑结构

Fig.1 Topology structure of an MMC-HVDC system

对于双极直流输电线路而言,正、负极之间存在耦合,可通过如下极模变换将正、负极量解耦为零模量与线模量:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,下标1和0表示以正极为基准的线模量与零模量;下标p、n表示正极量和负极量。

## 1.1 区外故障分析

下面对区外 $f_2$ 发生故障时近故障侧测点 $N$ 的测点电压与限流电抗电压关系进行分析。行波的波头能量主要集中在高频段,在故障暂态期间,等效电路中的电阻与电容基本不起作用,因此,可将等效电路进一步简化为纯电感:  $Z_{MMC} \approx sL_{eq} = \frac{2}{3}sL_{arm}$ 。

根据故障端口边界状态,得出线模、零模等效电路如图2所示。

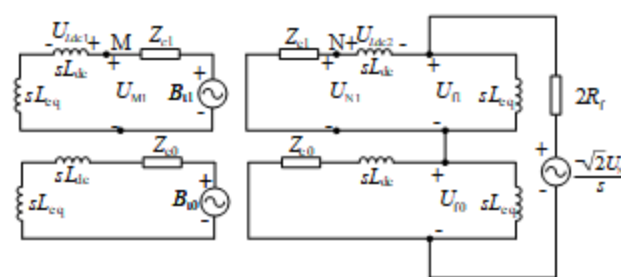


图2 区外发生单极接地故障下的等值电路

Fig.2 Equivalent circuit under an external single pole fault

由于故障点在限流电抗与换流器之间,不存在直流线路,因此实际上没有行波,但故障处电压可通过限流电抗器进入直流线路,由此在保护 $N$ 处产生初始行波,复频域下故障处的线模、零模电压为:

$$U_{f1} = \frac{-\sqrt{2}U_f}{s} \frac{sL_{eq} \parallel (sL_{dc} + Z_{c1})}{sL_{eq} \parallel (sL_{dc} + Z_{c1}) + sL_{eq} \parallel (sL_{dc} + Z_{c0}) + 2R_f} \quad (2)$$

式中, $U_{f1}$ 为故障点处线模分量的电压幅值; $U_f$ 为正常运行时故障点处电压; $Z_{c1}$ 与 $Z_{c0}$ 为线模与零模波阻抗; $R_f$ 为过渡电阻。

从式(3)中可知:故障处的线模、零模电压表达式形式复杂、并不满足阶跃波的表达形式。由于故障暂态期间电感占据主导作用,因此可对故障处电压进行简化:

$$U_{f1} \approx \frac{-\sqrt{2}U_f}{s} \frac{sL_{eq} \parallel sL_{dc}}{2(sL_{eq} \parallel sL_{dc} + R_f)} \quad (3)$$

根据线路端口回路的KVL,列写测量点 $N$ 处的线模电压:

$$U_{N1\_s}(s) = \frac{Z_{c1}}{sL_{dc} + Z_{c1}} \cdot U_{f1} \quad (4)$$

同理,求得测量点 $N$ 处限流电抗 $L_{dc2}$ 线模电压:

$$U_{Idc2\_s}(s) = \frac{sL_{dc}}{sL_{dc} + Z_{c1}} \cdot U_{f1} \quad (5)$$

定义 $Rat_{Idc\_N1}$ 为限流电抗电压 $U_{Idc1}$ 与测量点 $N$ 处的电压 $U_{N1}$ 之比,通过拉普拉斯逆变换得到

$Rat_{Ldc\_N1}$ 时域表达式:

$$Rat_{Ldc\_N1} = \frac{U_{Ldc2}}{U_{N1}} = \frac{1}{L_2 Z_{cl}} \left( \frac{L_{dk} R_f e^{-\frac{R_f t}{L_2}} - L_2 Z_{cl} e^{-\frac{Z_{cl} t}{L_{eq}}}}{e^{-\frac{Z_{cl} t}{L_{dk}}} - e^{-\frac{R_f t}{L_2}}} \right) \quad (6)$$

式中,  $L_2 = L_{eq} // L_{dc}$

由式(6)可知: 限流电抗电压  $U_{Ldc1}$  与测量点 N 处电压  $U_{N1}$  的比值  $Rat_{Ldc\_N1}$  为指数函数组成的方程式, 因此故障初期, 两者存在一个指数关系。为验证理论分析的正确性, 图 3 给出了  $Rat_{Ldc\_N1}-t$  的理论计算与仿真结果, 仿真得到的采样点分布于理论计算直线附近, 说明以上对  $Rat_{Ldc\_N1}$  关系的理论分析较为准确。

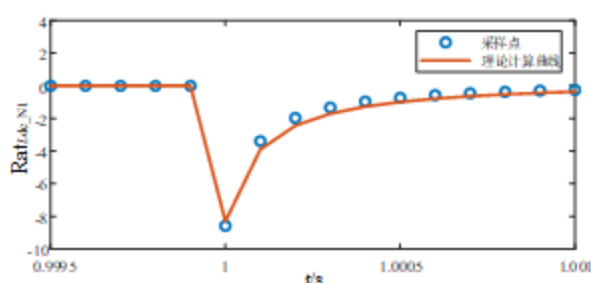


图 3 区外故障时 N 处的  $Rat_{Ldc\_N1}-t$  平面

Fig. 3.  $Rat_{Ldc\_N1}-t$  at N during external faults

## 1.2 区内故障分析

直流线路  $f_1$  处发生区内单极故障时, 根据故障端口边界状态, 可得线模、零模等效电路如图 4 所示。

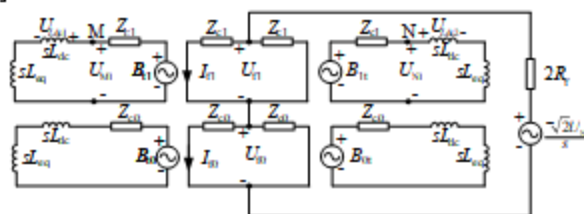


图 4 区内发生单极接地故障下的暂态等值电路

Fig. 4. Equivalent circuit under an internal single-pole fault

对于单极故障, 可表示为:

$$U_{f1} = \frac{\sqrt{2} U_f}{s} \frac{Z_{cl}}{(Z_{cl} + Z_{c0} + 4R_f)} \quad (7)$$

输电线路采用戴维南等效, 对于线模分量:

$$B_{f1} = H_1 \cdot (U_{f1} + Z_{cl} \cdot I_{f1}) \quad (8)$$

式中,  $H_1$  为线模故障行波的传递方程,  $I_{f1}$  为故障点位置的线模故障电流。考虑行波传递造成的延时和衰减畸变, 线模分量行波传递方程可表示为:

$$H_{1(x)} = e^{-r(s)x} \approx \frac{K_{cl}}{1 + s\tau_{cl}} e^{-\frac{x}{v_1}} \quad (9)$$

式中,  $x$  为沿线路传播的距离,  $K_{cl}$  为线模分量的衰减比例系数,  $\tau_{cl}$ ,  $v_1$  为线模的色散时间系数、波速。

列写测量点 M 处的线模电压:

$$U_{M1\_in}(s) = \frac{-2\sqrt{2}U_f Z_{cl}}{(Z_{cl} + Z_{c0} + 4R_f)s} \frac{K_{cl}}{1 + s\tau_{cl}} \frac{s(L_{dc} + L_{eq})}{s(L_{dc} + L_{eq}) + Z_{cl}} \quad (10)$$

根据线路端口回路的 KVL, 列写测量点 M 处限流电抗  $L_{dc1}$  的线模电压:

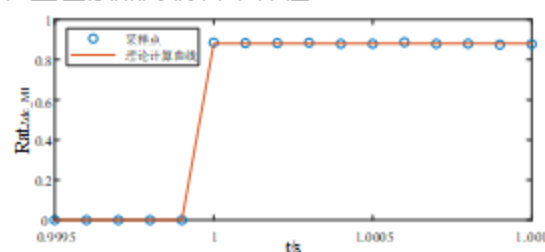
$$U_{Ldc1\_in}(s) = \frac{-2\sqrt{2}U_f Z_{cl}}{(Z_{cl} + Z_{c0} + 4R_f)s} \frac{K_{cl}}{1 + s\tau_{cl}} \frac{sL_{dc}}{s(L_{dc} + L_{eq}) + Z_{cl}} \quad (11)$$

定义  $Rat_{Ldc\_M1}$  为限流电抗电压  $U_{Ldc1}$  与测量点 M 处的电压  $U_{M1}$  之比, 通过拉普拉斯逆变换可得  $Rat_{Ldc\_M1}$  为:

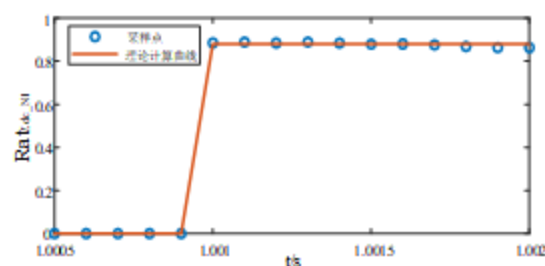
$$Rat_{Ldc1\_M1} = \frac{U_{Ldc1}(t)}{U_{M1}(t)} = \frac{L_{dc}}{L_{dc} + L_{eq}} \quad (12)$$

由式(12)可知: 限流电抗电压与测量点 M 处电压的比值  $Rat_{Ldc\_M1}$  为一常数, 这说明, 故障行波在直流线路传播初期, 两者存在一个比例关系, 在解析表达式中,  $Rat_{Ldc\_M1}$  与过渡电阻  $R_f$  无关, 仅受到边界元件  $L_{dc}$  与 MMC 等效电感  $L_{eq}$  有关, 考虑实际工程,  $L_{eq}$  取 20mH,  $L_{dc}$  取 150mH, 可得出,  $Rat_{Ldc\_M1}$  约等于 0.88。同理, 在测量点 N 处的分析方法与 M 处一致, 因此,  $Rat_{Ldc\_N1}$  也约等于 0.88。

为验证理论分析的正确性, 图 5 以直流线路发生区内正极故障为例, 给出  $Rat_{Ldc\_M1/N1}-t$  关系的理论计算结果与仿真结果。红色实线按式(12)计算得到, 蓝色散点为仿真采样值。



(a)  $Rat_{Ldc\_M1}-t$  平面



(b)  $Rat_{Ldc\_N1}-t$  平面

图 5 区内故障时 M、N 处的  $Rat_{Ldc\_M1/N1}-t$  平面

Fig. 5.  $Rat_{Ldc\_M1/N1}-t$  at M and N during faults within the area

从图 5 可知, 仿真采样点位于理论计算直线附近, 说明以上对  $Rat_{Ldc\_M1/N1}$  关系理论分析较为准确。

## 2 保护原理与基本方案

### 2.1 启动判据

当直流线路发生故障时,极线电压将会发生突变。因此,可利用极线电压变化量 $\Delta U_p$ 、 $\Delta U_n$ 作为保护的启动判据。

### 2.2 区内外故障识别判据

由第2节故障分析可知:发生区内故障时, $Rat_{Idc2\_M1}$ 、 $Rat_{Idc2\_N1}$ 趋于平稳;发生正方向区外故障时, $Rat_{Idc2\_M1}$ 趋于平稳、 $Rat_{Idc2\_N1}$ 呈指数性变化;同理,发生反方向故障时, $Rat_{Idc2\_M1}$ 呈指数性变化、 $Rat_{Idc2\_N1}$ 趋于平稳。因此可以利用区内外故障下 $Rat_{Idc2\_M1}$ 、 $Rat_{Idc2\_N1}$ 波形趋势差异特征构建故障判据。标准差反映一个数据集的离散程度,是一组数据平均值分散程度的一种度量。公式如下:

$$\begin{cases} S_M = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Rat_{Idc1\_M1}(i) - \overline{Rat_{Idc1\_M1}})^2}{N}} \\ S_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Rat_{Idc1\_N1}(i) - \overline{Rat_{Idc1\_N1}})^2}{N}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $\overline{Rat_{Idc1\_M1}}$ 和 $\overline{Rat_{Idc1\_N1}}$ 分别表示 $Rat_{Idc2\_M1}$ 和 $Rat_{Idc2\_N1}$ 的平均值。

区内故障时,由于 $Rat_{Idc1\_M1}$ 、 $Rat_{Idc1\_N1}$ 趋于平稳, $S_M$ 与 $S_N$ 接近于0;正向区外故障时 $Rat_{Idc2\_M1}$ 趋于平稳、 $Rat_{Idc2\_N1}$ 呈指数性变化, $S_M$ 接近于0、 $S_N$ 较大;反向区外故障时 $Rat_{Idc2\_M1}$ 呈指数性变化、 $Rat_{Idc2\_N1}$ 趋于平稳, $S_M$ 较大、 $S_N$ 接近于0,有:

$$\begin{cases} \text{区内故障:} \begin{cases} S_M < K_{set} \\ S_N < K_{set} \end{cases} \\ \text{正向区外故障:} \begin{cases} S_M < K_{set} \\ S_N > K_{set} \end{cases} \\ \text{反向区外故障:} \begin{cases} S_M > K_{set} \\ S_N < K_{set} \end{cases} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $K_{set}$ 为动作阈值,其值根据区内故障时两端测量点可能出现的最大值进行选择,区内故障时,由于 $Rat_{Idc2\_M1}$ 、 $Rat_{Idc2\_N1}$ 趋于平稳,理论上 $S_{M/N\_in/ex}$ 接近于0,经多次仿真测试表明 $S_{M/N\_in/ex}$ 介于0~0.2之间,为避免测量误差并考虑一定的裕度。本文选取动作阈值 $K_{set}=0.5$ 。

### 2.3 选极判据

由式(1)可知,发生双极故障时,零模电压为0;发生正极故障时,地模电压为负;反之,线路发生负极接地故障时,故地模电压为正。因此选地模电压之和进行故障选极。

## 3 仿真验证

为验证本文所提保护方案的适应性,在PSCAD/EMTDC中搭建了 $\pm 500\text{kV}$ 真双极柔性直流电网,拓扑如图1所示,仿真模型中,系统参数如表1所示。直流输电线路采用频变参数模型。考虑到保护的速动性要求,取故障发生后的0.5ms作为保护时间窗。采样频率选取10kHz。

表1 模型参数  
Table 1 model parameter

| 参数           | 数值      |
|--------------|---------|
| MMC 额定容量/MVA | 800     |
| 交流系统电压/kV    | 380     |
| 联结变压器额定电压/kV | 380/220 |
| 桥臂子模块数       | 200     |
| 桥臂电抗值/mH     | 20      |
| 子模块电容值/mF    | 18      |
| 线路长度/km      | 300     |

为全面分析保护方案的正确性,研究所提方案对故障距离与过渡电阻的适应性,故障电阻设置0~1000 $\Omega$ 、故障位置分别设置在始端、中点、末端。仿真结果如表2所示。

表2 保护识别结果

Table 2. Protection discrimination results.

| 故障类型           | 故障点位置  | 过渡电阻/ $\Omega$ | $S_M$ | $S_N$ | 判别结果 |
|----------------|--------|----------------|-------|-------|------|
| $f_1$ 区内正极接地故障 | 首端     | 0              | 0.004 | 0.003 | 区内故障 |
|                |        | 500            | 0.005 | 0.007 | 区内故障 |
|                |        | 1000           | 0.019 | 0.021 | 区内故障 |
|                | 中点     | 0              | 0.004 | 0.005 | 区内故障 |
|                |        | 500            | 0.009 | 0.008 | 区内故障 |
|                |        | 1000           | 0.016 | 0.012 | 区内故障 |
|                | 末端     | 0              | 0.002 | 0.002 | 区内故障 |
|                |        | 500            | 0.014 | 0.016 | 区内故障 |
|                |        | 1000           | 0.021 | 0.017 | 区内故障 |
| $f_1$ 区内极间故障   | 首端     | 0              | 0.001 | 0.002 | 区内故障 |
|                |        | 10             | 0.001 | 0.003 | 区内故障 |
|                |        | 50             | 0.002 | 0.003 | 区内故障 |
|                | 中点     | 0              | 0.002 | 0.002 | 区内故障 |
|                |        | 10             | 0.002 | 0.003 | 区内故障 |
|                |        | 50             | 0.001 | 0.003 | 区内故障 |
|                | 末端     | 0              | 0.001 | 0.001 | 区内故障 |
|                |        | 10             | 0.020 | 0.001 | 区内故障 |
|                |        | 50             | 0.002 | 0.001 | 区内故障 |
| $f_2$ 发生区外故障   | 逆变站出口处 | 0              | 0.003 | 2.374 | 区外故障 |
| $f_3$ 发生区外故障   | 整流站出口处 | 0              | 2.380 | 0.004 | 区外故障 |

从表2中可知,对于区内故障下的不同故障距离、不同过渡电阻,线路两侧测量点的 $S_M$ 与 $S_N$ 均小于整定值,保护均能可靠动作;对于在逆变站出口处区外故障, $S_M$ 小于整定值、 $S_N$ 大于整定值;对



于在整流站出口处区外故障,  $S_M$  大于整定值、 $S_N$  小于整定值。因此, 所提保护方案基本不受过渡电阻以及故障距离的影响。同时针对线路全长的保护区域做仿真处理, 区内故障以  $1000\Omega$  为例, 区外故障以金属性接地故障为例, 仿真结果如图 6 所示。

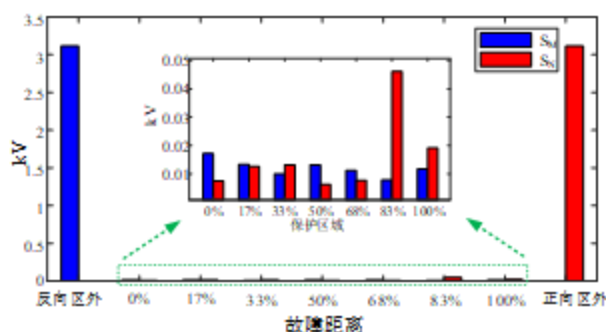


图 6 区内、外故障仿真结果

Fig. 6 Internal and external fault simulation results

从图 6 观察可知, 区内、外故障下的  $S_M$  与  $S_N$  有明显差异, 即便在区内高阻接地故障下, 所提保护方案仍能保护线路全长。

### 3 结论

本文提出一种新型的基于暂态电压波形特征的直流输电线路纵联保护方案:

(1) 通过对直流线路故障后限流电抗与测点电压之比的详细分析, 提出利用标准差系数来衡量正反方向故障下限流电抗与测点电压之比的波形变化趋势。原理简单, 理论上不受过渡电阻的影响, 不存在保护死区。

(2) 通过大量测试, 验证了所提保护方案的有效性。在所有故障类型下均可准确识别故障类型, 具备高达  $1000\Omega$  的耐受过渡电阻能力, 对保护装置的采样频率要求较低, 仅需  $10\text{kHz}$  即可识别区内外故障。

(3) 保护的计算仅基于本地信息, 仅需通过光纤交换故障方向即可识别故障类型, 且所提保护方案不需要数据同步系统。

### 参考文献

- [1] Westerman Spier D, Prieto-Araujo E, Lopez-Mestre J, et al. Optimal current reference calculation for MMCs considering converter limitations [J]. IEEE Trans Power Del, 2021, 36(4): 2097-2108.
- [2] D. Mu, S. Lin, P. He and X. Li, An Improved Method of Traveling Wave Protection for DC Lines Based on the Compensation of Line-Mode Fault Voltage [J]. IEEE Trans Power Del, 2023, 38(3): 1720-1730.
- [3] M. Li, K. Chen, J. He, Y. Tang and J. Tang, Impedance Phase Based Active Injection Protection for Radial VSC-HVDC Grid [J]. IEEE Trans Power Del, 2023, 38(3): 1621-1635.
- [4] D. Zhang, C. Wu, P. Ni and J. He, Double-ended fast protection system

of LCC-VSC-MTDC independent on boundary component [J]. CSEE J Power Energy Syst, 2022.

- [5] X. Chen, H. Li, G. Wang, C. Xu and Y. Liang, A Convolution Power-Based Protection Scheme for Hybrid Multiterminal HVDC Transmission Systems [J]. IEEE J Emerg Select Top Power Electron, 2021, 9(2): 1655-1667.
- [6] F. Kong, Z. Hao, and B. Zhang, Improved differential current protection scheme for CSC-HVDC transmission lines [J]. IET Generation, Transmission, Distribution, 2017, 11(4): 978-986.
- [7] H. J. Liu, B. Li, W. J. Wen, T. C. Green, J. H. Zhang, N. Zhang, L. L. Chen, Ultra-fast current differential protection with high-sensitivity for HVDC transmission lines [J]. Int J Electr Power Energy Syst, 2021, 126: 106580.
- [8] Q. Huang, G. Zou, S. Zhang, and H. Gao, A pilot protection scheme of dc lines for multi-terminal hvdc grid [J]. IEEE Trans Power Del, 2019, 34(5): 1957-1966.
- [9] Y. L. Li, Y. K. Zhang, J. Z. Song, L. Zeng, J. Q. Zhang, A novel pilot protection scheme for LCC-HVDC transmission lines based on smoothing-reactor voltage [J]. Electr Power Syst Res, 2019, 168: 261-268.
- [10] S. Li, W. Chen, X. Yin, D. Chen, and Y. Teng, A novel integrated protection for vsc-hvdc transmission line based on current limiting reactor power [J]. IEEE Trans. Power Del, 2020, 35(1): 226-233.
- [11] Jiawei He, Zhongrun Xie, Bin Li, et al. A novel directional pilot protection independent of line parameters and boundary elements for MMC-HVDC grid, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume [J]. 2023, 150, 109094: 0142-0615.
- [12] Dong Wang, Donghai Cheng, Xiao Sun, et al, Novel travelling wave directional pilot protection approach for LCC-MMC-MTDC overhead transmission line [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume, 2023, 144: 08553.
- [13] Dong Wang, Mengqian Hou, Mengyou Gao, et al, Travelling wave directional pilot protection for hybrid HVDC transmission line [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019, 107: 615-627.

收稿日期: 2023-07-04.

作者简介:



王智杰

王智杰(1998), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: [z108162@163.com](mailto:z108162@163.com)

刘梅南(2002), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制, E-mail: [13282217882@163.com](mailto:13282217882@163.com)

李海峰(1976), 通讯作者, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护等, E-mail: [lihf@scut.edu.cn](mailto:lihf@scut.edu.cn)

(编辑 五号楷体, 居右, 段前空 6pt)



文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于改进行波特征频率法的配电网故障测距

尹柏承, 王晨光, 杨贺丞, 胡悒航

(1. 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150086)

## Fault Location in distribution network based on the improved characteristic frequencies of traveling wave

YIN Baicheng, WANG Chenguang, YANG Hecheng, HU Yihang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang Province, China)

**ABSTRACT:** To alleviate the problem that the traditional traveling wave method based on characteristic frequencies is only applicable to power system with a single structure, an improved algorithm for characteristic frequencies of traveling wave is proposed in this paper. Firstly, this paper establishes the faulty additional state of multi-branch network and gets the fault location equation. Further, reasonable simplification of complex distribution network can be achieved by equivalent different section lines. Finally, taking the simulation result of a T-shaped system as an example, the proposed method has been verified to have high accuracy.

**KEY WORDS:** Improved characteristic frequencies method; Distribution network; Multi branches; Fault location

**摘要:** 针对传统行波特征频率法仅适用于单一电力网络的问题, 本文提出行波特征频率的改进算法。首先建立带分支线路的故障网络模型, 推导带分支网络的测距方程。进一步, 通过将不同区段线路等效, 实现对配电网合理简化。最后, 以一个 T 型网络模拟配电网故障为例, 验证了本文所提改进方法具有较高精度。

**关键词:** 改进特征频率法; 配电网; 多分支; 故障测距

**DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号(小五号 Times New Roman 字体加黑)**

## 0 引言

电网作为高效快捷的能源输送通道, 其在现代能源供应体系中发挥着重要的枢纽作用。自 2010 年以来, 中国电网规模增长近一倍, 110kV 及以上输电线路长度更是达到 114.2 万千米。随着电网快速发展, 以配电网为代表的多分支电网不断增加[1], 其复杂的拓扑结构不仅增加了故障定位的难

分析信号的类型, 可将配电网故障测距方法分为稳态信号分析方法和暂态信号分析方法。阻抗法<sup>[2]</sup>是配电网使用稳态信号测距的代表方法, 其主要通过分析测量的稳态电压、电流和线路阻抗矩阵形成测距方程。该方法虽然原理简单, 但在多分支配电网中可能会计算出多个疑似故障点降低测距精度。

区别于稳态信号分析方法, 暂态信号分析方法主要通过分析故障后的暂态电压或电流实现故障测距。行波法<sup>[6-12]</sup>作为配电网使用暂态信号测距的代表方法, 其主要通过辨别故障行波波头实现测距。文献[6]首先提出对故障行波使用小波变换, 并在无分支线路中验证了小波变换测距的准确性。文献[7]利用线模和零模行波之间的波速差, 实现了单分支点网络结构的非对称故障测距。文献[8]提出不需要数据同步和线路参数的双端行波测距方法, 并在一条无分支线路中验证了方法的有效性。

综上文献分析, 基于辨别行波波头的方法应用于配电网中存在测量装置数量较多、测量方法适用线路结构简单和测量方法复杂度较高的缺点。为解决上述问题, 文献[9]研究了故障行波频率与故障距离之间关系, 并推导了无分支且系数固定的测距方程。文献[10]提出使用故障信号构建小波基函数, 该方法提高了小波变换辨别特征频率的能力。文献[12]推导了无分支线路中行波特征频率与线路长度、系统边界条件三者数学关系, 并验证了推导方程的有效性。

通过总结目前特征频率法的研究现状, 该方法仅讨论线路结构单一的无分支线路情况, 对配电网的测距方法缺少理论分析。为克服现有特征频率测距方法存在的问题, 本文提出适用于复杂配电网的改进特征行波频率法。首先简要介绍行波基本理论, 在此基础上给出带分支网络测距方程的推导过程。最后, 以 T 型网络模拟配电网故障为例, 验证

基金项目: 六号宋体, 中英文对照。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(51037003).

度, 还造成传统测距方法的适用性降低。根据使用

了本文所提方法的有效性。

## 1 带分支线路测距理论

### 1.1 行波基本理论

当图 1 (a) 线路某点 F 发生故障时, 在故障点将产生向线路两端行进的故障行波。为提取 m 端包含的故障行波信息可用叠加原理将图 1 (a) 代表的故障状态分解为图 1 (b) 非故障状态和图 1 (c) 故障附加状态。

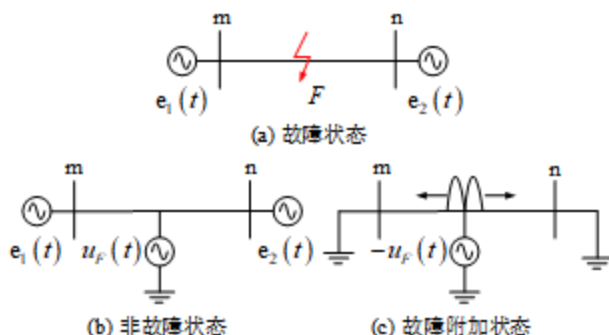


图 1 故障行波传播模型的分解

假设  $u_m(t)$ 、 $u_{mn}(t)$  和  $u_{mf}(t)$  分别代表在故障状态、正常状态和故障附加状态下线路 m 端测得的电压, 其中,  $u_{mf}(t)$  称为故障分量且故障行波仅包含在故障分量中。

假设线路末端电压、电流分别为  $U_N(s)$ 、 $I_N(s)$ ; 线路首端到末端距离为  $l$ 。结合传输线电报方程易得线路任一点电压、电流用线路首末端电压、电流表达的矩阵方程如下:

$$\begin{bmatrix} U(x,s) \\ I(x,s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch[\gamma(l-x)] & Z_c sh[\gamma(l-x)] \\ \frac{1}{Z_c} sh[\gamma(l-x)] & ch[\gamma(l-x)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_N(s) \\ I_N(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $Z(s) = R + sL$  和  $Y(s) = G + sC$  分别为线路单位长度阻抗和导纳;  $\gamma = \sqrt{Z(s)Y(s)}$  为线路传播常数;  $Z_c = \sqrt{Z(s)/Y(s)}$  为线路波阻抗。

实际输电线路往往三相运行且互相耦合, 这代表(1)中的  $Z(s)$  和  $Y(s)$  为非对角矩阵。工程上, 常使用相模变换矩阵将三相耦合线路解耦为三相互相独立的模分量。

### 1.2 改进的行波特征频率故障测距方程

假设有系统故障状态如图 2 (a) 所示。其中,  $l_1$  为 BUS I 和 BUS II 之间区段距离;  $l_2$  为 BUS II 与故障点之间距离; OP 为测量位置。

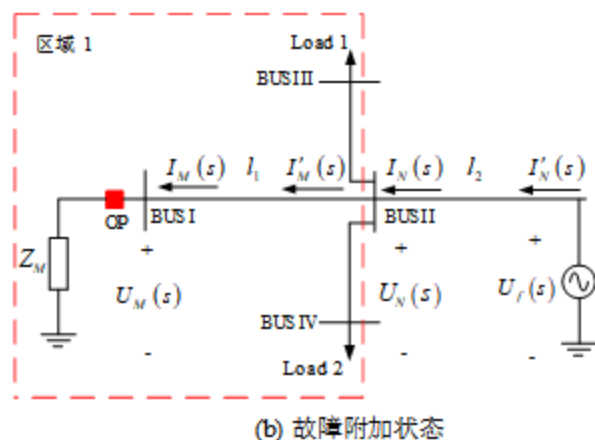
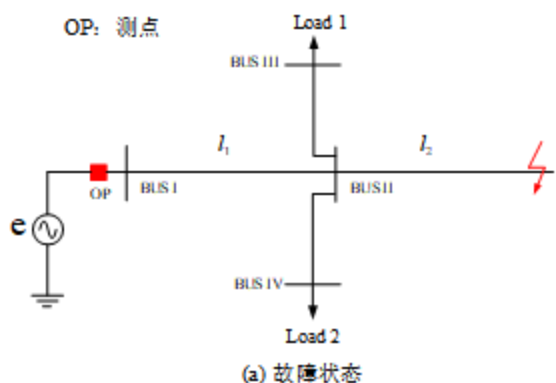


图 2 带分支线路简图

图中,  $Z_M$  为系统电源 e 等值阻抗;  $U_M(s)$ 、 $I_M(s)$  为  $l_1$  区段首端电压和电流;  $I'_M(s)$  为  $l_1$  区段末端电流;  $U_N(s)$ 、 $I_N(s)$  为  $l_2$  区段首端电压和电流;  $I'_N(s)$  为  $l_2$  区段末端电流;  $U_f(s)$  在数值上等于故障前正常运行电压, 但方向相反。

在  $l_1$  和  $l_2$  区段可分别得到各区段首末端电压关系式如下:

$$\begin{cases} U_N(s) = ch(\gamma l_1) U_M(s) + Z_c sh(\gamma l_1) I_M(s) \\ U_N(s) = ch(\gamma l_2) U_f(s) - Z_c sh(\gamma l_2) I'_N(s) \end{cases} \quad (2)$$

为得到测点电压  $U_M(s)$  和故障点电压  $U_f(s)$  关系, 假设  $Z_N$  代表图 2 (b) 中区域一系统的等值阻抗。

当已知故障前正常运行电压时域表达式为  $U_{f0} \sin(\omega_0 t + \varphi)$ , 结合公式(2)和  $Z_N$  可得到测点电压  $U_M(s)$  和故障点电压  $U_f(s)$  关系式如下:

$$U_M(s) = \frac{-ch(\gamma l_2) U_{f0} (\omega_0 \cos \varphi + s \sin \varphi)}{(s^2 + \omega_0^2) \left[ ch(\gamma l_1) + \frac{Z_c}{Z_M} sh(\gamma l_1) \right] \left[ 1 + sh^2(\gamma l_2) + \frac{Z_c}{Z_N} sh(\gamma l_2) ch(\gamma l_2) \right]} \quad (3)$$

理论上对公式(3)进行拉氏反变换便可得到测点电压  $u_M(t)$  的时域表达式, 但公式过于复杂导致拉氏反变换过程困难。故本文提出通过求解  $U_M(s)$  表达式极点的方法进而得到故障位置与谐波频率的关系。

因  $[1 + sh^2(\gamma l_2) + (Z_C/Z_N)sh(\gamma l_2)ch(\gamma l_2)]$  包含分支点与故障点距离  $l_2$  参数, 故可将其特征公式化简如下:

$$1 + \frac{Z_N - Z_C}{Z_N + Z_C} e^{-2\gamma l_2} = 0 \quad (4)$$

假设  $t_2$  为故障行波从故障点到达分支点所需时间, 则当故障发生在  $l_2$  区段时, 可将(4)变换为如下形式:

$$\begin{cases} e^{2\gamma l_2} = e^{\ln \Gamma + j(\theta + \pi + 2k\pi)} \\ \Gamma = \frac{Z_N - Z_C}{Z_N + Z_C} = |\Gamma| \angle \theta, \theta \in (-\pi, \pi] \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\Gamma$  为故障电压行波在线路分支点的反射系数,  $\theta$  为其反射角。

假设行波波速为  $v$  和实测故障点与分支点之间距离为  $l'$ , 则有  $t_2 = l'/v$ 。将该表达式代入式(5), 可得到带分支线路在  $l_2$  区段故障时测距方程如下:

$$\begin{cases} e^{2\gamma l'} = e^{\ln \Gamma + j(\theta + \pi + 2k\pi)}, \theta \in (-\pi, \pi] \\ s = \sigma + j\omega \\ t_2 = \frac{l'}{v} \end{cases} \quad (6)$$

进一步, 可求解得测距结果如下所示:

$$l' = \frac{(\theta + \pi + 2k\pi)v}{4\pi f}, k = 0, \pm 1, \dots \quad (7)$$

式中: 当  $f$  为特征频率主成分 (谐波频率最大值) 时,  $k$  取令  $(\theta + \pi + 2k\pi)$  为非零实数的最小值。

## 2 改进的特征频率测距方法

### 2.1 输电线路等值阻抗计算

计算输电线路等值阻抗前需计算其序阻抗和序导纳, 然后再进行分布参数模型和集中参数模型之间的转换。本文使用  $\pi$  型等值线路作为配电网输电线路的集中参数模型, 如图 3 所示。

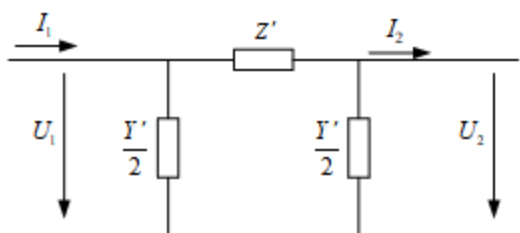


图 3  $\pi$  型等效模型

假设等效的输电线路长度为  $l$ , 对比  $\pi$  型等效模型的二端口方程和式(1)可得:

$$\begin{cases} Z' = Zl \frac{sh(\gamma l)}{\gamma l} \\ Y' = Yl \frac{2[ch(\gamma l) - 1]}{\gamma sh(\gamma l)l} \end{cases} \quad (8)$$

根据上式, 当输电线路集中参数模型能够与分布参数模型等效时, 阻抗修正系数  $sh(\gamma l)/(\gamma l)$  和导纳修正系数  $2[ch(\gamma l) - 1]/[\gamma sh(\gamma l)l]$  应接近于 1。

### 2.2 测距步骤

图 4 为针对本文所提出方法的在三相短路时的测距流程, 具体可分为以下几步: (1) 计算故障附加状态下的电压线模分量; (2) 辨别特征频率主成分; (3) 构建对应序网络, 计算等值阻抗; (4) 故障测距。

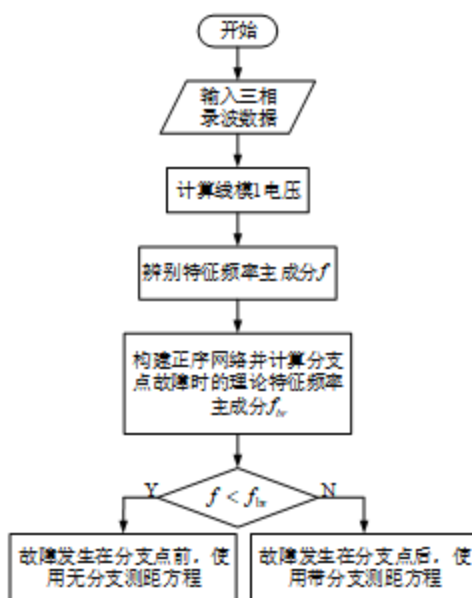


图 4 测距流程图

## 3 算例计算及结果分析

### 3.1 T 型网络

本章节以一个 T 型网络模拟配电网故障, 各架空线路参数均一致。

测点: BUS 10

故障位置

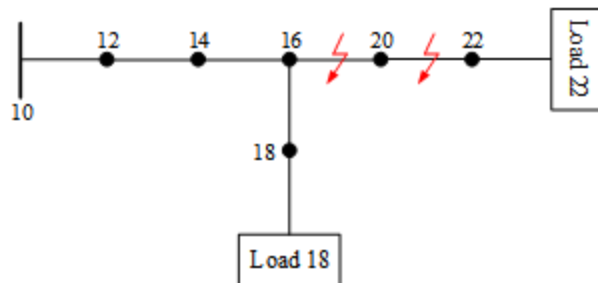


图 5 T 型网络

图 5 将在 T 型网络的 BUS 16-20 设置三相短路

故障，故障方案表如下所示。

表 1 故障方案设计

| 故障区域 | 故障位置   | 三相短路故障  |
|------|--------|---------|
|      |        | 测距方法    |
| 节点后  | 16-22  | 本文方法    |
|      | 间隔 1km | 无分支测距方程 |

### 3.2 故障测距结果分析

针对区域一内的三相短路故障问题，将对比分析无分支测距方程和本文所提方法，其中，BUS 16-22 故障时的实际辨别频率和理论的计算频率如下所示：

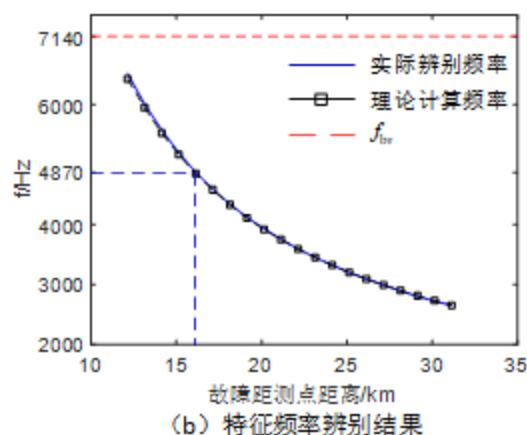
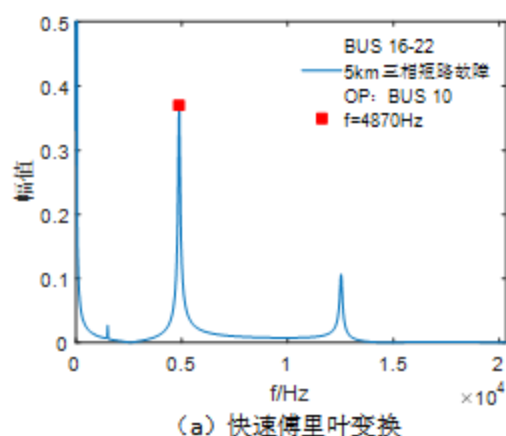


图 6 区域一发生三相短路故障的特征频率主成分

图 6 (a) 为距离 BUS 16 分支点 5km 发生三相短路故障时辨别得到的特征频率主成分。以上述过程为例，可辨别得到各故障位置的特征频率主成分结果如图 6 (b) 所示且可判断出故障位置均在分支点之后。

参照图 4 测距流程图，将辨别得到的特征频率主成分分别代入各测距方程中，可得到测距结果如下所示。

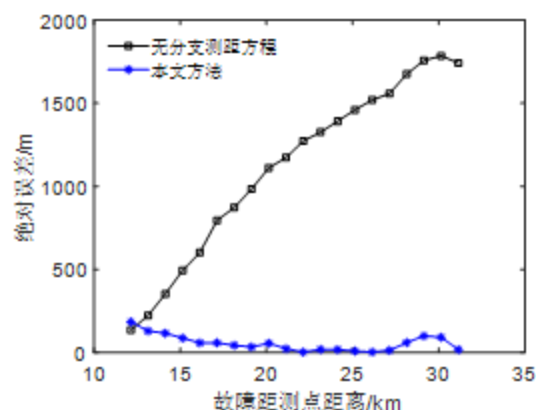


图 7 不同方法测距误差

图 7 说明无分支测距方程误差随着故障距离测点的距离增大而增大且测距误差均大于带分支测距方程。

## 4 结论

针对传统行波特征频率测距方法在复杂网络中测距误差大问题，本文通过分析带分支线路中故障行波频率与故障位置之间的关系，提出基于改进行波特征频率法的测距方法，具体结论如下：

(1) 本文建立了带分支线路故障附加网络模型，推导了带分支测距方程。通过对线路元件等效，实现对复杂配电网系统的合理简化。

(2) 针对电力线路的故障，应用本文方法对配电网的三相短路故障进行测距，结果表明，所提方法对三相短路故障具有极高的测距精度，平均测距绝对误差为 54.82m。

(3) 由于考虑了线路分支的影响，本文提出方法相较于现有特征频率测距方法在分支点外的故障测距精度更高。

## 参考文献

- [1] Stefanidou-Voziki P, Sapountzoglou N, Raison B, et al. A review of fault location and classification methods in distribution grids[J]. Electric Power Systems Research, 2022.
- [2] Filomena A D, Resener M, Salim R H, et al. Distribution systems fault analysis considering fault resistance estimation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011.
- [3] Tavvoosi J, Shirkhani M, Azizi A, et al. A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique[J]. Electric Power Systems Research, 2022.
- [4] Dashti R, Daisy M, Shaker H R, et al. Impedance-Based Fault Location Method for Four-Wire Power Distribution Networks[J]. IEEE Access, 2018.
- [5] Alwashi S F, Ramachandaramurthy V K, Mithulanathan N. Fault-Location Scheme for Power Distribution System with Distributed Generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,

2015.

- [6] Magnago F H, Abur A. Fault location using wavelets[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998.
- [7] Liang R, Fu G Q, Zhu X Y. Fault location based on single terminal travelling wave analysis in radial distribution network[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2015.
- [8] Lopes F V, Dantas K M, Silva K M, et al. Accurate Two-Terminal Transmission Line Fault Location Using Traveling Waves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018.
- [9] Swift G W. The Spectral of Fault-Induced Transients[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979.
- [10] Borghetti A, Bosetti M, Di Silvestro M. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: Definition of mother wavelets inferred from fault originated transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008.
- [11] Borghetti A, Bosetti M, Nucci C A, et al. Integrated Use of Time-Frequency Wavelet Decompositions for Fault Location in Distribution Networks: Theory and Experimental Validation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010.
- [12] 邹林勇, 何正友, 钱清泉. 单端行波故障测距的频域方法[J]. 中国电机工程学报, 2008.



尹柏承

收稿日期:

作者简介:

尹柏承(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障测距, E-mail: yinbc113@163.com;

王晨光(1984), 男, 副教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统的智能化评估技术等, E-mail: wang\_chenguang@126.com.

(编辑 五号楷体, 居右, 段前空 6pt)

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 基于漏感电动势法的交流电机定子换位线棒故障数据集的计算方法

杨贺丞, 王晨光, 尹柏承, 胡怿航

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

## A Calculation Method for the Fault Dataset of Stator Transposition Bars in AC Motors Based on the Leakage Susceptible Electromotive Potential Method

Hecheng Yang, Chenguang Wang, Baicheng Yin, Yihang hu

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang)

**ABSTRACT:** Transposition bars are critical components in large motors. Insulation failures in transposition bars can pose significant risks to the safe operation of the motor. This paper presents a method for calculating a fault dataset for transposition bars, enabling the calculation of strand currents under all short-circuit fault scenarios for the transposition bars. First, the improved leakage susceptible electromotive potential method is used to calculate the leakage susceptible electromotive force of the strands in both the slot and end regions. Then, the short-circuit scenarios for multiple strands are iteratively calculated based on the short-circuit scenario of two strands. Finally, the strand currents for all fault scenarios are calculated using the leakage susceptible electromotive potential method.

**KEY WORDS:** leakage susceptible electromotive potential method, fault dataset, stator bar, short circuit-fault

**摘要:** 换位线棒是大型电机中的重要部件, 线棒的绝缘故障会对电机的安全运行造成极大的危害。本文提出了一种换位线棒故障数据集的计算方法, 实现对换位线棒全部短路故障方案下股线电流的计算。首先, 通过改进的漏感电动势法计算股线槽部和端部的漏感电动势; 然后, 基于两根股线的短路方案迭代计算多根股线的短路方案; 最后, 基于漏感电动势法计算全部故障方案下的股线电流。

**关键词:** 漏感电动势法; 故障数据集; 换位线棒; 短路故障

## 0 引言

交流电机在运行过程中, 定子线棒绝缘会受到电、磁、热和机械振动的综合影响, 从而导致老化加剧, 极易发生绝缘故障。股线间的绝缘仅为0.1-0.2mm<sup>[1]</sup>, 其破损后造成的股线间短路故障属于定子绕组的初期故障, 其故障特征规律尚不明确。

针对故障情况下股线电流的计算问题, 主要采用数值或解析法计算。数值法可以进行较为精确的电磁计算, 但这种方法仍存在计算速度慢、建模复杂和剖分困难等问题; 而解析法能够快速建模, 适用于大规模的仿真计算场合。文献[2]采用场-路-网耦合方法建立了二维瞬态电磁场数学模型, 计算出了股线短路电流; 文献[3]对300mm空换位线棒中多根股线发生短路时的电流进行了计算与分析, 得到了最大环流损耗对应的短路情况。

针对定子绕组的短路故障问题, 近年来, 学者们对定子绕组的短路特征和规律进行了多方面的研究。文献[4]研究了在同一换位截距处发生短路故障时, 其故障股线占比不同时端部磁密相位的变化规律, 当占比超过14.29%时端部磁密相位才有明显变化; 文献[5]对不同定子匝间短路位置下转子铁心的温升变化规律进行了分析, 转子铁心温度与短路位置和气隙最小处之间的距离成反比; 文献[6]搭建场路耦合模型分析了定子绕组匝间短路程度对绕组电磁力的影响, 短路程度越高, 绕组电磁力幅值跃变越大。在股间短路的故障特征规律方面, 文献[7]研究了两种不同的故障股线换位路径对股线电流的影响, 故障股线换位路径越接近股线电流跃变越小; 文献[8]在换位线棒的三个换位截距处分别计算了三种股间故障情况, 在线棒中段的故障特征最为明显。综上, 关于定子绕组的股间故障的研究仅在特定位置处分析了股间故障特征, 对定子线棒的股间短路故障规律掌握的尚不全面。

本文针对换位线棒的股间故障情况, 提出了一种定子换位线棒故障数据集的计算方法。首先, 将每个股线支路看成由股线电阻、槽部和端部漏感电



动势组成,给出了股线电流的计算方法。然后,以一台水轮真机的换位线棒为例,在单截面上以两根股线短路为基础迭代计算出多根股线间的短路故障方案。最后,基于漏感电动势法计算了全部短路故障方案下的股线电流。

## 1 换位线棒股间短路故障模型

对水轮真机的换位线棒进行  $308.57^\circ$  不足换位设计,单根换位线棒基本参数如表 1 所示。三维模型如图 1 所示。以 B 端截面为起始面, D 端截面为终止面,用 U 型顺序对股线从 1-28 进行编号,股线之间以顺时针方向换位。

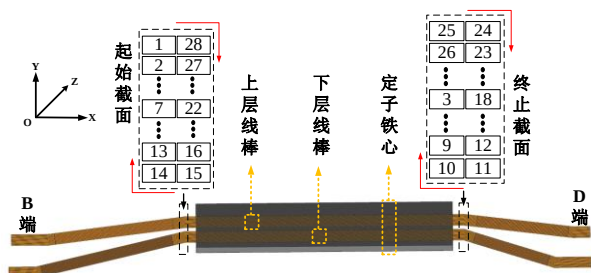


图 1  $308.57^\circ$  不足换位三维模型图

表 1 单根换位线棒的三种换位设计基本参数

| 参数           | 数据   | 参数                  | 数据               |
|--------------|------|---------------------|------------------|
| 额定电流/A       | 1000 | 换位截距/mm             | 36               |
| 相位/ $^\circ$ | 90   | 槽高/mm               | 110              |
| 频率/Hz        | 50   | 铁心长度/mm             | 864              |
| 线棒股线数        | 28   | 股线规格/mm $\times$ mm | 5.3 $\times$ 2.5 |

当股线间发生短路故障时,以股线 8 和 23 在 15 换位截距处发生跨排短路故障为例,槽部短路点位置及股线换位路径如图 2 所示。以短路点为分界点,从 B 端到短路点之间的槽部区间命名为 Q1,从短路点到 D 端之间的槽部区间命名为 Q2。

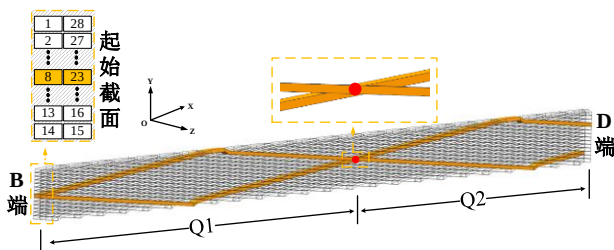


图 2 槽部短路点位置及股线换位路径

假设上层股线编号为  $i_1, i_2, \dots, i_N$ , 下层股线编号为  $j_1, j_2, \dots, j_N$ , 其中上层股线中编号为  $f_1, f_2, \dots, f_{m-1}, f_m$  共  $m$  条股线发生短路故障,股线故障时环流计算的等效电路如图 3 所示。股线之间由于槽部漏磁场的不同产生槽部漏感电势,以股线  $i_1$

为例, B 端和 D 端端部产生的漏感电势用  $\dot{E}_{e(i_1)}$  和  $\dot{E}_{e(i_{1+N})}$  来表示, Q1 和 Q2 区间槽部产生的漏感电势用  $\dot{E}_{s(i_1)}$  和  $\dot{E}_{s(i_{1+N})}$  来表示, B 端端部和 Q1 区间槽部的电阻用  $R_{Q1}$  来表示, D 端端部和 Q2 区间槽部的电阻用  $R_{Q2}$  来表示,整根股线的电阻用  $R_Q$  来表示,  $R_Q = R_{Q1} + R_{Q2}$ 。Q1 区间的股线电流为  $\dot{I}_{(i_1)}, \dots, \dot{I}_{(i_N)}$ , Q2 区间的股线电流为  $\dot{I}_{(i_{1+N})}, \dots, \dot{I}_{(i_{1+N+N})}$ , 下层线棒股线电流为  $\dot{I}_{(j_1)}, \dots, \dot{I}_{(j_N)}$ 。

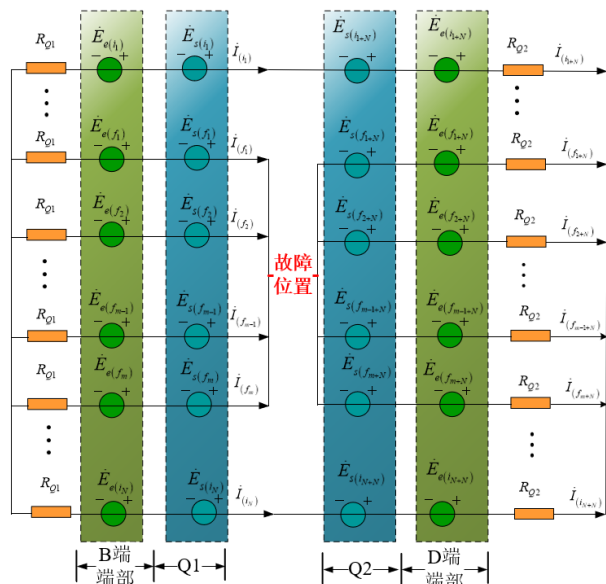


图 3 上层股线故障时环流计算的等效电路

假设环流存在于上层线棒的股线  $i$  和股线  $i+1$  之间以及下层线棒的股线  $j$  和股线  $j+1$  之间,则根据闭合回路电压代数和为零的条件即可建立相邻两根股线之间的矩阵,表达式为(1),上下层股线电流满足表达式(2)。

$$\begin{bmatrix} R_{Q1} & R_{Q2} & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_{i+N} \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{E}_{s(i)} \\ \dot{E}_{s(i+N)} \\ \dot{E}_{s(j)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{E}_{e(i)} \\ \dot{E}_{e(i+N)} \\ \dot{E}_{e(j)} \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $\dot{I}_i$  为上层股线总电流;  $\dot{I}_j$  为下层股线总电流。

上述矩阵的详细表达形式如表达式(3)-(5)所示。

$$\dot{\mathbf{I}}_i = \begin{bmatrix} \dot{I}_{(i_1)} \\ \dot{I}_{(i_2)} \\ \vdots \\ \dot{I}_{(i_N)} \end{bmatrix} \quad \dot{\mathbf{I}}_{i+N} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{(i_{1+N})} \\ \dot{I}_{(i_{2+N})} \\ \vdots \\ \dot{I}_{(i_{1+N+N})} \end{bmatrix} \quad \dot{\mathbf{I}}_j = \begin{bmatrix} \dot{I}_{(j_1)} \\ \dot{I}_{(j_2)} \\ \vdots \\ \dot{I}_{(j_N)} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_\alpha = \begin{bmatrix} R_\alpha & -R_\alpha & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & R_\alpha & \cdots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & -R_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & R_\alpha & -R_\alpha \end{bmatrix}_{(N-1) \times N} \quad (4)$$

$$\alpha = [Q1, Q2, Q]$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{s(\beta)} = \begin{bmatrix} (\dot{E}_{s(\beta_1)} - \dot{E}_{s(\beta_2)}) + (\dot{E}_{s(\beta_{1+N})} - \dot{E}_{s(\beta_{2+N})}) \\ (\dot{E}_{s(\beta_2)} - \dot{E}_{s(\beta_3)}) + (\dot{E}_{s(\beta_{2+N})} - \dot{E}_{s(\beta_{3+N})}) \\ \vdots \\ (\dot{E}_{s(\beta_{N-1})} - \dot{E}_{s(\beta_N)}) + (\dot{E}_{s(\beta_{N-1+N})} - \dot{E}_{s(\beta_{N+N})}) \end{bmatrix}_{(N-1) \times N}$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{e(\beta)} = \begin{bmatrix} (\dot{E}_{e(\beta_1)} - \dot{E}_{e(\beta_2)}) + (\dot{E}_{e(\beta_{1+N})} - \dot{E}_{e(\beta_{2+N})}) \\ (\dot{E}_{e(\beta_2)} - \dot{E}_{e(\beta_3)}) + (\dot{E}_{e(\beta_{2+N})} - \dot{E}_{e(\beta_{3+N})}) \\ \vdots \\ (\dot{E}_{e(\beta_{N-1})} - \dot{E}_{e(\beta_N)}) + (\dot{E}_{e(\beta_{N-1+N})} - \dot{E}_{e(\beta_{N+N})}) \end{bmatrix}_{(N-1) \times N} \quad (5)$$

$$\beta = [i, j]$$

## 2 换位线棒的整截距股间短路计算方法

定子线棒在槽部以特定方式进行换位, 由于股线间短路故障可能发生在换位中的任一位置, 此处仅选择整截距处进行计算。股线的位置变换遵守换位规律, 只需要在起始截面处计算 2 到 N 根股线短路的故障情况, 即可掌握整根的故障情况。在单截面上计算股间短路故障的组合情况时, 直接计算多根股线短路难以将所有故障情况考虑全面, 在 2 根故障的基础上依次迭代计算即可得到全部的故障情况, 迭代计算表达式为:

$$\begin{cases} \exists Rand(m) = \begin{cases} Rand(m) \neq \forall Com(x-1) \\ Pos(Rand(m), \forall Com(x-1)) = 1 \end{cases} \\ Com(x) = Com(x-1) + Rand(m), x \geq 3 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Com(x)$  是  $x$  根股线的故障组合,  $Rand(m)$  是 1 到 28 号之间的随机股线,  $Pos$  是  $N$  根股线的位置关系矩阵,  $Pos(A, B) = 1$  即为股线 A 和 B 相邻。

换位线棒股线故障情况的计算流程图如图 4 所示。计算出换位线棒所有的故障情况后, 使用改进的漏感电势法计算每种故障情况下的端部和槽部漏感电势即可求出股线电流。

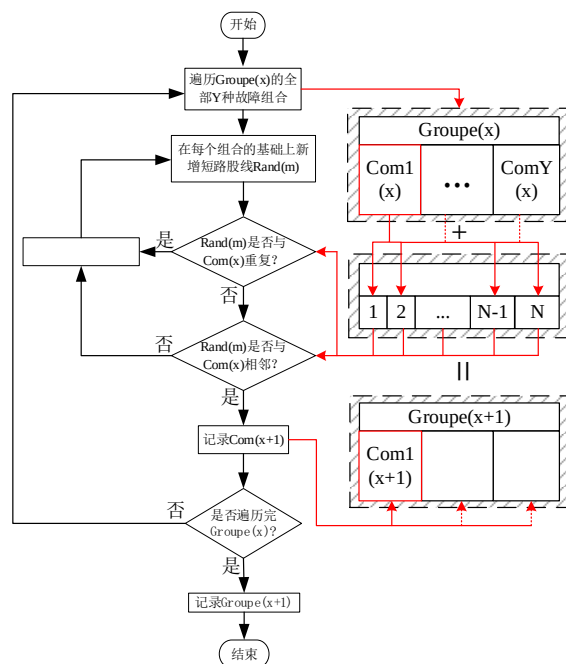


图4 换位线棒故障股线情况的计算流程图

故障时的端部漏感电动势与健康时计算方法一致, 采用镜像法分析端部股线的磁矢位, 进而求出端部漏感电动势<sup>[9]</sup>。根据磁矢位推导出端部第  $j$  根股线在第  $i$  根股线上的产生感应电势  $\dot{E}_{ij}$  表达式为:

$$\dot{E}_{ij} = -j\sqrt{2\pi f} \dot{I}_j \left[ \int_{ab} \left( \int_{gh} \frac{dl_j}{2L} + \int_{th} \frac{dl_j}{2L} + \int_{hk} \frac{dl_j}{L} \right) \cdot dl_i \right] \quad (7)$$

式中:  $f$  为频率;  $dl_i$  为股线  $i$  上的微元;  $dl_j$  为股线  $j$  上的微元;  $L$  为微元  $dl_i$  和  $dl_j$  之间的距离。

计算故障时的槽部漏感电动势, 需要计算出槽漏磁通穿过的面积, 槽部换位路线及短路故障示意图如图 5 所示。当下层线棒中股线  $i$  与  $j$  发生短路故障, 槽漏磁通共同穿过的面积为  $(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)$

和  $(H_1 + H_2 + H_3 + H_4)$ 。故障时的计算需要从故障点将槽部分为两部分 Q1 和 Q2, 槽漏磁通在槽部 Q1 区间共同穿过的面积为  $(S_1 + S_3 + H_1 + H_3)$ , 在槽部 Q2 区间共同穿过的面积为  $(S_2 + S_4 + H_2 + H_4)$ 。计算出共同面积后, 通过式(8)即可求出股线  $i$  与  $j$  之间的槽部互感电动势  $\dot{E}_{ij}$ 。

$$\dot{E}_{sij} = -j \frac{2\pi f \mu_0}{b_s} S_{ij} \dot{I}_j \quad (8)$$

式中:  $f$  为频率;  $\mu_0$  为空气的磁导率;  $b_s$  为定子槽宽;  $S_{ij}$  为槽漏磁通穿过的面积。

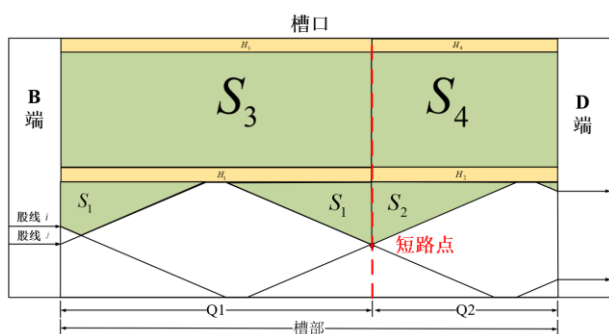


图5 槽部股线*i*与*j*换位路线及短路故障示意图

计算出股线间的端部和槽部漏感电势后,进一步计算股线电流。将式(1)和(2)联立即可求出健康时的股线电流。上层股线发生短路故障后,故障股线间通过短路点形成了新的电流回路,对槽部 Q2 区间内故障股线  $f_1, f_2, \dots, f_m$  间的新回路建立方程,将式(9)与(1)和(2)联立,即可求解出故障时的股线电流。

$$\begin{aligned} [\mathbf{H}] [R_{Q2} \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{Fm}} - \dot{\mathbf{E}}_{s(f)} - \dot{\mathbf{E}}_{e(f)}] &= \mathbf{0} \\ [1 \quad -1] \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{F}} \\ \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{Fm}} \end{bmatrix} &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{F}}$  和  $\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{Fm}}$  是故障股线在 Q1 和 Q2 区间内的股线电流;  $\dot{\mathbf{E}}_{s(f)}$  和  $\dot{\mathbf{E}}_{e(f)}$  是故障股线在 Q2 区间内的槽部和端部漏感电动势。上述矩阵的详细形式如式(10)-(12)。

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & -1 & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix}_{M-1 \times M} \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{(f_1)} \\ \vdots \\ \dot{I}_{(f_m)} \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{I}}_{\mathbf{Fm}} = \begin{bmatrix} \dot{I}_{(f_{1+N})} \\ \vdots \\ \dot{I}_{(f_{m+N})} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\dot{\mathbf{E}}_{s(f)} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{s(f_{1+N})} \\ \vdots \\ \dot{E}_{s(f_{m+N})} \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{E}}_{e(f)} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{e(f_{1+N})} \\ \vdots \\ \dot{E}_{e(f_{m+N})} \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 3 换位线棒的整截距股间短路计算结果分析

308.57° 换位线棒的起始截面上不同短路股线数量对应的故障方案数如图6所示随着短路股线数量的增加,对应故障情况呈指数增长。当短路股线

数量为 20 根时,故障情况数量最多,有 128173 种。在短路股线数量超过 20 根之后,故障情况减少。

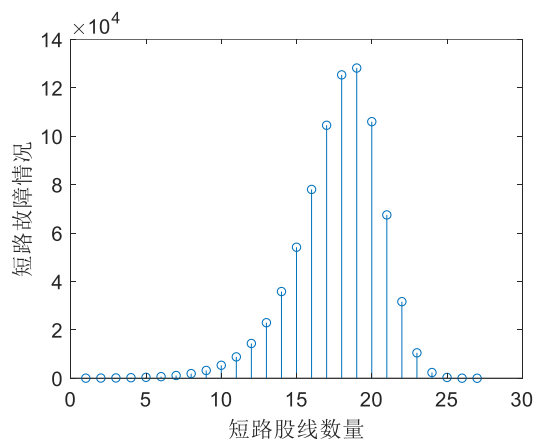


图6 单截面上不同短路股线数量对应的故障情况

在 24 个换位截距处计算出的故障数据库非常庞大,此处以 2 根股线短路中 22 号股线的短路故障为例,22 号股线的同排短路故障如图 7 所示。22 号股线的同排短路故障只能与相邻股线即 21 和 23 号股线发生短路,从图中可以看出故障电流跃变在  $\pm 0.3\text{A}$  之内,跃变较小。2 根同排短路故障的股线电流呈现一增一减的规律。轴向上发生在 13 换位截距处的故障股线电流跃变最大。径向上发生在线棒中部的故障股线电流跃变最大。随着径向上故障位置与线棒中部的距离逐渐增加,电流跃变逐渐减小。

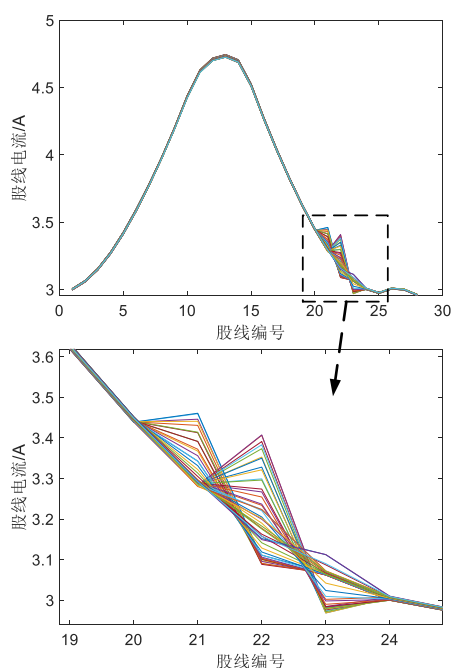


图7 2根短路股线中22号股线的所有同排短路故障

2 根短路股线中 22 号股线的所有跨排短路故障如图 8 所示。跨排短路故障中 22 号股线电流跃变

最大达到 8.5A, 该故障发生在 13 换位截距处。随着故障位置与 13 换位截距处距离的增加, 22 号股线电流跃变逐渐减小。发生在 14 和 12、15 和 11 换位截距处的故障, 两处位置到 13 换位截距处的距离相近, 股线电流跃变相近。随着故障发生位置与 13 换位截距的距离逐渐增加, 电流跃变逐渐减小。电流跃变与到 13 换位截距处之间的距离成反比。

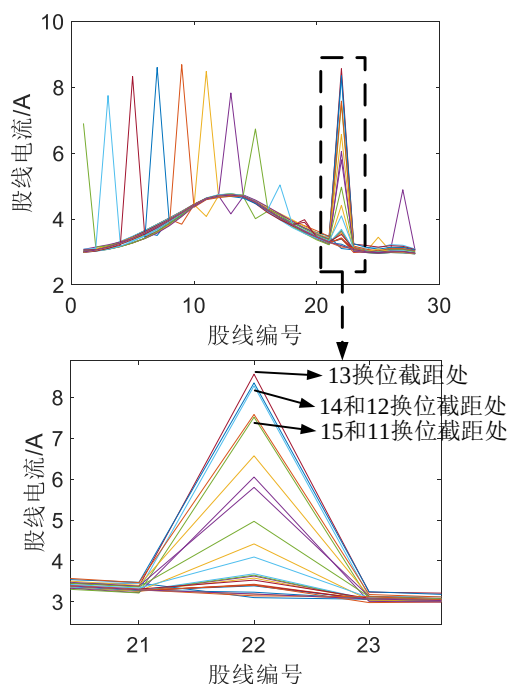


图 8 2 根短路股线中 22 号股线的所有跨排短路故障

## 4 结论

本文以一台水轮机定子绕组的三种换位设计为例, 使用改进的漏感电势法计算出了每种故障情况的股线电流并建立了故障特征数据集, 得出以下结论:

1) 短路股线数量小于 20 根时, 故障方案数量随着短路股线数量的增加而增加; 短路股线数量为 20 根时, 故障方案数量达到峰值; 短路股线数量大于 20 根时, 故障方案数量随着短路股线数量的增加而减少。

2) 在同一轴向位置处, 故障发生的径向位置影响着股线电流跃变大小。随着故障位置与径向中部位置的距离增加, 股线电流跃变逐渐减小。股线电流跃变与到径向中部位置的距离成反比。

3) 在同一径向位置处, 不同轴向位置处的短路故障股线电流跃变不同。随着故障位置与 13 换位截距在轴向方向上的距离增加, 股线电流跃变逐渐减小。股线电流跃变与到 13 换位截距处的距离

成反比。

## 参考文献

- [1] 葛臣忠, 宁苏辉, 付强, 等. 大型发电机定子绕组绝缘性能影响因素[J]. 大电机技术, 2014, (03): 35-40.
- [2] Xin P, Ge BJ, Tao DJ, et al. Electromagnetic Torque Characteristics Analysis of Nuclear Half-Speed Turbine Generator with Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Fault[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16(4): 2055-2063.
- [3] 张春莉. 大型水轮发电机定子换位线棒匝间短路股线损耗[J]. 上海大中型电机, 2018, (03): 8-11.
- [4] L. Ni, C. Wang and Y. Liang. Analysis and Test of Short-Circuit Fault Between Strands of Stator Bar Based on the Characteristic of End Leakage Magnetic Field[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-9.
- [5] 何玉灵, 张文, 王烁等. 定子匝间短路位置对汽轮发电机转子铁心温升特性的影响[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(10): 12-22.
- [6] 韩孟媛, 赵仲勇, 于跃强等. 同步电机定子绕组匝间短路前后的温度及力学响应仿真分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(04): 48-56.
- [7] Zhang L, Liang Y. Circuit Network Method of Short Circuit Fault Between Transposed Strands for Large Turbo-Generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(4): 2762-2771.
- [8] Wang C, Liang Y, Ni L, et al. Calculation and Analysis of the Strands Short-Circuit in Stator Transposition Bar for Large generators[J]. IEEE Access, 2019: 1-1.
- [9] Yanping L, Xue Q, Xu B, et al. Improved Method of Leakage Susceptible Electromotive Potential to Calculate Strand Current and Circulation Current Losses in Transposition Windings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017.

# 基于语义分割和坐标变换的油田井场光伏装机容量检测

宁昊<sup>1</sup>, 宿雲龙<sup>1</sup>, 李鹏<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 青岛 266580

## Photovoltaic Capacity Detection in Oilfield Well Sites Using Semantic Segmentation and Coordinate Transformation

Ning Hao<sup>1</sup>, Su Yunlong<sup>1</sup>, Li Peng<sup>1</sup>

1. College of New Energy, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266580

**ABSTRACT:** To address the issue of automated detection of photovoltaic (PV) installed capacity in oilfield well sites, this paper proposes a method based on semantic segmentation and coordinate transformation for the automated detection of PV installed capacity in oilfield well sites. The Direct Linear Transform (DLT) is employed to solve the homography matrix, facilitating the conversion between pixel coordinates and world coordinates. The Segment Anything Model (SAM), combined with point and box prompts, is utilized to segment and extract PV components in oilfield well sites. Morphological processing and fitting calculations are performed on the extracted masks, and the size information of the PV components is used to predict the installed capacity of PV systems in oilfield well sites. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves effective segmentation and extraction of PV components and provides highly accurate detection of PV installed capacity. The method is simple to operate, cost-effective, and possesses significant engineering application value.

**KEY WORDS:** Coordinate Transformation ; Semantic Segmentation ; Oilfield Well Sites ; Photovoltaic Installed Capacity ; Automated Detection

**摘要:** 针对油田系统中油田井场光伏装机容量自动化检测的问题, 本文提出一种基于语义分割和坐标变换的方法, 用于实现油田井场光伏装机容量的自动化检测。本文利用直接线性变换(Direct Linear Transform, DLT)对单应性矩阵进行求解, 以此实现像素坐标和世界坐标的转换; 利用 SAM (Segment Anything Model, SAM) 结合 Point&Box 提示对油田井场光伏组件进行分割提取, 然后对分割提取的掩膜进行形态学处理与拟合计算, 结合光伏组件的尺寸信息实现了油田井场光伏装机容量的预测。实验结果表明, 本文所用方法可对光伏组件进行较好的分割提取, 对光伏装机容量的检测具有较高的精确度, 且操作简单, 成本低, 具有一定的工程应用价值。

**关键词:** 坐标变换; 语义分割; 油田井场; 光伏装机容量; 自动检测

## 0 引言

近年来, 油田系统在巩固油气产业的同时, 抓住时机培育新能源产业, 明确把新能源定位为重要战略新兴产业, 深化能源供给侧结构性改革。对井场内光伏装机容量进行评估工作, 可以帮助确定光伏系统的实际运行状况, 识别潜在的维护需求和性能问题, 从而进行及时的维护和修理, 保证系统的高效运行<sup>[1]</sup>。但传统的装机容量统计工作只能依靠人力完成, 这不仅使统计成本增高, 统计精度也无法保障。随着无人机技术与计算机视觉技术的发展, 为解决这一问题提供了新思路。计算机视觉技术结合了图像处理和深度学习, 在分类、检测和分割任务上表现突出, 通过计算机视觉技术对无人机拍摄的光伏井场图像进行处理, 将其运用在光伏运维领域将会大大提升该工作的智能化水平<sup>[2]</sup>。

坐标变换是数学、计算机科学和工程学中的基础技术, 广泛应用于图形学、机器人学、地理信息系统(GIS)、遥感、图像处理等领域。坐标变换通过在不同坐标系之间进行转换, 使得数据可以在多种参考框架下进行处理和分析<sup>[3]</sup>。平移变换是指在各坐标轴方向上对所有点进行相同的平移。平移变换可用向量加法表示, 即将原坐标系中的每个点的坐标加上一个平移向量。缩放变换是指按比例放大或缩小各坐标轴的值。缩放变换可以通过缩放矩阵实现, 每个坐标轴的缩放因子可以不同。投影变换是将高维空间中的点投影到低维空间, 如三维空间投影到二维平面, 常见的投影方式包括平行投影和透视投影<sup>[4]</sup>。



早期的语义分割方法主要依赖于传统的图像处理 and 机器学习技术,如基于纹理、颜色和形状特征的分类方法。典型的算法包括区域生长、K 均值聚类和支持向量机 (SVM) 等。这些方法的主要缺点是对复杂场景和多样化物体的分割效果较差。

随着深度学习技术的发展,出现了许多高效的语义分割算法,广泛应用于自动驾驶、医疗影像分析、遥感图像处理等领域,促进这些领域的智能化发展<sup>[5]</sup>。Long<sup>[6]</sup>等人提出的全卷积网络 (Fully Convolutional Networks, FCN) 是首个将卷积神经网络 (CNN) 应用于语义分割的成功尝试。FCN 通过将全连接层替换为卷积层,使网络能够接受任意大小的输入图像,并输出相应大小的分割图。FCN 采用了上采样 (Upsampling) 技术来恢复分辨率,从而实现像素级别的分类。U-Net<sup>[7]</sup>是一种广泛用于医学图像分割的网络结构,其特点是对称的 U 型编码器-解码器架构。U-Net 在每个解码层与对应的编码层之间引入了跳跃连接 (Skip Connection),有效地融合了不同尺度的信息,显著提高了分割效果。DeepLab 系列方法 (如 DeepLabv1、DeepLabv2、DeepLabv3) <sup>[8-12]</sup> 引入了空洞卷积 (Dilated Convolution) 和空间金字塔池化 (Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP) 技术。空洞卷积通过扩展卷积核的感受野,在不增加计算复杂度的情况下捕捉更多的上下文信息。ASPP 则通过多尺度特征融合进一步提高了分割精度。

Mask R-CNN 是在目标检测框架 Faster R-CNN 的基础上发展而来的<sup>[13]</sup>。它在 Faster R-CNN 的基础上增加了一个分支,用于生成每个目标的像素级分割掩码。Mask R-CNN 不仅能够进行目标检测,还能同时实现实例分割 (Instance Segmentation)。Segment Anything Model (SAM)<sup>[14]</sup>是语义分割领域的一个最新发展,旨在提供一个通用模型,可以在不需要任务特定训练的情况下分割任何图像中的任何对象。SAM 通过结合图像编码器和提示编码器来实现高度的泛化能力。该模型有望减少对大量任务特定数据集的依赖,通过提供更为多功能和适应性强的分割工具,对各种应用产生重大影响。

基于以上,本文提出一种基于语义分割和坐标变换的田井场光伏装机容量智能化检测方法。首先,通过求解变换矩阵实现像素坐标和世界坐标的转换,为后续光伏装机容量检测提供尺寸信息;其次利用提示掩码器对 SAM 进行分割提示,以此精确分割提取出井场内的光伏组件,排除无关区域的干扰;最后,对分割提取的光伏组件的像素尺寸进行扫描检测,利用坐标变换对真实尺寸进行求解,通

过计算得到最后的井场光伏装机容量。

## 1 坐标变换

### 1.1 相机成像模型

相机成像模型<sup>[15]</sup>是测量系统的重要组成部分,主要分为:垂直投影模型、弱透视成像模型、小孔成像模型等类型。其中小孔成像模型与实际情况最接近。

小孔成像模型原理如图 1 所示,空间点 P 的光线穿过光心 O 在投影平面的像点为 p。空间点的相机坐标为  $(X_c, Y_c, Z_c)$ , 对应投影点的图像坐标为  $(x, y)$ 。空间坐标系  $O_W - X_W Y_W Z_W$  根据实际情况确定,用来描述空间点及相机的位置。

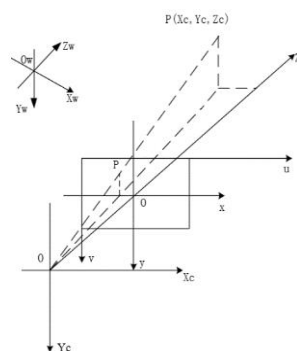


图 1 小孔成像模型

Fig. 1 The pinhole imaging model

图像像素坐标  $(u, v)$  是以图像左上角为原点的直角坐标系,  $u$  和  $v$  分别表示像素的列数和行数。图像物理坐标系  $o - xy$  是以光轴与投影图像交点为原点的直角坐标系,其  $x, y$  轴分别于图像像素坐标系的  $u$  轴和  $v$  轴平行。相机坐标系  $O - XCY - CZC$  以相机的光心  $O$  作为原点,  $Z_c$  轴与光轴重合,与成像平面垂直,取摄影方向为正方向,  $X_c, Y_c$  轴与图像物理坐标  $x, y$  轴平行,且  $O_o$  为相机焦距  $f$ 。

像素坐标系和世界坐标系下的坐标映射关系为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [r_1 \quad r_2 \quad t] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $u, v$  表示像素坐标系中的坐标,  $s$  表示尺度因子,  $f_x, f_y, u_0, v_0, \gamma$  (由于制造误差产生的两个坐标轴偏斜参数,通常很小) 表示 5 个相机内参,  $r_1, r_2, t$  表示相机外参,  $X_W, Y_W, Z_W$  (假设标定棋盘位于世界坐标系中  $Z_W = 0$  的平面) 表示世界坐标系中的坐标。

利用单应性变换来描述物体在世界坐标系和像素坐标系之间的位置映射关系,对应的变换矩阵



称为单应性矩阵 (Homography)。在公式 (1) 中, 单应性矩阵定义为:

$$H = s \begin{bmatrix} f_x & \gamma & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [r_1 \ r_2 \ t] = sM[r_1 \ r_2 \ t] \quad (2)$$

其中,  $M$  是内参矩阵, 从单应矩阵定义公式来看, 它同时包含了相机内参和外参。通过计算得出单应性矩阵, 也就得到了世界坐标和像素坐标的对应关系。

### 1.2 单应性矩阵求解

根据前面所推论的像素坐标和世界坐标的映射关系, 可以用单应性矩阵来拟合二者的关系, 可表达为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $u, v$  表示像素坐标系中的坐标,  $x, y$  表示世界坐标系中的坐标,  $H$  为单应性矩阵, 代表他们之间的变换关系。

$H$  是个  $3 \times 3$  的矩阵, 可表示为:

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $h_9=1$ , 所以  $H$  代求的未知数有 8 个。

利用直接线性变换 (Direct Linear Transform, DLT) 对  $H$  进行求解, 将最初的式子展开, 前 2 行分别被第 3 行相除, 得到:

$$\begin{cases} -h_1x - h_2y - h_3 + (h_7x + h_8y + h_9)u = 0 \\ -h_4x - h_5y - h_6 + (h_7x + h_8y + h_9)v = 0 \end{cases} \quad (5)$$

整理上述两式, 可得:

$$Ah = 0 \quad (6)$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} -x & -y & -1 & 0 & 0 & 0 & ux & uy & u \\ 0 & 0 & 0 & -x & -y & -1 & vx & vy & v \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$h = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5 \ h_6 \ h_7 \ h_8 \ h_9] \quad (8)$$

由未知变量的个数可知, 求解出至少需要 4 对匹配特征点。

对系数矩阵  $A$  进行奇异值分解, 得到

$$A = UDV^T \quad (9)$$

其中  $U$  和  $V$  是正交矩阵,  $D$  是对角矩阵。从  $V$  矩阵中选择最后一列对应的特征向量, 将这个特征向量重新排列成  $3 \times 3$  的矩阵形式, 再对这个矩阵进行归一化操作, 即即将其除以  $H$  的最后一个元素, 就得到了单应性矩阵  $H$ 。

通过以上步骤, 即求解得出了单应性矩阵  $H$ 。

利用这个单应性矩阵可以将航拍油田井场图像中的像素坐标转换为物体世界坐标, 以此实现像素距离和现实距离的转换。

## 2 油田井场光伏组件语义分割

### 2.1 SAM 语义分割模型

SAM 分割模型在 1100 万张图像上训练了超过 10 亿个掩码, 实现了强大的零样本泛化, 具有较强的实用性。本文采用 SAM 作为分割模型, 提取油田井场中的光伏组件相关信息。SAM 包括三个主要组件: 图像编码器、提示编码器和掩码解码器, 如图 2 所示:

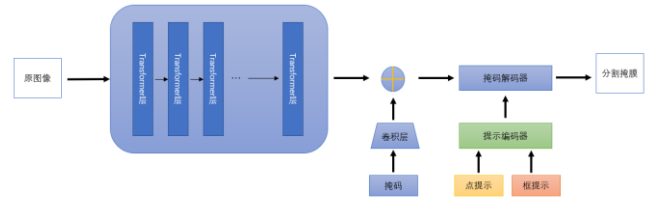


图 2 SAM 架构示意图

Fig.2 Schematic diagram of SAM architecture

然而, 由于油田井场地形复杂, 设施众多, 如果直接利用 SAM 模型对油田井场图像进行自动分割, 无法准确分割出所需光伏组件, 所以利用 SAM 模型对油田井场图像进行提示分割。

### 2.2 SAM 提示分割

输入图像经预处理统一尺寸和颜色归一化之后, 图像被划分为一系列小块, 由于 Patch Embedding 使用的是卷积核尺寸为  $16 \times 16$ 、步长为 16, 输出维度为 768 的二维卷积, 因此我们会得到  $64 \times 64$  个 768 维的向量 (后续表示为  $D$  维)。然后加上位置编码, 形成图像嵌入:

$$z_i = W_e x_i + b_e + E_{pos,i} \quad (10)$$

其中,  $z_i$  是转换后的向量,  $x_i$  为图像展平后的向量,  $W_e$  是权重矩阵,  $b_e$  是偏置矩阵,  $E_{pos,i}$  是位置编码向量。

将所有转换后的向量作为一个序列输入到 12 个 Transformer 编码器中。最终, 得到了一个高维的图像嵌入, 它包含了图像的丰富语义信息和细节特征。然后对这个嵌入进行降维和通道调整, 用于后续的分割任务。

Box 提示是在原图上框选的矩形区域, 一个 Box 由两个坐标构成 (框的左上和右下)。假设输入的 Box 为  $B$ , 两个坐标为  $(x_1, y_1)$  和  $(x_2, y_2)$ , 接下来

将两个坐标通过线性变换转换为特征表示:

$$B_{embed} = [W_B \cdot (x_1, y_1) + b_B, W_B \cdot (x_2, y_2) + b_B] \quad (11)$$

其中,  $W_B$  是权重矩阵,  $b_B$  是偏置向量。最终 Box 提示特征被表示为  $D \times 2$  维矩阵。

Point 提示是在原图上指定的点, 它分为前景点即本文目标对象的部分, 背景点即需要排除的部分。假设输入的点为  $P$ , 由坐标  $(x, y)$  表示, 将坐标通过线性变换转换为特征表示:

$$P_{embed} = W_P \cdot (x, y) + b_p \quad (12)$$

根据前景和背景点的区别, 分别叠加相应的可学习向量:

$$P_{final} = \begin{cases} P_{embed} + e_{positive} \\ P_{embed} + e_{negative} \end{cases} \quad (13)$$

$e_{positive}$  和  $e_{negative}$  是 SAM 模型中用于区分前

### 3 光伏装机容量检测方法

#### 3.1 图像预处理

二值图像是轮廓检测的基础, 因此将分割后的图像转换为灰度图像, 然后设定一个阈值, 将所有亮度低于阈值的像素点转换为黑色, 高于阈值的转换为白色, 以此将灰度图像转换为二值图像。

对二值图像进行开运算 (Opening Operation)。开运算是数学形态学处理中的一种基本操作, 它首先对图像进行腐蚀操作, 然后再进行膨胀操作。腐蚀操作会“侵蚀”图像中的前景像素 (通常是白色), 使得前景像素减少。其主要目的是去除图像中的小物体和噪声。膨胀操作会“扩展”图像中的前景像素, 使得前景像素增加。其主要目的是填充图像中的小孔和连接断裂的部分。

开运算的主要作用是去除图像中的小孔洞和细小的物体, 可以用于图像去噪、分割、边缘检测等方面。腐蚀可以消除小的白色噪点, 并断开细小的白色区域; 膨胀可以填充图像中的小黑洞并连接接近的白色区域。

图 3 上为未经形态学处理前的光伏组件分割部分, 可以看出有许多白色噪声干扰点, 影响后续对光伏组件尺寸的计算, 经形态学处理后, 白色噪声点明显减少, 分割图像边缘更加平滑, 如图 3 下所示, 大大提高了下一步轮廓检测的效率和拟合的准确程度。

景点和背景点的可学习嵌入向量。通过在高维特征空间中添加不同的偏移量, 这些嵌入向量使模型能够有效地区分前景和背景, 从而提高分割任务的准确性。

$P_{final}$  与  $B_{embed}$  共同形成稀疏提示信息:

$$T_{sparse} = [P_{final}, B_{embed}] \quad (14)$$

此后, 稀疏提示信息将与 IoU Token (是一个特定的嵌入向量, 用于预测掩码与真实标签之间的 IoU 置信度) 和 4 个 Msak Tokens (用于预测具体分割掩码的占位符, 每个 Mask Token 是一个特定的嵌入向量) 形成提示嵌入:

$$T_{special} = [T_{IoU}, T_{maski}, T_{sparse}] \quad (15)$$

最终提示嵌入结合图像嵌入被送入掩码解码器, 输出预测的分割掩码和对应的置信度分数。

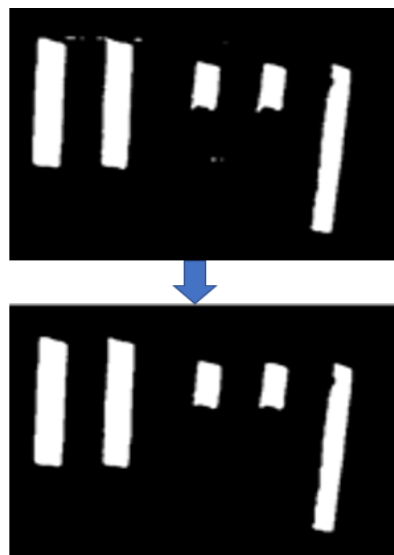


图 3 形态学处理前后的分割图像比较

Fig.3 Comparison of segmented images before and after morphological processing

#### 3.2 光伏装机容量计算

为进一步过滤排除干扰轮廓, 接下来将在预处理后的图像上检测所有连续的白色区域, 并以点集的形式返回轮廓信息, 然后将计算每个轮廓的面积, 只保留面积高于设定像素值的轮廓。将轮廓点集创建一个多边形对象, 通过逐度旋转多边形 ( $0^\circ - 179^\circ$ ) 并计算每个状态下的最小外接矩形以此来拟合分割轮廓。这种方法的关键在于能够为任意形状和任意方向提供精确的空间描述, 从而支持复杂的决策和分析过程。拟合结果如图 4, 图中红框即是对光伏组件拟合的结果可视化:

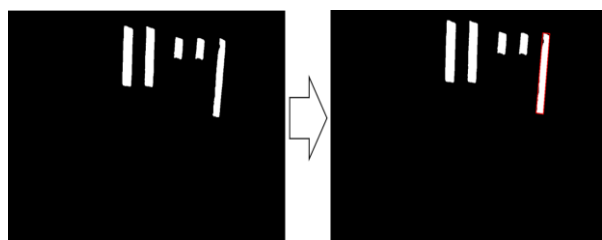


图 4 轮廓拟合示意图

Fig.4 Contour fitting diagram

最后,由拟合的矩形边长结合光伏组件的安装和尺寸等信息进行计算,计算公式为:

$$C = \frac{L}{l} \cdot 4 \cdot P \quad (16)$$

式中,  $C$  代表总装机容量,  $L$  代表分割光伏组件总长,  $l$  代表光伏单板长度,  $P$  代表单板功率。

#### 4 光伏装机容量检测实验

基于语义分割和坐标变换的油田井场光伏安装容量检测整体流程框图如所示,检测流程主要分为:语义分割,图像预处理,轮廓拟合,坐标变换和容量计算。

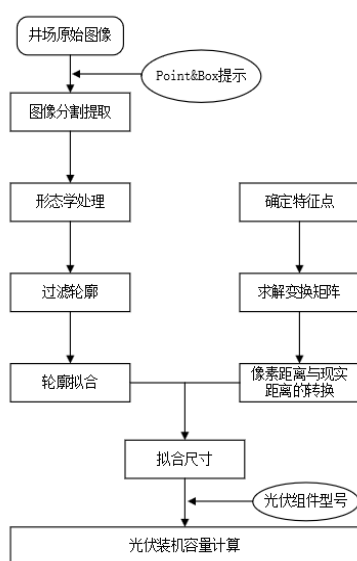


图 5 光伏装机容量检测流程图

Fig.5 Photovoltaic Installation Capacity Testing Flowchart

为了验证以上关于光伏装机容量计算方法的可行性和精确度,本文进行了仿真试验。

##### 4.1语义分割实验

针对语义分割算法进行了对比试验,选取 SegNet, U-Net, DeepLabV3+, SAM, EfficientSAM, HQ-SAM 六种分割算法,其中 SAM 对 Point、Box、Point&Box 三种提示方式测试,分别记录对应的 IoU(Intersection of Union)和可视化结果。

IoU 为两个分割掩模的交集区域的面积和两个分割掩模的并集区域的面积之比。具体计算公式为:

$$IoU = \frac{A \cap B}{A \cup B} \quad (17)$$

式中,  $A$  为预测掩模;  $B$  为基准掩模。

利用上述算法对油田井场中的光伏组件进行分割提取,表 1 为多种分割算法的交并比对比。根据表 2 数据可知,本文所用 SAM- Point&Box 相比于其他方法表现出了较好的效果。

表 1 语义分割算法 IoU 对比

Table 1 Comparison of IoU for Semantic Segmentation Algorithms

| 方法            | IoU    |
|---------------|--------|
| SegNet        | 0.7911 |
| U-Net         | 0.9218 |
| DeeplabV3+    | 0.8974 |
| EfficientSAM  | 0.9394 |
| HQ-SAM        | 0.9340 |
| SAM-Point     | 0.2661 |
| SAM-box       | 0.9239 |
| SAM-Point&Box | 0.9584 |

针对分割结果可视化对比分析,下图中蓝色掩膜即是所需分割提取的光伏组件部分,由图中可见,针对光伏组件的分割, SAM 结合 Point&Box 相比于其他分割算法,性能最为优越。

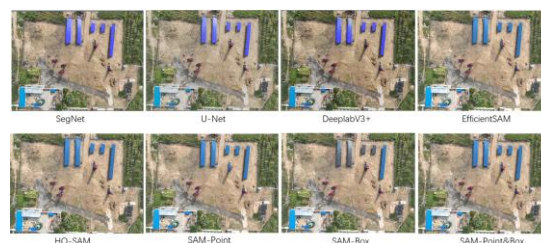


图 6 分割结果可视化对比

Fig.6 Comparison of IoU for Semantic Segmentation Algorithms

##### 4.2光伏组件尺寸测量实验

针对上图井场中拟合提取的光伏组件(从左至右)像素距离和坐标变换转换后的现实距离与真实数据对比,像素距离计算结果如表 2 所示。

表 2 拟合像素距离和真实像素距离对比

Table 2 Comparison of Fitted Pixel Distance and Actual Pixel Distance

| 拟合像素距离 (pixel) | 真实像素距离 (pixel) |
|----------------|----------------|
| 187.13         | 186.10         |
| 186.10         | 185.13         |
| 66.27          | 63.39          |
| 65.38          | 63.13          |
| 242.99         | 242.40         |

对于上述像素距离利用本文坐标变换方法转换的现实距离结果表 3 可见

表 3 现实距离对比

Table 3 Comparison of Fitted Pixel Distance and Actual Pixel Distance

| 坐标变换后现实距离 (m) | 真实距离(m) |
|---------------|---------|
| 23.74         | 23.814  |
| 23.61         | 23.814  |
| 8.43          | 7.938   |
| 8.31          | 7.938   |
| 30.79         | 31.75   |

#### 4.3误差分析

利用本文方法拟合光伏组件分割轮廓求得的像素距离与真实像素距离的平均误差为 1.866%，本方法求得的现实距离与真实距离的平均误差为 3.015%，已知上述井场实际光伏装机容量为 90kW，最终本方法测得该井场已装机光伏容量 89.68kW，误差为 0.356%，与实际基本一致。由于拍摄角度问题，光伏组件分割并不能完全准确，可能会对光伏组件的拟合尺寸计算造成影响；另外，在相机镜头生产装配过程中的误差，导致采集到的图像存在各种畸变，这会影响标定像素坐标的精度，选取更多特征点进行标定也可进一步精确距离转换结果。因此下一步尽可能提高分割算法精度、寻找更多特征点进行标定和利用精度更高的坐标变换方法可以进一步提高预测精度。

#### 5 结论

本文提出了一种基于语义分割和坐标变换的油田井场光伏装机容量检测方法，利用 SAM 结合 Point&Box 提示对油田井场中的光伏组件设备进行分割提取，将分割提取的掩膜进行二值化操作后再进行形态学处理，进一步去除噪点和干扰，最后利用坐标变换实现的距离转换结合处理后的光伏组件提取图像进行这片井场的光伏装机容量预测，并结合实验进一步验证了本文方法的可行性。通过利用无人机技术和计算机视觉技术，解决了人工测量光伏装机容量耗时长，效率低，成本高的问题，具有工程实际应用价值，能够帮助确定油田光伏系统的运维情况，促进油田光伏系统智能化发展。

#### 参考文献

- [1] 陈健.太阳能光伏发电系统在油田设计中的应用策略[J].中国设备工程,2023(16): 81-83.
- [2] 丁世浩.基于计算机视觉的光伏组件缺陷诊断研究[D].浙江大学, 2020.
- [3] V. G. Martínez, et al., Mathematics and Its Applications in Science and

Engineering[J], *Mathematics*, vol. 10, no. 19, p. 3412, 2022.

- [4] M. Barbieri and R. Diversi, Recursive Identification of Noisy Autoregressive Models Via a Noise-Compensated Overdetermined Instrumental Variable Method[J], *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, vol. 34, no. 1, Mar. 2024.
- [5] Moysis, Lazaros, and George F. Fragulis. A Review of Machine Learning and Deep Learning for Object Detection, Semantic Segmentation, and Human Action Recognition in Machine and Robotic Vision[J]. *Technologies*, vol. 12, no. 2, 2024
- [6] 翁飘,陆彦辉,齐宪标等.基于改进的全卷积神经网络的路面裂缝分割技术[J].计算机工程与应用,2019,55(16):235-239+245.
- [7] Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation[J].*Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*.
- [8] CHEN L C, Papandreou G, Kokkinos I, et al. Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected CRFs[J]. *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2014, 15(8):1023-1031.
- [9] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J].*Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2014, 15(8):1023-1031.
- [10] CHEN L C, Papandreou G, Kokkinos I, et al. Deeplab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected crfs[J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2017, 40 (4): 834-848.
- [11] CHEN L C, Papandreou G, Schroff F, et al. Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation [J].*Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2017, 25 (7): 965-972.
- [12] CHEN L C, ZHU Y, Papandreou G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation[J]. *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*. 2018, 18(4): 801-818.
- [13] He, K.,Gkioxari, G.,Dollár, P.,& Girshick, R. (2017). Mask R-CNN[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(2), 296-302.
- [14] Kirillov A, Mintun E, Ravi N, et al..Segment Anything[J]. *arXiv preprint arXiv:2304.02643*
- [15] 黄增浩. 基于双目立体视觉技术的导线脱冰跳跃轨迹监测研究[D]. 北京:华北电力大学, 2016.



宁昊

收稿日期:

作者简介:

宁昊(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向图像处理与人工智能, 电力系统设备运行状态评估,

E-mail: 2443004552@qq.com;

李鹏(1987), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为模式识别和计算机视觉, 智能信息处理算法及应用等, E-mail: lipeng@upc.edu.cn。

文章编号:

中图分类号:

文献标志码:

学科代码:

# 面向碳中和的分布式光伏并网对配电网可靠性评估与研究

孙天贺<sup>1</sup>, 周聪<sup>1</sup>

(1. 辽宁省电网节能与控制重点实验室, 沈阳工程学院, 沈阳, 110136)

## Reliability Evaluation and Research of Distributed Photovoltaic Grid-connected for Carbon Neutrality on Distribution Network

SUN Tianhe<sup>1</sup>, ZHOU Cong<sup>1</sup>

(1 Key Laboratory of Energy Saving and Controlling in Power System of Liaoning Province, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, 110136)

**ABSTRACT:** The distributed photovoltaic power generation system (PVGS) is connected to the distribution network, which changes the reliability evaluation model of the traditional distribution network. On the basis of studying the characteristics of distributed photovoltaic power supply, this paper evaluates and studies the reliability of distribution network connected to distributed photovoltaic power supply by using sequential Monte Carlo method. Through the MATLAB simulation analysis of the distribution network with distributed photovoltaic power supply, the reliability index of the load point and the reliability index of the system before and after the access to the distributed photovoltaic power supply are obtained. Finally, the reliability indexes are compared, and it is concluded that the access to distributed photovoltaic power supply can improve the reliability of distribution network.

**KEY WORDS:** Distributed photovoltaic power, distribution network, Monte Carlo method, reliability

**摘要:** 分布式光伏发电系统(PVGS)接入配电网,改变了传统配电网的可靠性评估模型。本文在研究分布式光伏电源特点的基础上,采用序贯蒙特卡洛法对接入分布式光伏电源的配电网的可靠性进行了评估与研究。通过对接有分布式光伏电源的配电网的MATLAB仿真分析,得到了接入分布式光伏电源前后的负荷点可靠性指标和系统的可靠性指标。最后对可靠性指标进行对比,得出接入分布式光伏电源可以提高配电网的可靠性。

**关键词:** 分布式光伏电源, 配电网, 蒙特卡洛法, 可靠性

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号

基金项目: 本研究由沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC220456)的资助。

Project Supported by the Shenyang Young and Middle-aged Science and Technology Innovation Talent Support Program (RC220456)

## 0 引言

双碳政策下,分布式光伏电源作为一种清洁,可再生的能源形式,对实现碳中和目标具有重要意义<sup>[1]</sup>。目前,国内外对于配电网可靠性评估的研究大多集中于算法上<sup>[2]</sup>,可以概括为两大类:解析法和模拟法。

解析法种类繁多,包括但不限于最小路法、最小割集法、网络等值法等。文献[3]采用最小路法计算可靠性指标,最小路法以电网中的供电路径为基础,确定从电源到每个负载节点的所有最小路径。文献[4]采用最小割集法,适用于含环网的配电系统可靠性评估。文献[5]采用网络等值法,虽然求解精度高,但求解速度相对其他方法较慢。

配电网可靠性评估与研究运用模拟法,主要是通过模拟方法来评估和分析配电网的可靠性<sup>[6]</sup>。非序贯蒙特卡洛法在处理大规模电网可靠性评估时具有显著的优势。序贯蒙特卡洛法通过模拟系统状态的变化来评估系统的可靠性,它能够考虑时间序列的影响,如元件的故障和修复时间,以及计划性维护等。

随着分布式光伏发电技术的快速发展和广泛应用,结合孤岛划分对配电网的影响及相应的可靠性评估方法也受到了广泛关注<sup>[7]</sup>。本文研究了对配电网进行可靠性评估,采用了序贯蒙特卡洛法结合孤岛划分对含分布式光伏电源的配电网进行可靠性评估与研究。

## 1 含分布式光伏发电的配电网可靠性评估基础



### 1.1 配电网可靠性指标

配电系统可靠性指标常见的分类是按评估对象来划分,包括了负荷点指标和系统指标两大类。

#### 1.1.1 负荷点指标

配电网可靠性评估中的负荷点指标是衡量电网对用户供电能力的重要参数主要有以下三个方面:负荷点故障率 $\lambda$ 次/年;负荷点每次故障平均停电持续时间 $\gamma$ 小时/次;负荷点的年平均停电时间 $U$ 小时/年。

##### (1) 串联系统负荷点可靠性指标

串联系统是指系统中的任何一个元件一旦发生故障,都会导致整个系统的功能失效的系统。

负荷点故障率 $\lambda$ 是衡量配电网可靠性的重要指标,它反映了电力系统在一年时间里因故障而造成的停电次数,其公式为:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1)$$

负荷点每次故障平均停电持续时间 $\gamma$ 指在电力系统中,每次发生故障导致的停电期间,平均需要多长时间才能重新恢复供电,其公式为:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2)$$

负荷点的年平均停电时间 $U$ 指的是在给定的一年时间内,某一个负荷点因故障或停电而无法正常供电的总时长,其公式为:

$$U = \lambda \gamma \quad (3)$$

式中, $\lambda_i$ 是设备 $i$ 的故障率(次/年), $\gamma_i$ 为故障设备的修复时间(小时/次)。

##### (2) 并联系统负荷点可靠性指标

在并联系统中,只有当所有元件均出现故障时,系统才会无法正常运行。

负荷点故障率公式:

$$\lambda = \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) \quad (4)$$

负荷点每次故障平均停电时间:

$$\gamma = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \quad (5)$$

#### 1.1.2 系统指标

(1) 系统平均停电频率指数 SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) 是一个衡量配电系统可靠性的重要指标,它表示在单位时间内,每个由系统供电的用户所遭受的平均停电次数,其公式为:

$$SAIFI = \frac{\sum_i \lambda_i N_i}{\sum_i N_i} \quad (6)$$

(2) 系统平均停电持续时间指数 SAIDI (System Average Interruption Duration Index) 是衡量配电系统可靠性的重要指标之一,其公式为:

$$SAIDI = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i N_i} \quad (7)$$

(3) 用户平均停电持续时间指标 CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index) 反映了配电系统停运的严重程度,其公式为:

$$CAIDI = \frac{\sum_i N_i U_i}{\sum_i \lambda_i N_i} \quad (8)$$

(4) 系统平均供电可用率 ASAI (Average Service Availability Index) 定义为一年中用户获得的不停电时间总数与用户要求的总供电时间之比。如果将一年中的用户要求供电时间设定为 8760 小时,其公式为:

$$ASAI = \frac{8760 \sum_i N_i - \sum_i N_i U_i}{8760 \sum_i N_i} \quad (9)$$

(5) 期望缺供电量 EENS (Expected Energy Not Supplied) 指的是在给定时间内,由于发电容量短缺或电网约束,系统无法满足负荷需求电量的期望数。其公式为:

$$EENS = (X - R) \times P(X) \quad (10)$$

式中, $X$ 表示停运容量,即在某一时刻由于故障等原因不能运作的发电机组的总容量。 $R$ 指的是系统的备用容量,即可用发电容量减去当前负荷后的余额。 $P(X)$ 是停运容量为 $X$ 的确切概率,反映了这种停运情况发生的概率。

### 1.2 分布式电源技术

分布式电源技术是一种能够在电力系统中分布式地生成、存储或转换能源的技术。这种技术的主要目标是提高电力系统的灵活性、可靠性和可持续性,同时促进能源的高效利用和清洁生产<sup>[8]</sup>。

分布式电源技术可以根据其能源供应的稳定性分为两类<sup>[9]</sup>:一类为持续性分布电源,包括燃气轮机、燃料电池和储能设备等;另一类为间歇型分布式电源,包括光伏发电和风力发电等。

### 1.3 分布式电源的孤岛运行

孤岛划分是指在配电网发生故障时,通过某种策略将电网分割成若干个独立的区域(即孤岛),以保证关键负荷的供电连续性和提高系统的供电可靠性,本文主要介绍不间断供电形成孤岛模式。

不间断供电形成孤岛模式指的是,在分布式电源接入的配电网中,不保留三相一次重合闸的功能,在分布式电源接入的系统和其所连接的变电站间的联络线发生故障时,不将分布式电源所在的断路器断开,而是直接将联络线上的断路器断开,由分布式电源对全部或部分负荷直接供电。

## 2 基于序贯蒙特卡洛法的配电网可靠性评估

### 2.1 系统的可靠性评估模型

#### 2.1.1 分布式光伏发电模型

##### (1) 双指数光伏模型

双指数模型(Double Exponential Model)是一种常用的光伏模型,用于描述光伏电池的输出功率与光照强度之间的关系。该模型通常表示为以下形式:

$$P = P_{\max} (1 - e^{-aE}) e^{-bE} \quad (11)$$

式中  $P$  表示光伏电池的输出功率;  $P_{\max}$  表示光伏电池在充分光照条件下的最大输出功率;  $E$  表示光照强度(通常以标准太阳光强度为单位);  $a$  和  $b$  是模型参数,影响光伏电池输出功率与光照强度之间的曲线形状。

##### (2) 采用 Beta 概率密度函数的光伏模型

采用 Beta 概率密度函数的光伏模型是一种用于描述光照强度不确定性的概率分布模型<sup>[10]</sup>。Beta 分布因其灵活性而被广泛应用于光照强度的建模。其公式为:

$$\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot s^{(\alpha-1)} \cdot (1-s)^{(\beta-1)}, 0 \leq s \leq 1, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (12)$$

$f_s(s)$  是关于  $s$  的 Beta 概率分布函数;  $\Gamma(z)$  是 gamma 函数,  $s$  为太阳辐射照度,单位为  $\text{km}/\text{m}^2$ ;  $\alpha$  和  $\beta$  是 Beta 分布函数的参数,可根据随机变量  $s$  的平均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$  按式(13)及(14)计算得出。

$$\beta = (1 - \mu) \cdot \left( \frac{\mu \cdot (1 + \mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{\mu \cdot \beta}{1 - \mu} \quad (14)$$

#### 2.1.2 元件状态模型

基于序贯蒙特卡洛法的配电网可靠性评估中,通常采用两种状态来描述元件的工作状态,即正常状态和故障状态。在这两种状态中,每个元件都有一个失效概率,用于描述元件从正常状态到故障状态的转变。

### 2.2 基于序贯蒙特卡洛法的配电网可靠性评估步骤

步骤 1: 读取数据: 从提供的数据源中获取配电网参数和 8760h 的分布式光伏电源发电的相关数据。设置仿真年数为  $NY$ , 并设置初始时间  $t=0$ 。

步骤 2: 对每个元件产生一个从 0 到 1 均匀分布的随机数  $E1$ , 并用公式 4-1 求出元件的无故障工作时间  $TTF_i$ :

$$TTF_i = -\frac{1}{\lambda_i} \ln E_i \quad (15)$$

步骤 3: 将故障时间最短的元件确定为故障元件, 利用转换公式求出该元件的故障修复时间  $TTR_i$ :

$$TTR_i = -r_i \ln E_i \quad (16)$$

步骤 4: 观察分布式光伏的发电功率, 将负荷所需功率与分布式光伏发电功率想比较, 将可由分布式光伏供电的负荷记录下来。统计这些负荷的正常工作时间和故障时间。

步骤 5: 利用节点网络分析法判断孤岛供电是否受到元件故障的影响, 然后更正孤岛供电恢复的负荷, 将受到影响的负荷从步骤 4 中所记录的负荷中去掉。统计这些受到影响的负荷的正常工作时间和故障时间。

步骤 6: 判断总的模拟时间  $t$  是否小于  $NY \times 8760$  小时, 是的话转入步骤 2, 否的话转入步骤 7。

步骤7: 计算负荷点的可靠性指标以及系统的可靠性指标。

### 3 算例分析

#### 3.1 系统编号及数据

本文采用 IEEE RBTS BUS6 F4 为基础, 在节点 13 和节点 27 处分别加入分布式光伏电源, 以下是该系统的节点和编号:

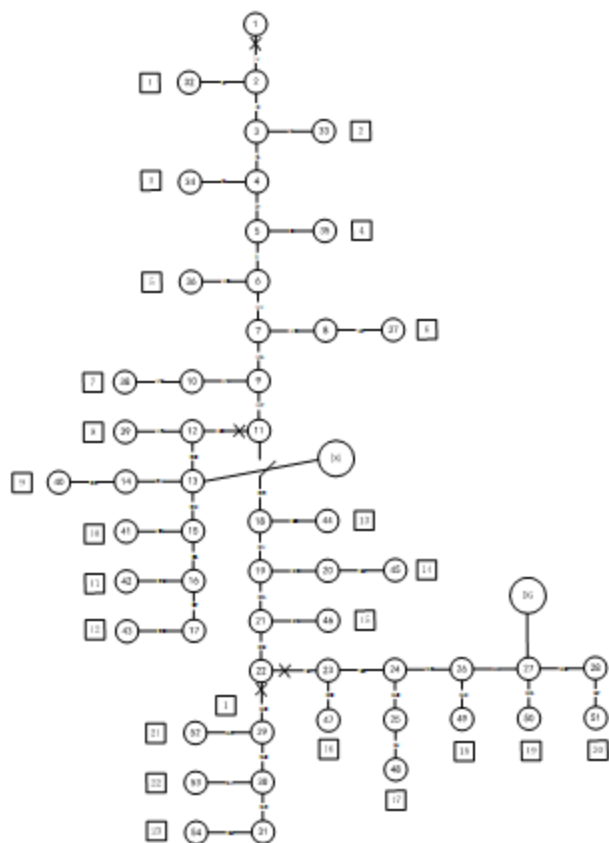


图1 含分布式光伏配电网

Fig. 1 with distributed photovoltaic distribution network

图2、图3和图4为该系统的支路数据, 图5、图6和图7为该系统的负荷数据。



图2 线路长度与线路编号的关系

Fig.2 Relationship between line length and line number

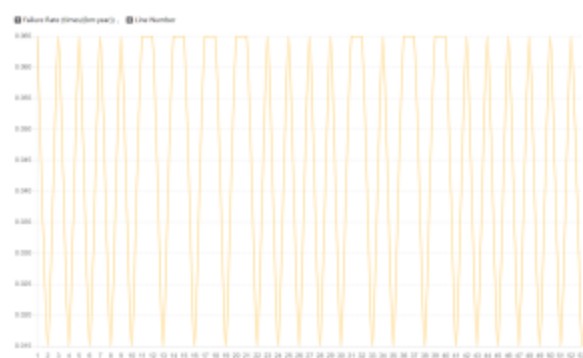


图3 故障率与线路编号的关系

Fig.3 Relationship between failure rate and line number

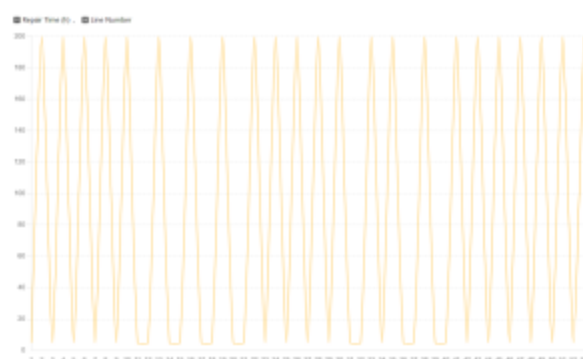


图4 修复时间与线路编号的关系

Fig. 4 Relationship between repair time and line number



图5 峰值负荷与负荷编号的关系

Fig. 5 Relationship between peak load and load number



图6 平均负荷与负荷编号的关系

Fig. 6 Relationship between average load and load number



图7 用户数与负荷编号的关系

Fig. 7 The relationship between the number of users and the load number

### 3.2 基于序贯蒙特卡洛法对含分布式光伏电源的配电网进行可靠性评估的算例分析

采用图1所示系统,使用序贯蒙特卡洛法对该含有分布式光伏电源的配电网进行可靠性评估,认为系统所采用的孤岛运行方式为不间断孤岛供电。为了保证数据的可靠性,设置仿真的年数  $N=1000$ 。为了分析对比分布式光伏发电对配电网可靠性的影响,先对原系统进行了配电网可靠性的评估,再对含分布式光伏发电的配电网可靠性进行评估,将二者进行对比,负荷可靠性指标如下:

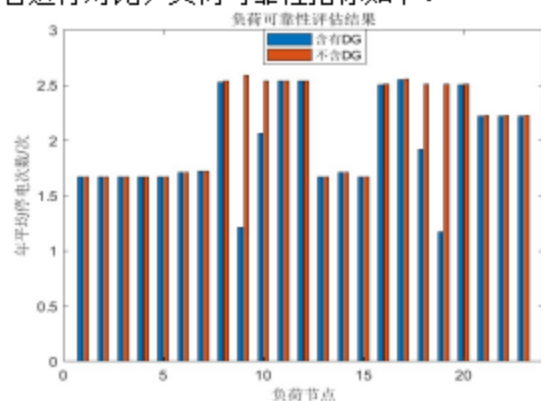


图8 年平均停电次数

Fig.8-year average number of power outages

如图8所示,接入分布式光伏电源前后的配电网中的部分负荷节点的年平均停电次数发生了变化,例如负荷9的年平均停电次数由2.589次下降到1.212次,而一些负荷节点的年平均次数并未发生变化。这是因为当系统元件发生故障时,一些负荷未能得到分布式光伏电源供电而导致停电。而在孤岛范围内的负荷节点,当系统元件发生故障时,转而由分布式光伏电源供电,负荷节点在这个过程中不会停电。总的来说,在分布式光伏电源接入配电网后,系统中总的停电次数有所减少,提高了系

统的供电可靠性。

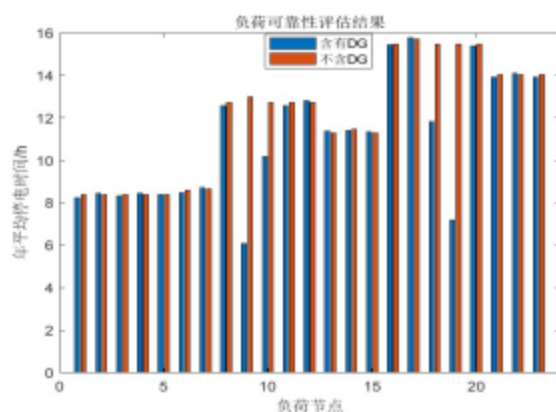


图9 年平均停电时间

Fig.9 Years average power outage time

图9所示,孤岛范围内的负荷相较于分布式光伏电源接入配电网前有了明显的变化,年平均停电时间有了明显的降低。而孤岛范围外的负荷相较于分布式光伏电源接入配电网前变化不大。这是因为,当系统元件发生故障时,分布式光伏电源可以为孤岛内的负荷进行供电。通过图9中的数据来看,接入分布式电源的配电网的总的年停电时间有所减少,提高了系统的可靠性。

根据图8和图9可算出系统可靠性指标,系统可靠性指标如下:

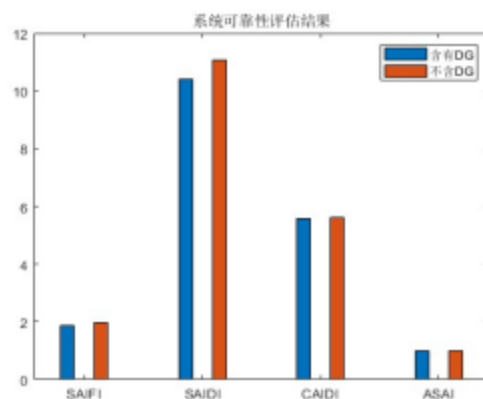


图10 系统可靠性指标

Fig. 10 System reliability index

表1 系统系统可靠性指标对比  
Table 1 Comparison of system reliability indexes

| 可靠性指标           | 原系统     | 现系统     |
|-----------------|---------|---------|
| SAIFI(次/用户·年)   | 1.9778  | 1.8572  |
| SAIDI(小时)(用户·年) | 11.0747 | 10.3639 |
| CAIDI(小时)(用户·年) | 5.5995  | 5.5803  |
| ASAI            | 0.9987  | 0.9988  |

如图 10 和表 1 所示,系统的平均供电可靠率 ASAI 由 0.9987 提升到 0.9988,而系统平均停电持续时间 SAIDI 由 11.0747 下降到 10.3639,用户平均停电持续时间指标 CAIDI 和系统平均停电频率指数 SAIFI 均略有下降,这些数据表明当系统元件发生故障时,分布式光伏电源可以为孤岛范围内的负荷供电,从而提高了整个系统的供电可靠性。

#### 4 结论

本文针对接入分布式光伏电源后的配电网的可靠性指标计算问题。利用蒙特卡洛法对配电网的可靠性进行了评估与研究。总结如下:

(1) 考虑了配电网的可靠性指标,利用不间断供电形成孤岛模式,以实现最优的供电效果和经济效益。

(2) 采用序贯蒙特卡洛法对含分布式光伏电源的配电网可靠性进行评估与研究。通过对接入分布式光伏电源前后的配电网的可靠性指标的比较,能够得出接入分布式光伏电源可以提高配电网的可靠性。

#### 参考文献

- [1] 丁明, 胡迪, 毕锐, 等. 含高渗透率可再生能源的配电网可靠性分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 194-202.
- [2] 胡美玉, 胡志坚, 胡梦月. 计及相关性的含分布式电源配电网可靠性评估[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 108-114.
- [3] Xie Kaigui, Zhou Jiaqi, Billinton R. Reliability Evaluation Algorithm for Complex Medium Voltage Electrical Distribution Networks Based on the Shortest Path[J]. IEE Proc-Gener. Transm. Distrib, 2003, 150(6): 680-690.
- [4] 杨文学. 基于最小割集的配电系统可靠性评估[D]. 西安: 西安理工大学, 2002.
- [5] 万国成, 任展, 田翔. 配电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 48-52.
- [6] 张静. 基于序贯蒙特卡罗仿真的配电网可靠性评估模型的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.
- [7] 马钰, 韦钢, 李扬, 等. 考虑孤岛源-荷不确定性的直流配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4726-4738.
- [8] 李磊, 李跃, 郭威, 等. 分布式电源接入对配电网可靠性影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2016-2021.
- [9] 李建林, 田立亭, 李春来. 储能联合可再生能源分布式并网发电关键技术[J]. 电气应用, 2015(09): 28-33.
- [10] Liu A B, Li W Y. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation based on Latin hypercube sequential sampling[C]//2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME). IEEE, 2020: 97-99.



周聪

收稿日期: 2024-06-15.

作者简介:

周 聪(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行, E-mail: 812996347@qq.com;

孙天贺(1991), 男, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: sunth@sie.edu.cn

文章编号:

中图分类号: TM 76

文献标志码: A

学科代码: 085-207

# 新能源消纳下的综合能源系统灵活性优化研究

周聪, 孙天贺

(1. 沈阳工程学院、辽宁沈阳)

## Research on flexibility optimization of integrated energy system under new energy consumption

ZHOU Cong, SUN Tianhe

(1. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, Liaoning province)

**ABSTRACT:** With the increasing proportion of new energy access in our country, the phenomenon of curtailment of wind is gradually obvious due to the lack of flexibility in regional integrated energy system including new energy. Therefore, this paper studies the problem of optimizing the flexibility of integrated electricity-heat energy system for new energy absorption. The typical structure of the electric-thermal integrated energy system is analyzed, and the mathematical models of flexible equipment such as cogeneration unit, electric boiler and heat pump are studied. The system is evaluated from three aspects: economy, new energy consumption rate and flexibility index. The flexible optimization operation model of regional integrated energy system oriented to new energy consumption is established. Based ON THE OPTIMAL SCHEDULING MODEL OF the electric and thermal integrated ENERGY SYSTEM, the optimized operation results under different conditions are compared and analyzed to provide a basis for the planning of the integrated energy system.

**KEY WORDS:** New energy consumption; Integrated energy system; Flexibility

**摘要:** 随着我国新能源接入比例不断提高, 在含新能源的区域综合能源系统中由于灵活性不足导致的弃风现象逐渐显著, 因此本文研究了面向新能源消纳的电-热综合能源系统灵活性优化运行问题。分析了电-热综合能源系统的典型结构, 研究了热电联产机组、电锅炉和热泵等灵活性设备的数学模型, 从经济性、新能源消纳率, 灵活性指标三方面对系统进行评价。建立了面向新能源消纳的区域综合能源系统的灵活性优化运行模型。以电-热综合能源系统优化调度模型为基础, 对比分析不同条件下的优化运行结果, 为综合能源系统的规划提供依据。

**关键词:** 新能源消纳; 综合能源系统; 灵活性

随着世界范围内工业化程度的不断加深, 社会对于能源的需求随之变得越来越高, 综合能源系统其可实现不同供应系统间的有机协调, 可提高社会能源供用的灵活性和经济性。除此之外, 不仅可以促进可再生能源的高效消纳, 而且可以通过不同能源生产、转换和存储的技术实现了能源的更高效率的利用。

电-热综合能源系统可视为电力系统与区域供热系统的融合, 以常规发电机组和 CHP 机组为电源, 通过输电线路向用户供应电能, 但在电-热综合能源系统中, 只包含 CHP 机组会面临着系统灵活性不足的问题, 为此可以在系统中加入电锅炉, 热泵等灵活性设备资源, 在可再生能源方面加入风电机组。弃风限电现象随之产生<sup>[1-3]</sup>。

当前针对电热综合能源系统弃风消纳方面的研究主要是探讨如何提高系统运行灵活性, 从而弥补 CHP 机组与风电之间的矛盾, 在追求能源效率的同时避免弃风现象的发生<sup>[4]</sup>。文献[5-6]提出了基于双线性模型的调度策略, 通过调节发电量和发热量来分别达到减小弃风和降低运行成本的目标, 制定最优的调度方案实现协调运行, 文献[7]利用储热系统可以调节热负荷的特性, 从而提升 CHP 机组的调节能力和系统的灵活性, 并最终体现在“削峰填谷”所带来的上网收益提升, 文献[8]为了将热网实现风电的高比例消纳, 建立了包含供热网天然储热特性的综合能源系统优化调度模型, 实现负荷曲线平移, 从而提高风电消纳水平。利用电锅炉等电制热设备可以将多余的风电转换为热能, 实现在减少 CHP 热出力的同时, 增加风电消纳能力。文献[9-10]分析了在消纳可再生能源的过程中所产生的经济利用价值, 对此建立了面向风电的电热综合能源系统的优化运行模型, 定量分析了电锅炉在电热综合能源系统中吸收风电的经济价值。文献[11]建

## 0 引言



立了多能源混合微电网实时优化调度模型,模型考虑分布式光伏输出和负荷需求的不确定性,利用不同类型设备响应速度的差异,平滑光伏与负荷的波动性,从而减小系统并网对主电网的影响,并通过算例验证了模型的可行性。

从上述文章可以看出,虽然国内外对于灵活性设备的弃风消纳的影响进行了探究,但是研究内容多数集中在相对简单的电锅炉,对其他灵活性设备的研究有待进一步的加强。同时研究多数针对于一种灵活性设备,对于各种灵活性设备在相同条件下对电热综合能源系统风电消纳和经济影响的研究相对比较少。

本文主要从提升系统灵活性、经济性和弃风消纳率三个方面,将 CHP 机组、电锅炉装置、热泵装置作为综合能源系统的灵活性设备,构建含有多种灵活性设备综合能源系统灵活性优化运行模型。模型综合考虑系统 CHP 运行成本和购电成本,并为了减少弃风率,在目标中加入弃风惩罚成本,在满足一定电负荷和热负荷的基础上,以系统经济成本最小为目标,分析不同设备对系统风电消纳和运行成本的影响,为提高风电消纳能力提供了新思路。

## 1 综合能源系统设备模型及灵活性分析

### 1.1 热电联产机组的灵活性模型

热电联产机组(Combined Heat and Power, CHP)作为发出功率型灵活性资源,供电功率具备一定的调节能力,便于响应新能源出力的变化,促进系统弃风消纳,其电热运行特性如图 1 所示。

从图 1 可知,当 CHP 机组供热功率不变时,其供电功率可调节的范围并不是很大,可提供的弃风消纳空间范围有限。

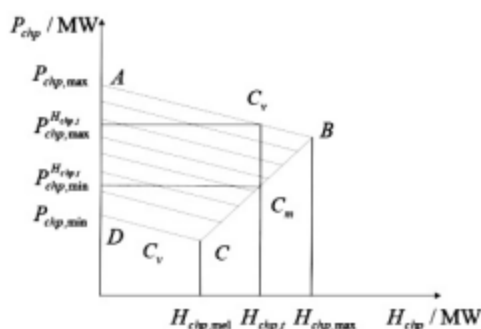


图 1 热电联产机组的电热运行特性

FIG. 1 Heat-electricity relationship of CHP unit

当 CHP 机组参与系统优化运行时,其电热运行模型如下:

$$P_{chp,min} \leq P_{chp,t} \leq P_{chp,max} \quad (1)$$

$$H_{chp,min} \leq H_{chp,t} \leq H_{chp,max} \quad (2)$$

$$\max(C_v \cdot H_{chp,t} + P_{chp,D}, C_m \cdot H_{chp,t} + P_{chp,C}) \leq P_{chp,t} \leq C_v \cdot H_{chp,t} + P_{chp,A} \quad (3)$$

式中:  $P_{chp,t}$  和  $H_{chp,t}$  表示  $t$  时刻 CHP 的供电功率和供热功率,  $P_{chp,min}$  和  $P_{chp,max}$  表示 CHP 供电功率的下限和上限,  $H_{chp,min}$  和  $H_{chp,max}$  表示 CHP 供热功率的下限和上限,  $C_v$ ,  $P_{chp,D}$ ,  $C_m$ ,  $P_{chp,C}$  和  $P_{chp,A}$  为 CHP 的热电耦合参数,表示热电机组(CHP)功率和热功率的热电耦合关系。

### 1.2 电热泵的灵活性模型

电热泵作为消耗功率型灵活性资源,与 CHP 机组联合运行,在满足供热负荷的条件下,改变了 CHP 机组的电功率可调节范围,即增加了 CHP 机组运行范围,使得系统对于风电等新能源接纳水平大幅上涨。热泵消耗一定的新能源电力后,可对从环境介质中吸收的低品位热能加以利用,并将其输送到高温热源。热泵的功率转换效率与热泵性能系数 COP 有关,其运行模型如下所示:

$$H_{hp,t} = P_{hp,t} \cdot COP \quad (4)$$

$$P_{hp,min} \leq P_{hp,t} \leq P_{hp,max} \quad (5)$$

式中:  $H_{hp,t}$ ,  $P_{hp,t}$  为  $t$  时刻电热泵机组供热、耗电功率, COP 为在额定工况和规定条件下机组运行运行时的制热量与有效输入功率之比,也称电热泵的能效系数。热泵的性能系数相对较高,因此会起到节省能源的作用。

### 1.3 电锅炉的灵活性模型

电锅炉利用电能对水进行加热,将产生的热水或高温蒸汽输送到加热管,实现电加热的耦合变换,它的约束表示如下:

$$\underline{Q_{eb}} \leq Q_{eb,t} \leq \overline{Q_{eb}} \quad (6)$$

$$Q_{eb,t} = \eta_{eb} \cdot P_{eb,t} \quad (7)$$

式中,  $\underline{Q_{eb}}$  和  $\overline{Q_{eb}}$  表示了电锅炉热输出的下限和上限,  $Q_{eb,t}$  表示  $t$  时刻电锅炉的热输出,  $P_{eb,t}$  表示电锅炉的电功率,  $\eta_{eb}$  为电锅炉的热效率。

## 2 面向新能源消纳的区域综合能源系统灵活性运行研究

### 2.1 目标函数

本文所建立的电-热综合能源系统协调优化运行模型为混合整数非线性优化模型,目标函数主要包括热电联产机组运行成本和弃风惩罚成本。目标函数如下:

$$\min f = F_1 + F_2 \quad (8)$$

式中:  $F_1$  表示热电联产机组运行成本,  $F_2$  为弃风惩罚成本。

#### (1) 热电联产运行成本

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^{M_{chp}} \left[ \rho_s [a_i (P_{m_{chp},t,s} + C_V (H_{m_{chp},t,s} + H_{hx,t,s}))^2 + b_i (P_{m_{chp},t,s} + C_V (H_{m_{chp},t,s} + H_{hx,t,s})) + c_i] \right] \quad (9)$$

式中:  $T$  为调度周期。  $S$  为场景集合;  $\rho_s$  为场景  $s$  的概率;  $F_1$  表示热电联产机组运行成本,  $a_i, b_i, c_i$  为热电机组运行成本系数,  $P_{m_{chp},t,s}$ ,  $H_{m_{chp},t,s}$  分别表示  $t$  时段  $s$  场景下第  $m$  台热电机组总供电功率、供热功率;

#### (2) 弃风惩罚成本

$$F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^{M_w} \rho_s \lambda_{pei} (P_{m_w,t,s}^{cur}) \quad (10)$$

式中:  $F_2$  表示弃风惩罚成本,  $\lambda_{pei}$  为弃风的惩罚系数,  $P_{m_w,t,s}^{cur}$  是表示  $t$  时段  $s$  场景下第  $m$  台风电机组的弃风功率。

### 2.2 约束条件

#### (1) 灵活性约束

各类灵活性调节设备  $t$  时段  $s$  场景下可提供灵活性如下:

$$\begin{aligned} \Delta F_{m_{chp},t,s} &= P_{m_{chp},t,s} - P_{m_{chp},t-1,s} \\ \Delta F_{m_w,t,s} &= P_{m_w,t,s} - P_{m_w,t-1,s} \\ \Delta F_{m_{hps},t,s} &= P_{m_{hps},t,s} - P_{m_{hps},t-1,s} \\ \Delta F_{m_{dc},t,s} &= P_{m_{dc},t,s} - P_{m_{dc},t-1,s} \\ \Delta F_{e,t,s} &= P_{e,t,s} - P_{e,t-1,s} \end{aligned} \quad (12)$$

则  $t$  时段各设备提供的系统总灵活性满足系统  $t$  时段  $s$  场景下灵活性需求, 还需要满足各自机组向上, 向下灵活性供给能力限制, 上述模型如下所示:

$$\begin{aligned} F_{m_{chp},t,s}^d &\leq \Delta F_{m_{chp},t,s} \leq F_{m_{chp},t,s}^u \\ F_{m_{hps},t,s}^d &\leq \Delta F_{m_{hps},t,s} \leq F_{m_{hps},t,s}^u \\ \Delta F_{t,s} &= \sum_{m=1}^{M_{chp}} \Delta F_{m_{chp},t,s} + \sum_{m=1}^{M_w} \Delta F_{m_w,t,s} + \sum_{m=1}^{M_{hps}} \Delta F_{m_{hps},t,s} \\ \Delta F_{t,s} &= \Delta D_{t,s} \end{aligned} \quad (13)$$

式中,  $F_{m_{chp},t,s}^u$ ,  $F_{m_{chp},t,s}^d$ ,  $F_{m_{hps},t,s}^u$ ,  $F_{m_{hps},t,s}^d$ ,  $F_{e,t,s}^u$ ,  $F_{e,t,s}^d$  分别为  $t$  时段  $s$  场景下热电机组电功率向上, 向下灵活性最大值, 电热泵可提供的电功率向上, 向下灵活性最大值; 电热泵、电解槽设备爬坡与机组最大容量相关。

#### (2) 电负荷供需平衡

$$\sum_{m=1}^{M_{chp}} P_{m_{chp},t,s} + \sum_{m=1}^{M_w} P_{m_w,t,s} - \sum_{m=1}^{M_{hps}} P_{m_{hps},t,s} - L_{e,t,s} = 0 \quad (14)$$

式中:  $P_{m_{chp},t,s}$  为  $t$  时段  $s$  场景下第  $m$  台热电联产机组的供电功率,  $P_{m_w,t,s}$  为  $t$  时段  $s$  场景下第  $m$  台风电机组的供电功率,  $P_{m_{hps},t,s}$  为  $t$  时段  $s$  场景下第  $m$  台电热泵机组的耗电功率,  $L_{e,t,s}$   $t$  时段  $s$  场景下系统用电负荷。

#### (3) 热负荷供需平衡

$$\sum_{m=1}^{M_{chp}} H_{m_{chp},t,s} + \sum_{m=1}^{M_{hps}} H_{m_{hps},t,s} - H_{ht,t,s} - L_{h,t,s} = 0 \quad (15)$$

式中:  $H_{m_{chp},t,s}$  为  $t$  时段  $s$  场景下第  $m$  台热电联产机组的供热功率,  $L_{h,t}$  为  $t$  时段系统用热负荷。

#### (4) 风电机组的约束

$$0 \leq P_{m_w,t,s} \leq \min[\hat{P}_{m_w,t,s}, P_{m_w,\max}] \quad (16)$$

式中:  $P_{m_w,t,s}$  为  $t$  时段  $s$  场景下风电的实际发电量,  $\hat{P}_{m_w,t,s}$  为  $t$  时段  $s$  场景下风电的预测发电量,  $P_{m_w,\max}$  为风电机组装机容量。

#### (5) CHP 机组、电热泵、电锅炉的约束

见式(1)-式(7)

### 2.3 求解算法

本章建立的电-热综合能源系统的灵活性优化运行模型是一个多变量, 非线性和多约束的求解最小值问题。fmincon 函数可以用于求解非线性多元函数的最小值。非线性优化模型描述如下:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{s.t.} \begin{cases} A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ c(x) \leq 0 \\ c_{eq}(x) = 0 \\ l_b \leq x \leq u_b \end{cases} \end{aligned} \quad (17)$$

式中  $A$ ,  $b$  代表线性不等式约束,  $A_{eq}$ ,  $b_{eq}$  定义线性等式约束,  $c(x)$  代表非线性不等式约束,  $c_{eq}(x)$  代表非线性等式约束,  $l_b$  和  $u_b$  则分别表示变量的下限和上限。在运行中, 通过对工作集中的约束进行修改, 直到得出当前迭代点已达到系统最优优点时可退出迭代并给出原命题的最优解。

## 3 算例分析

### 3.1 基本数据

算例系统以东北某地区综合能源系统为例进行模型验证和分析, 以系统经济性最优为目标, 其中 CHP 机组、电锅炉、热泵的出力为控制变量。本综合能源系统包括 1 台 300MW 的 CHP 机组, 1

台20WM的电锅炉,1台20MW的热泵,1个100MW的风电场。其中电锅炉的效率值取0.9,热泵的COP值取3,外电网售电价格为150元/MW,弃风惩罚为300元/MW。CHP机组为抽汽式热电机组,其机组约束参数如表1,本文选取典型日的负荷曲线和风电出力曲线如图2,负荷包括电负荷和热负荷,优化周期为24h,单位优化时间为1h。

表1 仿真数据

Table 2 Simulation data

| 参数 | $Q_{CHP}$ | $P_{CHP}$ | $P_{CHPA}$ | $P_{CHPD}$ | $C_v$ | $V_M$ |
|----|-----------|-----------|------------|------------|-------|-------|
| 数值 | 100, 500  | 100, 500  | 150        | 500        | -0.3  | 1     |



图2 典型日24小时分布

FIG. 2 Typical day 24-hour distribution

### 3.2 灵活性分析

图3为的4种情况下系统向上和向下的灵活性图,单独CHP的方式下在有弃风的时间段内,系统几乎没有向下的灵活性,这时系统都在消纳弃风,从而使CHP机组的电出力较低,而没有向下调节空间。在加入电锅炉后,在非弃风阶段,这时因为有电锅炉的存在系统存在着很好的向下调节能力,对比模型a的向下调节能力更好。而热泵加入的模式c,在弃风阶段系统也存在着一定的向下调节能力,这是因为热泵消纳弃风的效率更高,从而可以不在满发的情况下,使热泵存在着一定的向下调节空间,使系统的向下调节能力更强。而同时加入电锅炉和热泵的模式d,系统的向下调节能力会得到进一步的增强。

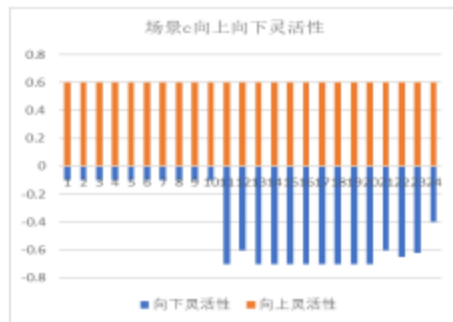
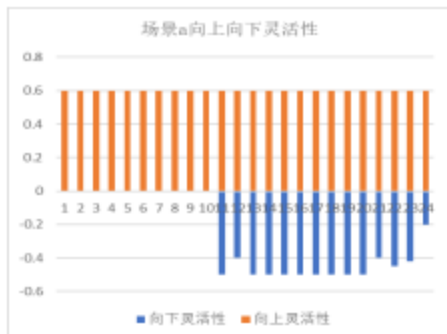


图3 4种情况下系统向上和向下灵活性

FIG. 3 4 cases of system upward and downward flexibility

### 3.3 经济性分析

4种场景下的成本对比如表(2)所示:

表2 4种场景成本对比

Table 2 Simulation data

| 场景 | 弃风量(MW) | 成本(万元) | 热出力(MW) |
|----|---------|--------|---------|
| a  | 527     | 48.2   | 3452.4  |
| b  | 287     | 34.6   | 2454.7  |
| c  | 467     | 38.5   | 2331.5  |
| d  | 240     | 33.0   | 2331.5  |

由表可见,在分别加入热泵和电锅炉后,对比场景(a)的运行成本和弃风量也有很大改善,但热泵在减少弃风量上热泵不如电锅炉效果明显。在产生同样热量时,电锅炉能够消耗更多的电能,从而消耗的风电水平高于热泵装置,但是在调节CHP机组热出力方面不如热泵,如果运行成本中不加入弃风惩罚成本,热泵对于综合能源系统的运行成本对比电锅炉会有更好的效果。在同时加入电锅炉和热泵后,在考虑电锅炉和热泵等电制热装置后,可以有效提升系统的消纳弃风的能力,降低运行成本。

### 3.4 新能源消纳分析

图4为4种场景的弃风消纳情况,可以看出在负荷的低谷期,电锅炉对于提升风电消纳的能力比热泵高。而CHP机组与电锅炉、热泵配合协调供热,通过提高CHP机组的调节区间,同时增加电负荷,对比单一加入电锅炉或者热泵,具有更高的风电消纳率。

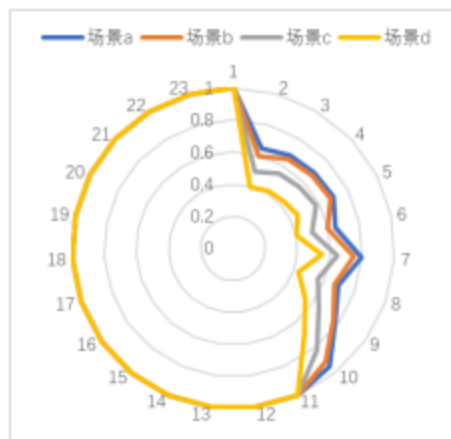


图4 4种场景的弃风消纳图

FIG. 4 Wind curtailment loss chart of four scenarios

## 4 结论

本文针对新能源接入比例不断提高导致的灵活性不足的问题,提出了面向新能源消纳的区域综合能源系统灵活性运行的研究,对于解决风电问题具有重要意义。

通过仿真对四种情况进行模拟,就灵活性、经济性和新能源消纳率三方面进行了分析,得出以下结论:CHP机组单独供热的弃风量,总运行成本和CHP热出力都为最高,电锅炉能够有效的提升弃风消纳水平,明显强于热泵,主要因为其效率低于热泵装置,在产生同样热量时,电锅炉能够消耗更多的电能,从而消耗的风电水平高于热泵装置,但是在调节CHP热出力方面不如热泵。热泵装置在减少CHP热出力水平上明显优于电锅炉,这是因为在消耗同样的电能时,热泵装置可以产生更多的热能,从而可以更好的减少CHP的热出力,从而减少CHP的机组运行成本。在同时利用电锅炉和热泵时,在提升弃风消纳水平和减少运行成本方面有很好的经济性。在系统中考虑电锅炉,热泵可以增加系统的灵活性,对于系统应对负荷或风电的不确定性具有良好的效果。

在未来,随着新能源发电占比升高,电-热综合能源系统运行潜力巨大,将能对电网灵活性提供部分保障。

## 参考文献

- [1] 邵常政. 面向灵活性与可靠性的电-热综合能源系统运行与规划研究[D]. 浙江大学, 2020.
- [2] 朱清昊, 朱继忠, 李盛林, 董瀚江, 何晨可, 蓝静. 电-热综合能源系统优化调度综述[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(04): 383-397. DOI:10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2022.04.009.
- [3] 王帆, 周斌, 郑云飞. 基于新能源最大化消纳的源网荷储协调应用研究[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(06): 187-189.
- [4] 黄亚峰, 李丹, 严干贵, 等. 考虑热网传输延时及储热的电-热综合能源系统日前优化调度策略[J]. 电测与仪表, 1-9 [2020-12-19].
- [5] 王明军, 穆云飞, 孟宪哲, 等. 考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(01): 132-142.
- [6] 潘霄, 陈良, 张明理, 侯依昕, 王崇元. 计及新能源消纳成本的多源互补规划技术[J/OL]. 南方电网技术: 1-13 [2022-09-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.tk.20220621.1024.002.html>
- [7] Yi Liqi, Li Tao, Zhang Ting. Optimal investment selection of regional integrated energy system under multiple strategic objectives portfolio[J]. Energy, 2021, 218.
- [8] 董重庆, 陈辉, 赵李明, 等. 以高压电极式电锅炉为核心的高性能分布式电热能源系统[J]. 南方电网技术, 2017, 11(10): 35-44.
- [9] Bao Z, Zhou Q, Yang Z, et al. A multi Time-scale and Multi Energy-type Coordinated Microgrid Scheduling Solution-Part I: Model and Methodology[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2257-2266.
- [10] Xueqin Tian, Mengran Cui, Tong Xu, Jinfei Sun, Xinlei Wang, Jiangxiang Guo, De-Gejinifu, Na Wang. Transient Simulation and Optimization of Regional Integrated Energy System[J]. Energy Engineering, 2022, 119(3).
- [11] Zhang Anan, Zheng Yadi, Huang Huang, Ding Ning, Zhang Chengqian. Co-integration theory-based cluster time-varying load optimization control model of regional integrated energy system[J]. Energy, 2022, 260.



周 颢

收稿日期: 2024-06-15。

作者简介:

周 颢(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行, E-mail: 812996347@qq.com;

孙天贺(1991), 男, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制, E-mail: sunth@sie.edu.cn

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 风核打捆输电系统建模与暂态稳定性分析

王东昊, 王湘军, 张文硕, 张旭瑞, 苏勋文

(黑龙江科技大学 电气与控制工程学院, 哈尔滨 150022)

## Modelling and transient stability analysis of wind-nuclear bundled transmission systems

WANG Donghao, WANG Xiangjun, ZHANG Wenshuo, ZHANG Xurui, SU Xunwen

(School of Electrical &amp; Control Engineering, Heilongjiang University of Science &amp; Technology, Harbin 150022, China)

**ABSTRACT:** Offshore wind power and China's nuclear power are geographically close to each other, and a wind-nuclear bundled transmission system can be constructed. The article firstly establishes a simulation model of wind-nuclear bundled transmission system based on PSCAD/EMTDC. Afterwards, the effects of different fault types, wind power penetration rates and fault locations on the transient stability of the wind-nuclear bundled system are analysed through simulation. The results show that the three-phase short-circuit fault has the greatest impact on the transient stability of the system, and the wind power access improves the transient stability of the system.

**KEY WORDS:** wind-nuclear bundling; offshore wind farms; nuclear units; wind penetration; transient stability analysis; PSCAD/EMTDC

**摘要:** 海上风电和中国核电地理位置接近, 可以构建风核打捆输电系统。文章首先基于 PSCAD/EMTDC 建立了一种风核打捆输电系统的仿真模型。之后通过仿真分析了不同故障类型、不同风电渗透率、不同故障发生位置对风核打捆系统暂态稳定性的影响。结果表明: 三相短路故障对系统暂态稳定性影响最大, 风电接入使得系统暂态稳定性有所提高。

**关键词:** 风核打捆; 海上风电场; 核电机组; 风电渗透率; 暂态稳定性分析; PSCAD/EMTDC

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

核电作为全球第二大清洁电力来源, 加快发展核电, 充分发挥核电在电力供应和能源转型中的作用, 对于调整能源结构, 保证能源可靠供应, 促进“碳达峰碳中和”目标实现具有重大意义<sup>[1]</sup>。“十四五”可再生能源发展规划指出要推动海上风电规模

化、集群化发展<sup>[2]</sup>。中国的核电站普遍建设在沿海地区, 使得核电和风电特别是海上风电资源分布相对集中, 为构建风核打捆联合外送系统提供了现实可能性。此外, 风核打捆系统还可以促进风电消纳, 减少弃风, 减少电网运行和输电成本。但是这种联合外送的输电方式也同时为电网和核电站的稳定运行带来了一些问题和挑战, 系统特性较之前更为复杂。如何确保电力系统和核电机组都能稳定运行成为一个重要的课题。因此, 研究“风核打捆”外送系统的暂态稳定性和交互影响是十分必要的。

目前, 国内外已有一些将风电与核电相联系的研究。文献[3]指出在有风力发电场情况下, 除核电站的位置外, 核电站发生失去站外电源事故的频率与系统运行负荷和风电渗透率的变化是密切相关的。文献[4]探讨了在风电渗透率较高的系统中并入核电站对葡萄牙电网的影响。文献[5-8]对核电参与调峰的可行性、安全性和经济性等方面进行了分析, 建立了几种不同的风核协调优化调度模型。文献[9]提出了一种风-核混合发电系统并对其可行性和经济性进行了分析。文献[10]以实际案例(芬兰)为例, 评估了在核电站、能源需求和能源基础设施灵活性的不同情况下, 风能接入系统的最大可行性。文献[11]分析了风力发电接入电网对系统容量充裕度和核电站安全的影响。文献[12]介绍了一种核电-近核电站风电场混合发电系统。

本文依托 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件建立了风核打捆外送系统的仿真模型, 分析不同交流故障类型, 不同风电渗透率, 不同故障发生位置对系统暂态稳定性的影响。

## 1 风核打捆交直流混联系统建模

### 1.1 全功率换流器型风电机组模型

本研究选用全功率换流器型风电机组模型作

基金项目: 2021 年度黑龙江省省属高校基本科研业务费项目(2021-KYYWF-1467)。

Project Supported by 2021 Heilongjiang Provincial Universities' Basic Research Operating Expenses Project (2021-KYYWF-1467).

为风核打捆系统送端海上风电场的研究对象，其拓扑结构如图1所示。风力机提供机械转矩带动永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)，发电机输出经背靠背全功率换流器，变压器，风电场等值元件接入母线1。

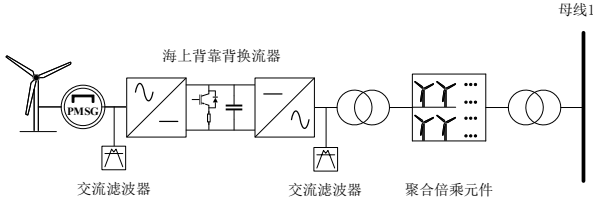


图1 海上风电送出系统拓扑结构

Fig.1 Topology of offshore wind power delivery system

### 1.1.1 PMSG 数学模型

PMSG 的数学方程<sup>[13-15]</sup>如式(1)~(5)所示。

电压方程：

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & & & & \\ & R_s & & & \\ & & R_s & & \\ & & & R_{kd} & \\ & & & & R_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \\ I_{kd} \\ I_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\Psi_d/dt \\ d\Psi_q/dt \\ d\Psi_0/dt \\ d\Psi_{kd}/dt \\ d\Psi_{kq}/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_r\Psi_q \\ \omega_r\Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程：

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \\ \Psi_{kd} \\ \Psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & L_{akd} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & L_{akq} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 \\ L_{akd} & 0 & 0 & L_{kd} & 0 \\ 0 & L_{akq} & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \\ I_{kd} \\ I_{kq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Psi_f \\ 0 \\ 0 \\ \Psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

上式，下标  $d$ 、 $q$  分别表示  $d$  轴和  $q$  轴绕组；下标  $kd$ 、 $kq$  分别表示  $d$  轴和  $q$  轴阻尼绕组；下标  $akd$ 、 $akq$  分别表示  $A$  相与  $d$  轴、 $q$  轴之间的关系。

转矩方程：

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + K_D \omega_r \quad (3)$$

$$T_e = \Psi_d I_q - \Psi_q I_d \quad (4)$$

转速方程：

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

### 1.1.2 换流器控制策略

PMSG 机侧整流器采用转速控制和转子磁链定向矢量控制法<sup>[16]</sup>，母线1侧逆变器采用母线电压定向矢量控制法，即将电网电压定向在  $d$  轴上<sup>[17-18]</sup>。

### 1.2 压水堆核电机组模型

本研究选用压水堆 (pressurized water reactor,

PWR) 核电机组模型作为风核打捆系统送端核电站的研究对象，其整体拓扑结构如图2所示。核电站由核岛系统（一回路系统）和常规岛系统（二回路系统）组成。一回路主系统是核电站的核心区域，主要包括反应堆、主泵、稳压器、蒸汽发生器等，实现核能→热能的转换。二回路系统主要包括汽轮机回路、循环冷却水和电气系统，实现热能→机械能→电能的转换。

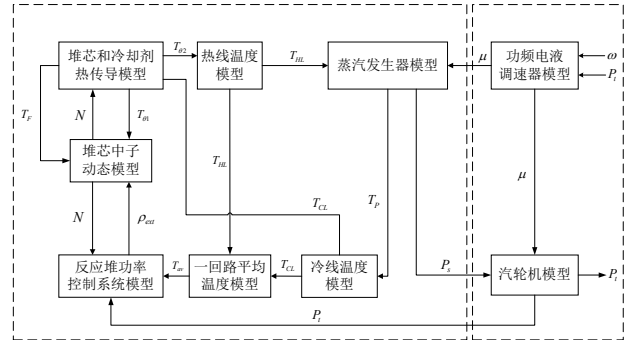


图2 压水堆核电机组拓扑结构

Fig.2 Topology of PWR nuclear power unit

图2中， $N$  表示中子通量密度； $\rho_{ext}$  表示控制棒动作感生的反应性； $T_{o1}$  和  $T_{o2}$  分别表示进行热传导前后冷却剂的温度； $T_f$  表示堆芯燃料温度； $T_{HL}$  和  $T_{CL}$  分别表示热线和冷线温度； $T_{av}$  表示一回路平均温度； $T_p$  表示蒸汽发生器处冷却剂温度； $P_s$  表示蒸汽压力； $\mu$  表示气门开度； $\omega$  表示发电机转速； $P_t$  表示机械功率。

### 1.3 直流输电系统模型

要使并网型风电机组能够顺利运行，系统中必须有同步交流电源提供电压支撑，故本研究选用基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)系统。对于机电暂态仿真，需要使用 MMC 的正序基波特性表征直流系统对交流电网的作用，其交流侧和直流侧等效电路<sup>[19]</sup>如图3所示。

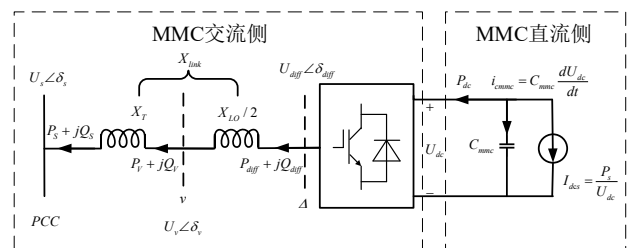


图3 MMC 系统等效电路

Fig.3 MMC System Equivalent Circuit



## 2 基于PSCAD/EMTDC的风核打捆外送系统仿真模型

### 2.1 系统结构

系统送端由核电站模块和海上风电场模块组成，海上风电场集群经 MMC-HVDC 接入核电站母线（母线2），核电和风电出力经交流双回线路连接至受端电网（无穷大系统），如图4所示。

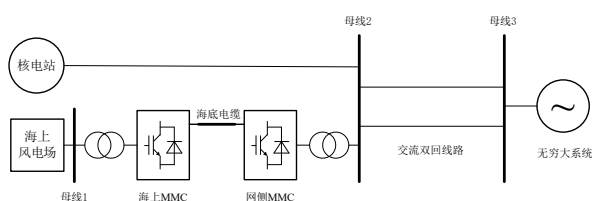


图4 风核打捆外送系统拓扑结构

Fig.4 Topology of Wind-nuclear bundled power transmitted by AC/DC system

### 2.2 系统仿真参数

PMSG 和核电机组主要参数分别如表1、表2所示。

表1 PMSG 参数

Table 1 Parameters of PMSG

| 参数                | 数值    | 单位   |
|-------------------|-------|------|
| 额定容量 $S_n$        | 5     | MW   |
| 额定电压 $U_{sn}$     | 0.69  | kV   |
| 额定电气频率 $f_e$      | 30    | Hz   |
| 直流电容 $C_{dc}$     | 0.04  | F    |
| 定子绕组电阻 $R_s$      | 0.017 | p.u. |
| 定子绕组漏抗 $L_s$      | 0.064 | p.u. |
| 直轴电抗 $X_d$        | 0.55  | p.u. |
| 交轴电抗 $X_q$        | 1.11  | p.u. |
| 直轴阻尼绕组电阻 $R_{kd}$ | 0.055 | p.u. |
| 直轴阻尼绕组电抗 $L_{kd}$ | 0.62  | p.u. |
| 交轴阻尼绕组电阻 $R_{kq}$ | 0.183 | p.u. |
| 交轴阻尼绕组电抗 $L_{kq}$ | 1.175 | p.u. |

表2 核电机组参数

Table 2 Parameters of PWR nuclear power unit

| 参数                 | 数值        | 单位                    |
|--------------------|-----------|-----------------------|
| 反应堆初始功率 $P_0$      | 3436      | MW                    |
| 堆芯中子平均寿命 $l^*$     | 0.0000179 | s                     |
| 缓发中子衰变常数 $\lambda$ | 0.082246  | 1/s                   |
| 燃料冷却剂热传递系数 $h$     | 1135.652  | W/(m <sup>2</sup> ·K) |
| 燃料冷却剂热传递面积 $A$     | 5570.7    | m <sup>2</sup>        |
| 燃料质量 $m_F$         | 101123.5  | kg                    |
| 冷却剂质量 $m_C$        | 11206.264 | kg                    |
| 冷却剂流速 $v_m$        | 18900     | kg/s                  |
| 热线时间常数 $T_{HL}$    | 1.2495    | s                     |
| 冷线时间常数 $T_{CL}$    | 1.632     | s                     |

### 2.3 系统工况

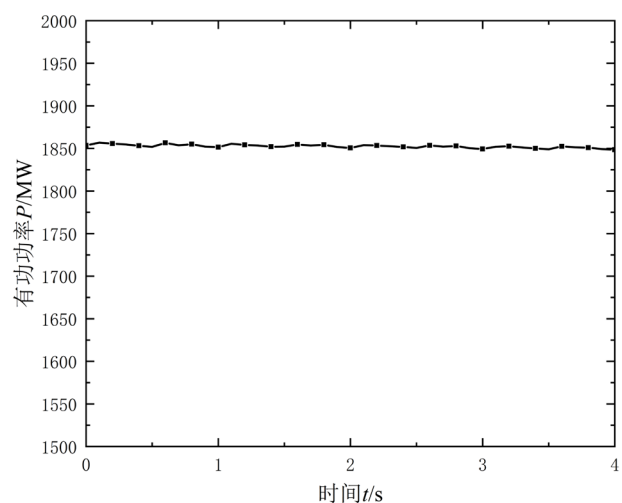
保持送端总出力为 1000MW，根据风电渗透率不同对系统设置仿真分组：

- (1)工作模式 A: 风电 0 MW, 核电 1000MW, 风电渗透率 0%;
- (2)工作模式 B: 风电 250MW, 核电 750MW, 风电渗透率 25%;
- (3)工作模式 C: 风电 500MW, 核电 500MW, 风电渗透率 50%;
- (4)工作模式 D: 风电 700MW, 核电 300MW, 风电渗透率 70%;
- (5)工作模式 E: 风电 1000MW, 核电 900MW, 风电渗透率 52.63%%;

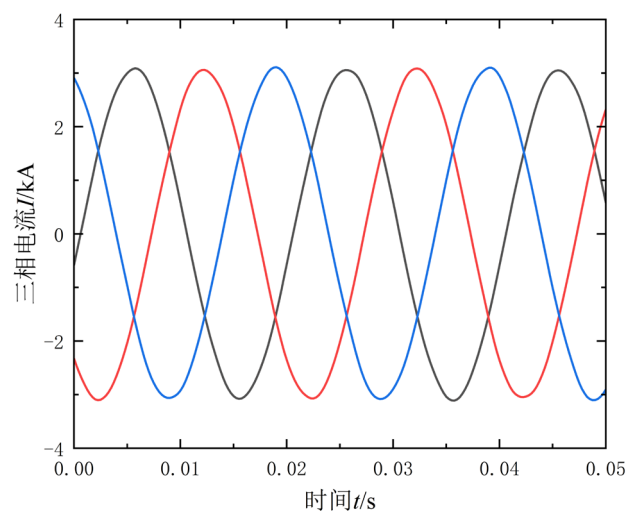
## 3 系统暂态稳定性仿真分析

### 3.1 系统输出

在工作模式 E 仿真工况下，系统输出如图5所示。



(a) 有功功率



(b) 三相电流

图5 系统输出曲线图

Fig.5 System Output Graph

### 3.2 不同故障类型对系统暂态稳定性的影响

在工作模式 C 仿真工况下, 分别在交流双回线路同一位置设置单相接地短路故障和三相短路故障, 故障从 1s 处开始, 持续 0.1s 后清除。核电机组功角摆动情况如图 6 所示。

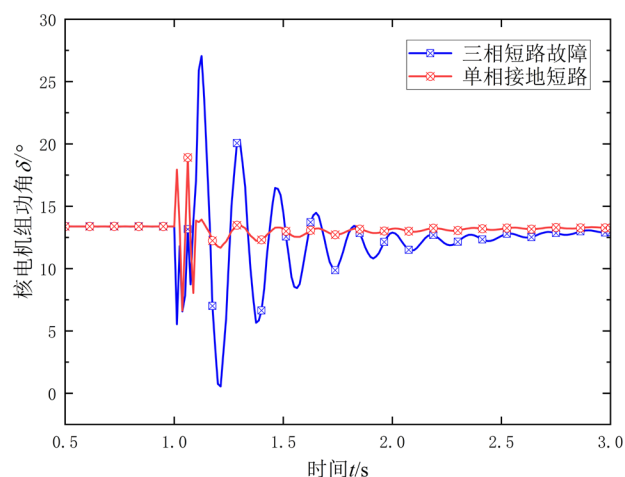


图 6 不同故障类型下的系统功角多摆图

Fig.6 Multi-swing diagram of system power angle for different fault types

由图 6 可知, 当系统发生三相短路故障时, 核电机组功角摆动幅度最大, 故障清除后功角恢复时间最长, 可见三相短路故障对风核打捆外送系统暂态稳定性的影响最为严重。

### 3.3 不同风电渗透率对系统暂态稳定性的影响

在工作模式 A、B、C、D 仿真工况下, 于交流双回线路同一位置设置三相短路故障, 故障从 1s 处开始, 持续 0.1s 后清除。核电机组功角摆动情况如图 7 所示。

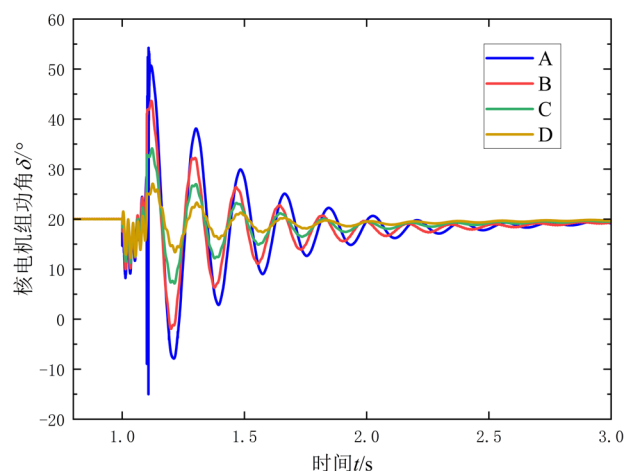


图 7 不同风电渗透率下的系统功角多摆图

Fig.7 Multi-swing diagram of system power angle for different wind power penetration rates

由图 7 可知, 风电的接入使得系统功角摆动角度

变小, 故障切除后系统恢复到稳态所需的时间变短, 系统暂态稳定性有所提高。不同风电渗透率的系统, 核电机组功角摆动与恢复情况有明显差别, 在风电渗透率为 25%—70%之间时, 随着风电渗透率的提升, 系统功角摆动幅度和摆动周期随之减小, 系统的暂态稳定性有所提高。

## 4 结 论

(1) 提出一种风核打捆外送系统的基本结构, 经仿真验证可以有效传输风电场和核电站出力。

(2) 三相短路故障比单相短路故障对打捆系统暂态稳定性的影响更严重, 前者造成的波动强度约为后者的 2 倍。

(3) 风电的接入会使原系统暂态稳定性有所提高。风电渗透率的不同与打捆系统暂态稳定性相关联。在 25%~70%风电渗透率之间, 系统暂态稳定性与风电渗透率为线性增长关系。

## 参考文献

- [1] 中国核能行业协会. 我国核电运行年度综合分析核心报告 (2023 年度) [R]. <https://www.china-nea.cn/site/content/44804.html>, 2024.
- [2] 赵琳, 魏澈, 王阳, 等. 海上风电场宏观选址与风能资源储量估算 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 1-8.
- [3] Kamyab S. Assessment of the Grid-related loss of offsite power to the nuclear power plants in the presence of wind Farms[J]. Progress in Nuclear Energy, 2023.
- [4] De Jesus J M F, Almeida M E, Rocha C S, et al. Integration of a Nuclear Power Plant in a Transmission Grid with a Large Penetration of Wind Generation[J]. Ifac Proceedings Volumes, 2010, 43(1):192-197.
- [5] 梁毅, 李华, 刘航旭, 等. 计及核电风险量化的多源互补调峰调度方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 124-133.
- [6] Guoqiang L, Fei J, Jingli L, et al. A Multi-Source Dispatching Model with Considering the Nuclear Power Plants Dispatching and Wind Power Accommodation[C]//2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE. 2021. Wuhan, China.
- [7] 邵尤国, 赵洁, 刘涤尘, 等. 考虑核电调峰的风电-核电协调优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1018-1029.
- [8] 赵冬梅, 王浩翔, 陶然. 计及风电-负荷不确定性的风-火-核-碳捕集多源协调优化调度[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 707-718.
- [9] Sun L, Huang W, Xiao Z, et al. Conceptual design and preliminary analysis of a hybrid Wind-nuclear power system for on-demand power Supply[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2022, 44(3): 5916-5928.
- [10] Zakeri B, Rinne S, Syri S. Wind Integration into Energy Systems with a High Share of Nuclear Power—What Are the Compromises?[J].

Energies, 2015, 8(4): 2493–2527.

- [11] Volkanovski A. Wind generation impact on electricity generation adequacy and nuclear Safety[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 158: 85–92.
- [12] Mishra M, Saxena N K, Mishra P. ANN Based AGC for Hybrid Nuclear-Wind Power System[C]//2016 International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). IEEE. September 2016. GHAZIABAD, India.
- [13] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Manitoba: Copyrighted Material, 2002.
- [14] WOODFORD D A, GOLE A M, MENZIES R W. Digital simulation of DC links and AC machines[J]. IEEE Power Engineering Review, 1983, 3(6): 36-37.
- [15] LAUW H K. Interfacing for universal multimachine system modeling in an electromagnetic transients program[J]. Power Engineering Review, 1985, 5(9): 33-34.
- [16] 王海涛. 直驱型风力发电系统变流器控制系统的研究[D]. 华北电力大学硕士学位论文, 2011.
- [17] 董桐宇. 直驱式风力发电机的建模与并网仿真分析[D]. 太原理工大学硕士学位论文, 2011.
- [18] 杨淑英. 双馈型风力发电变流器及其控制[D]. 合肥工业大学博士学位论文, 2007.
- [19] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

收稿日期: 2024-07-29。

作者简介:



王东昊

王东昊(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析, E-mail: w785553839@163.com;

王湘军(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏电池参数辨识, E-mail: 2423673891@qq.com;

张文硕(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网容量配置和经济运行, E-mail: ss15948531383@163.com;

张旭瑞(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏组件参数辨识, E-mail: 1067678196@qq.com;

苏勋文(1976), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为风电场等值建模、风电场次同步振荡分析等, E-mail: suxunwen@163.com。

(编辑 五号楷体, 居右, 段前空 6pt)

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 基于改进蜜獾算法的油田单井光伏容量 优化配置方法

胡怿航, 王晨光, 尹柏承, 杨贺丞

(哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

## An Optimization Method of Single Oil Well Photovoltaic Capacity Based on Improved Honey Badger Algorithm

HU Yihang, WANG Chenguang, YING Bocheng, YANG Hecheng

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, Heilongjiang)

**ABSTRACT:** The microgrid in oilfield with photovoltaic power generation faces significant issues including substantial curtailed solar energy, low power factors in oil pumping units, and considerable electrical energy losses. Addressing these challenges, this paper introduces an optimized configuration scheme for photovoltaic capacity in individual oilfield wells. It develops a capacity configuration optimization model centered around economic viability, energy efficiency, and power supply reliability. To address the slow processing speeds and reduced precision of conventional algorithms, an enhanced honey badger algorithm is proposed. Comparative analysis using real-world case studies reveals that the improved algorithm achieves reduced costs, minimized energy wastage, and decreased redundancy compared to its predecessor, thereby validating the efficacy of the proposed model and algorithm.

**KEY WORDS:** microgrid, capacity optimization method, single oil well, honey badger algorithm

**摘要:** 含光伏发电的油田微电网存在弃光现象严重、抽油机功率因数低、电能损耗严重的问题。本文针对这些问题,提出一种油田单井光伏容量优化配置方案,构建以经济性、能源利用率、供电可靠性为目标函数的容量配置优化模型。针对传统算法求解速度慢、精度低等问题,提出一种改进的蜜獾算法。通过实际算例将改进的蜜獾算法、蜜獾算法、粒子群算法和蝴蝶算法进行对比。算例结果表明,改进后的算法比改进前的算法成本更低,能源浪费率和冗余度更小,验证了所提模型和算法的有效性。

**关键词:** 微电网, 容量优化配置, 油田单井, 蜜獾算法

## 0 引言

油田既是产能大户,也是耗能大户。对于化石能源的过度使用既给资源造成了巨大的压力,也给

环境带来了污染日益严重的问题。石油开采行业作为传统的高能耗业,在“双碳”目标的要求下,如何利用可再生能源发电技术,在稳定、可靠供电的前提下实现节能降碳成为油田电网当今急需解决的难题之一。

油田电网点多、线长、面广的特点增加了可再生能源接入电网的难度,但是油田电网在可再生能源发电的开发、利用方面也具有其独特的优势。以大庆油田为例,其地处敖古拉大风口,具有较好的风资源条件;同时大庆油田地区光照充足,属国家太阳能资源二类地区,并且大庆地区年平均温度较低,有利于提高光伏组件的转换效率,适合建设各类型光伏电站。而且,随着微电网技术的发展,光伏太阳能的随机性和波动性导致供电可靠性不强,难以满足供电要求的问题得到了有效的解决。在规划、设计的初期阶段,对微电网中的分布式电源进行容量配置是油田电网建设的关键,也是系统稳定运行的基础。

近年来,粒子群算法、鲸鱼算法等人工智能优化算法在微电网容量配置优化中得到广泛应用。文献[1]以飞轮和锂电池为微电网的储能系统,将调频指令分解成高频和低频,以储能系统参与调频市场的收益和成本为目标函数,用改进的粒子群算法进行求解,结果可以有效降低混合储能的成本。文献[2]针对并网型风光柴储微电网,采用改进的麻雀搜索算法与多种算法进行对比,成本均比其他算法的成本低,证明其改进的算法具有较好的寻优能力。文献[3]以成本最低,碳排放最小以及购电比例最小为目标,采用改进的花授粉算法进行求解,分析比

较不同算法的配置方案,验证改进的花授粉算法的有效性。文献[4]通过 Fuch 混沌映射、余弦自适应参数和莱维飞行三种策略改进多目标蝗虫优化算法,将其应用于风电场混合储能系统,优化目标是使系统成本最低,改进算法可以快速找出 Pareto 最优解集。

针对油田光伏微电网容量优化配置问题,本文提出一种改进的蜜獾算法。利用混沌映射、分段最优领域策略对蜜獾算法进行改进。建立以经济性、能源利用率和供电可靠性为目标函数的优化配置模型,采用改进的蜜獾算法进行求解,算例结果表明,其比标准算法的收敛速度更快、搜索精度更好。

## 1 单井光伏容量配置优化模型建立

### 1.1 目标函数

#### 1.1.1 等年值成本

等年值成本包括初始投资成本、运维成本、置换成本以及电网交易成本。

$$f_1 = C_{in} + C_{om} + C_{re} + C_{grid} \quad (1)$$

式中,  $C_{in}$  为初始投资成本;  $C_{om}$  为年运维成本;  $C_{re}$  为置换成本;  $C_{grid}$  为电网交易成本。

#### (1) 初始投资成本

初始投资成本主要由光伏、储能的设备建设成本组成,关系如下:

$$C_{in} = \sum_{i=1}^n N_i c_i^m S_i^r I_{CRF} \quad (2)$$

式中,  $n$  为分布式电源的种类,包括光伏、储能;  $N_i$  为分布式电源的数量;  $c_i^m$  为第  $i$  种电源的投资成本系数;  $S_i^r$  为第  $i$  种电源的额定容量。

$I_{CRF}$  为资金恢复因数,其为:

$$I_{CRF} = \frac{r(1+r)^{Y_i}}{[(1+r)^{Y_i} - 1]} \quad (3)$$

式中,  $Y_i$  为第  $i$  种电源的寿命周期;  $r$  为折现率,取 0.05。

#### (2) 年维护成本

微电网年运维成本主要由各分布式电源的数量、年运维成本系数以及额定容量决定。

$$C_{om} = \sum_{i=1}^n N_i c_i^{om} S_i^r \quad (4)$$

式中,  $c_i^{om}$  为第  $i$  种电源的年运维成本系数。

#### (3) 置换成本

微电网运行一段时间后,设备性能逐渐衰退,将其置换成新的设备产生的费用为置换成本。年置换成本公式如下:

$$C_{re} = \sum_{i=1}^n N_i c_i^{re} S_i^r SFF(r, Y_i) \quad (5)$$

式中,  $c_i^{re}$  为置换成本系数。

$SFF(r, Y_i)$  为偿债基金系数,其为

$$SFF(r, Y_i) = \frac{r}{(1+r)^{Y_i} - 1} \quad (6)$$

#### (4) 电网交易成本

电网交易成本包括购电和售电成本,具体模型如下:

$$C_{grid} = C_{buy} - C_{sell} \quad (7)$$

$$C_{buy} = \int_0^T k_{buy} P_{buy}(t) dt \quad (8)$$

$$C_{sell} = \int_0^T k_{sell} P_{sell}(t) dt \quad (9)$$

式中,  $k_{buy}$ 、 $k_{sell}$  分别为购电、售电时的单位价格;

$C_{buy}$ 、 $C_{sell}$  分别为购电、售电成本;  $P_{buy}$ 、 $P_{sell}$  分别为购电量、售电量。

#### 1.1.2 能源利用率

光伏出力超出负荷需求时,储能设备以及售电也消耗不完多余的能量时,会造成弃光现象。弃电量可以反映出微电网内部的能源利用率,弃电量越少,能源利用率越高。为了提高能源利用率,将其作为目标函数,并引入了弃电量惩罚费用,其具体关系如下:

$$f_2 = C_{excess} \cdot E_{excess} \quad (10)$$

式中,  $C_{excess}$  为单位弃电量惩罚费用;  $E_{excess}$  为超出负荷需求的用电量。

#### 1.1.3 供电可靠性

光伏出力满足不了负荷需求时,储能设备以及购电也满足不了缺额的能量时,会造成缺电,为了维持微电网的稳定运行,引入缺电量惩罚费用,目标函数为:

$$f_3 = C_{unmet} \cdot E_{unmet} \quad (11)$$

式中,  $C_{unmet}$  为单位缺电量惩罚费用;  $E_{unmet}$  为负荷缺电量。

### 1.2 多目标转化为单目标函数

为了保证目标函数的量纲统一,对目标函数  $f_2$  引入一个单位弃电量惩罚费用  $C_{excess}$ ,对目标函数  $f_3$  引入一个单位缺电量惩罚费用  $C_{unmet}$ ,从而方便将多目标函数转化为单目标函数。利用层次分析法确定两个目标的权重系数。

$$\min F = w_1 f_1 + w_2 f_2 + w_3 f_3 \quad (12)$$

式中,  $w_i$  为各目标函数的权重,  $w_i \geq 0$ ,  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ ,权重的大小可以反映各目标函数的重要程度。

### 1.3 约束条件

#### (1) 功率平衡约束

为了保证微电网能够正常运行,需要满足功率平衡约束

$$P_{PV} + P_{bess} + P_{grid} = P_{load} \quad (13)$$

式中,  $P_{PV}$  为光伏电池板输出功率;  $P_{bess}$  为储能放电功率;  $P_{grid}$  为与电网交易功率;  $P_{load}$  为负荷需求功率。

#### (2) 光伏功率约束

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV-max} \quad (14)$$

式中,  $P_{PV-max}$  为光伏的最大输出功率。

#### (3) 储能充放电约束

$SOC$  为剩余容量和储能额定容量的比值,表示当前储能的荷电状态。

$$\begin{cases} SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \\ 0 \leq P_c(t) \leq P_{ch-max} \\ 0 \leq P_d(t) \leq P_{dch-max} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $SOC(t)$  为蓄电池在  $t$  时刻的  $SOC$  值;  $SOC_{min}$ 、 $SOC_{max}$  为  $SOC$  的最小、最大值;  $P_{ch-max}$ 、 $P_{dch-max}$  分别为蓄电池的最大充、放电功率。

#### (4) 购售电功率约束

微电网内部出现功率不平衡时,会与大电网产生交易,但若购电功率过大说明微电网自治能力弱;若售电功率过大,会造成电压波动。因此需要对微电网与大电网交易功率进行约束

$$\begin{cases} P_{buy} \leq P_{grid-max} \\ |P_{sell}| \leq P_{grid-max} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $P_{grid-max}$  为微电网与大电网交易的功率上限。

## 2 模型求解方法

### 2.1 蜜獾算法

作为一种新的全局优化算法,蜜獾算法(Honey badger algorithm, HBA)于2021年提出,它描述了蜜獾的两个捕食阶段:挖掘阶段和寻蜜阶段。这两阶段分别利用蜜獾的嗅觉能力和导蜜鸟的方向接近并获取食物。蜜獾首先定位猎物的大致位置,并通过挖掘阶段的嗅觉能力成功捕获猎物。导蜜鸟能够提供有关蜂巢位置的信息,但它无法获得蜂蜜。因此蜜獾和导蜜鸟之间建立了联系,导蜜鸟带领蜜獾进入蜂巢,蜜獾帮助导蜜鸟打开蜂巢。

### 2.2 HBA 改进策略

#### (1) Bernoulli 混沌映射

对于随机初始化过程,混沌初始化可以提高优

化算法的收敛速度。Bernoulli 映射是由多个分段线性元素组成,这种混沌映射通常会在搜索空间中产生更好的解,并在很大程度上覆盖所有范围,使种群具有遍历均匀性。

#### (2) 分段最优邻域策略

非线性递减的思想最常用于改进粒子群算法(Particle swarm optimization, PSO),引入非线性递减的惯性权重,目的是增强粒子的全局搜索能力。最优邻域策略主要处理最优个体附近有较好个体的情况,因此,在邻域参数中引入了分段非线性递减权重。

#### (3) 横向交叉策略

横向交叉是两个不同父代之间的运算过程,通过交叉产生新的解,从而增强解空间的搜索能力。改进的蜜獾算法(Improved honey badger algorithm, IHBA)具体求解流程如图1所示。

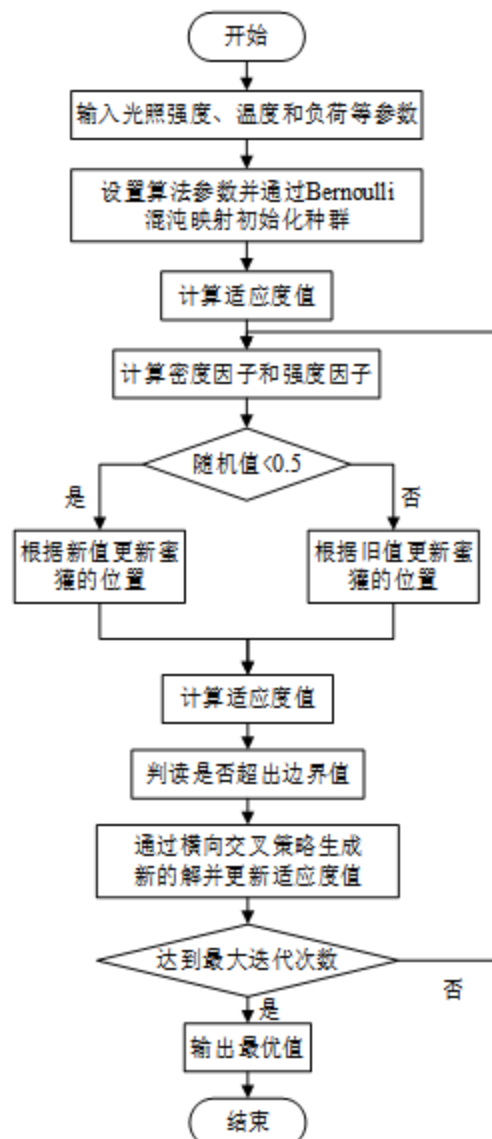


图1 基于IHBA的单井光伏容量优化配置流程图



### 3 算例分析

#### 3.1 系统参数

在实例优化中,本文选取了某油田 2023 年全年 8760h 的光照资源,环境温度以及单井抽油机用电负荷数据。微电网运行周期取 20 年,单位调度时间为 1h,各分布式电源的成本如表 1 所示,储能设备的参数如表 2 所示。微电网根据不同时间用电量不同,采用分时电价如表 3 所示。

表 1 分布式电源成本参数

| 类型  | 投资成本<br>系数/(元<br>/kW) | 年运维成本/<br>(元/kW) | 置换成本系<br>数/(元/kW) | 寿命/<br>年 |
|-----|-----------------------|------------------|-------------------|----------|
| 光伏  | 3200                  | 30               | —                 | 20       |
| 蓄电池 | 2500                  | 10               | 2000              | 5        |
| 储氢罐 | 4000                  | 4.5              | —                 | 20       |

表 2 蓄电池基本参数

| 参数      | 数值   |
|---------|------|
| 荷电状态下限  | 0.2  |
| 荷电状态上限  | 0.9  |
| 蓄电池寿命周期 | 5    |
| 自放电率    | 0.01 |
| 蓄电池充电效率 | 0.9  |
| 蓄电池放电效率 | 0.9  |

表 3 分时电价表

| 时段          | 用电时段 | 电价(元)/kWh |
|-------------|------|-----------|
| 23:00-8:00  | 谷期   | 0.3182    |
| 8:00-12:00  | 峰期   | 0.9164    |
| 12:00-18:00 | 平期   | 0.6104    |
| 18:00-23:00 | 峰期   | 0.9164    |

#### 3.2 结果分析

以各分布式电源的数量为变量,采用 IHBA 算法进行求解,并与 HBA、PSO 以及 BOA 算法进行对比,4 种算法的迭代曲线如图 2 所示,4 种算法的配置结果如表 4、表 5 所示。

从收敛曲线上看,IHBA 算法收敛的最快,在 12 次的时候迭代曲线收敛,BOA 算法收敛的最慢,大约在 88 次的时候达到收敛。从经济性方面看,IHBA 算法的总成本最小,PSO 算法的总成本最高。IHBA 算法的成本分别比 PSO、HBA 和 BOA 算法降低了 10.5、9.2、5.6 万元。

从评价指标自平衡率来看,IHBA 算法与 HBA 算法的自平衡率接近。从能源浪费率来看,IHBA 算法比 HBA 算法降低了 21.79%,比 PSO 和 BOA

分别降低了 52.3%,63.6%。从冗余度来看,IHBA 算法比 HBA 算法降低了 3.9%,比 PSO 和 BOA 分别降低了 2.9%和 10.8%。

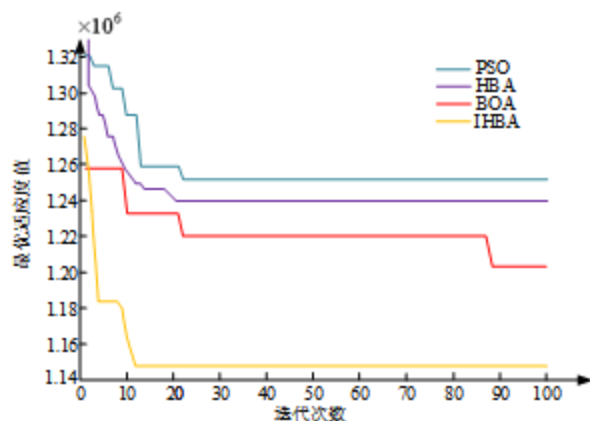


图 2 算法迭代图

表 4 4 种算法的数量配置结果

| 算法   | 光伏/个 | 蓄电池/个 | 储氢罐/个 |
|------|------|-------|-------|
| PSO  | 70   | 20    | 20    |
| BOA  | 60   | 43    | 20    |
| HBA  | 65   | 21    | 20    |
| IHBA | 67   | 20    | 20    |

表 5 4 种算法的成本配置结果

| 算法   | $f_1$  | $f_2$ | $f_3$  | F/万<br>元 | 自平<br>衡率 | 能量<br>浪费<br>率 | 冗余<br>度 |
|------|--------|-------|--------|----------|----------|---------------|---------|
| PSO  | 110.87 | 6.8   | 208.91 | 125.26   | 0.8240   | 0.0459        | 0.0382  |
| BOA  | 90.64  | 8.92  | 120.33 | 120.33   | 0.8161   | 0.0602        | 0.0416  |
| HBA  | 94.52  | 0     | 276.51 | 124      | 0.8361   | 0.0280        | 0.0386  |
| IHBA | 99.31  | 3.24  | 201.86 | 114.77   | 0.8360   | 0.0219        | 0.0371  |

### 4 结论

本文建立以等年值成本、能源利用率和供电可靠性为目标,的单井光伏容量配置模型,通过对目标函数统一量纲处理,将多目标函数转化成单目标函数,采用 IHBA 算法对容量优化模型进行求解,将得到的结果与 HBA、BOA 和 PSO 算法进行比较,得到以下结论。

(1) 提出的混沌映射、引入分段非线性递减参数、横向交叉策略来改进蜜獾算法,通过与 HBA、PSO、BOA 算法进行对比,IHBA 具有更好的收敛性和稳定性。

(2) 改进的 IHBA 的求解精度更高以及收敛速度更快,采用 IHBA 对容量优化模型进行求解,配置结果的总成本比改进前降低了 7.44%。

## 参考文献

- [1] 李聪, 蔡立军. 基于改进粒子群算法的混合储能独立调频的容量优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 426-434.
- [2] 马纪梅, 张欣彤, 张政林, 等. 基于改进麻雀搜索算法的微网容量优化配置[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 76-82.
- [3] 孟凡斌, 周静, 张霄, 等. 基于改进 FPA-LHS 算法的并网型微电网容量优化配置研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(10): 45-51.
- [4] 王欣, 谭永怡, 蔡斌. 基于改进 MOGOA 的风储容量优化配置研究[J/OL]. 电力科学与技术学报: 1-10[2023-06-07].
- [5] 韩莹, 于三川, 等. 计及阶梯式碳交易的风光氢储微电网低碳经济配置方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2523-2533.
- [6] 严凤, 邢欢, 马晓丰, 等. 微网中分布式电源容量的优化配置[J]. 电测与仪表, 2016, 53(19): 83-87.
- [7] SHEN Dingcai, HU Shengzhou. Particle swarm dynamic optimization algorithm based on neighbor search[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40(5): 628-632.
- [8] ZHANG Ping, LU Xia, MENG Qinghe. Microgrid capacity optimization configuration based on multi-strategy sparrow search algorithm[J]. Electrical Technology, 2023, 24(1): 1-9.
- [9] 徐培真. 基于多源微电网的优化配置研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2021.
- [10] 唐文东. 并网型风/光/储微电网容量优化配置与经济优化运行研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于 PCA 的改进 SVDD 的风电机组故障检测

关帅<sup>1</sup>, 刘莉<sup>1</sup>, 钱小毅<sup>1</sup>

(1. 辽宁省电网节能与控制重点实验室, 沈阳工程学院, 沈阳, 110136)

## Fault detection of wind power variable pitch system based on PCA improved SVDD

Shuai Guan<sup>1</sup>, Li Liu<sup>1</sup>, Xiaoyi Qian<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Energy Saving and Controlling in Power System of Liaoning Province, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, 110136)

**ABSTRACT:** With the increasing installed capacity of wind power, the fault diagnosis and prediction of wind power units can be realized, which is of great significance for the safe, stable and economic operation of wind power units. The anomaly detection performance of support vector data description (SVDD) algorithm is greatly affected by model parameters and feature quality. A new abnormal data detection method based on principal component analysis (PCA) combined with improved SVDD is proposed. Firstly, PCA is used to analyze the data and automatically extract the feature vector composed of principal components which have great influence on the detection performance. Then, SVDD is used to construct a class of classifier to realize the automatic detection of abnormal data, and SVDD kernel parameter  $\sigma$  and penalty factor  $C$  are optimized to improve the performance of the algorithm. The proposed detection method of PCA combined with improved SVDD (PCA+SVDD) can obtain better anomaly detection performance than the traditional method.

**KEY WORDS:** wind turbine; Support vector data description (SVDD); Principal component analysis (PCA)

**摘要:** 在日益增加的风电装机量, 能够实现风电场中风电机组的故障诊断与预测, 对于风电机组的安全、稳定、经济运行具有重要意义。支持向量描述(support vector data description, SVDD)算法的异常检测性能受模型参数和特征质量影响较大, 为此, 提出一种主分量分析(principal component analysis, PCA)联合改进 SVDD 的异常数据检测方法。首先利用 PCA 对数据进行分析, 自动提取对检测性能影响较大的主分量构成特征向量; 然后利用 SVDD 构造一类分类器, 实现异常数据自动检测, 对 SVDD 核参数  $\sigma$  和惩罚因子  $C$  进行优化, 提升算法性能。所提出的 PCA 结合改进 SVDD (PCA+SVDD) 的检测方法相对于传统方法能够获得更优的异常检测性能。

**关键词:** 风电机组; 支持向量数据描述(SVDD); 主成分分析(PCA)

## 0 引言

故障检测技术主要分为基于模型和基于数据驱动的方法, 基于模型的风电故障检测技术主要依赖于对风电系统的深入理解和精确的物理模型。这类方法通过建立风电机组的数学模型, 结合系统的运行数据, 通过模型仿真和实际运行数据的对比分析, 来判断风电机组是否存在故障。S. Simani, C 等人提出了一种基于模型的方法, 用于风力涡轮机的故障检测, 特别强调了模型在捕捉风电系统动态行为中的作用, 并通过实际案例展示了其有效性<sup>[1]</sup>。

基于数据驱动的故障检测方法可以根据其工作原理和应用领域的不同, 大致分为基于统计模型的故障检测、基于机器学习的故障检测、基于深度学习的故障检测。Zhang 提出了一种基于 Z-Score 置信区间的风力发电机齿轮箱故障诊断方法, 并对不确定性进行了分析。该方法利用 Z-Score 统计量对振动数据进行异常检测, 并通过不确定性分析提高了故障诊断的可靠性<sup>[2]</sup>。

支持向量数据描述<sup>[3]</sup> (SVDD) 是一种适用于单类分类问题的方法, 在风电故障检测中有重要应用。通过结合机器学习或深度学习技术, 可以进一步提升故障检测的准确性和鲁棒性, 为风电行业提供灵活可靠的解决方案。尽管 SVDD 表现出色, 但仍存在一些局限性, 如参数敏感性、对非球形数据的挑战以及处理大规模数据集的难度<sup>[4]</sup>。

## 1 SVDD

### 1.1 SVDD 原理

SVDD 提供了一种基于数据描述的方法, 它在特征空间中寻找一个最小的球体<sup>[5]</sup>, 将大部分正常数据包围起来, 任何不在这个球体内的点都被视为异常。

SVDD 算法是对正常数据区域进行描述,从而实现单类数据进行建模实现样本分类<sup>[6]</sup>的方法,该方法的超球体模型由球心  $a$  和超球半径  $R$  确定,给定训练数据  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , SVDD 超球体模型满足如下优化问题

$$\begin{cases} \min R^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i \\ s.t. \|x_i - a\|^2 \leq R^2 + \xi_i, \xi_i \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,引入松弛变量<sup>[7]</sup>  $\xi_i$  表示允许一些训练样本位于超球体之外;惩罚参数<sup>[8]</sup>  $C$  控制超球体体积和落于超球体外部的样本数量之间的平衡。引入拉格朗日乘子  $\alpha_i \geq 0$ 、 $\beta_i \geq 0$  将式子中的约束进行合并,并将该式转换为

$$L(R, a, \alpha_i, \beta_i, \xi_i) = R^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i - \sum_{i=1}^n \alpha_i \{R^2 + \xi_i - (\|x_i\|^2 - 2agx_i + \|a\|^2)\} - \sum_{i=1}^m \beta_i \xi_i \quad (2)$$

$L$  应相对于  $R$ 、 $a$  和  $\xi_i$  最小化,而相对于  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  最大化,式子(2)分别对  $R$ 、 $a$  和  $\xi_i$  求偏导等于0,将式子改写为  $\alpha_i = C - \beta_i$ ,由于  $\alpha_i \geq 0, \beta_i \geq 0$ ,因此可以移除拉格朗日乘子  $\beta_i$  可得

$$0 \leq \alpha_i \leq C \quad (3)$$

因此

$$L = \sum_{i=1}^n \alpha_i (x_i g x_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j (x_i g x_j) \quad (4)$$

最大化能够得到拉格朗日乘子  $a$  的解。在满足约束下,当一个数据样本  $x_i$  满足不等式

$\|x_i - a\|^2 < R^2 + \xi_i$ , 对应的拉格朗日乘子  $\alpha_i$  值为0;而当  $x_i$  满足等式  $\|x_i - a\|^2 = R^2 + \xi_i$ , 对应拉格朗日乘子  $\alpha_i$  的值大于0,即

$$\begin{cases} \|x_i - a\|^2 < R^2 \rightarrow \alpha_i = 0 \\ \|x_i - a\|^2 = R^2 \rightarrow 0 < \alpha_i < C \end{cases} \quad (5)$$

从式子可以看出,只有当  $\alpha_i > 0$  时对应的训练样本对  $a$  起作用,其被称为支持向量  $x_{sv}$ 。测试样本  $z$  为正常时满足

如果  $\|z - c\|^2 > R^2$ , 则数据  $z$  位于超球体外,可判断其为异常值;

如果  $\|z - c\|^2 \leq R^2$ , 则数据  $z$  位于超球体内,可判断其为正常值。

## 1.2 PCA-SVDD

PCA 是一种有效的多元统计算法,广泛用于降维和特征提取。主成分分析将一组相关变量转化为一组互不相关或正交的新变量。给定一个训练数据矩阵  $X$ ,根据 PCA 方法可以将其分成两个子空间,如式(9)所示,

$$X = TP^T + E = TP^T + PP^T \quad (6)$$

其中,  $T$  和  $P$  分别是主成分子空间中的得分矩阵<sup>[9]</sup>和载荷矩阵<sup>[10]</sup>。 $E$  是残差矩阵,可以进一步分解为两部分,在残差子空间 ( $Rs$ ) 中的残差得分矩阵  $\hat{P}$  和残差载荷矩阵  $\hat{P}^T$ 。得分矩阵  $T$  和残差得分矩阵  $\hat{P}$  分别是数据矩阵  $X$  在主成分子空间和残差子空间中的表示。载荷矩阵  $P$  确定了训练数据矩阵  $X$  与对应的得分矩阵  $T$  之间的投影关系。而残差载荷矩阵  $\hat{P}$  确定了训练数据矩阵  $X$  与对应的残差得分矩阵  $\hat{P}$  之间的投影关系。

$$z = \hat{z} + \mathcal{Y} \quad (7)$$

$\hat{z}$  是主成分子空间中的模型部分,  $\mathcal{Y}$  是残差子空间中的非模型部分。主成分子空间具有捕获过程系统变化的潜力,而残差子空间则代表着随机噪声甚至一些异常信息。正如方程(11)和(12)所示,基于主成分分析理论,构建了两个统计量  $T^2$  和  $Q$ ,分别用于故障检测。

$$T^2 = z^T P \Lambda_k P^T z \leq T_{\alpha} \quad (8)$$

$$Q = \|\mathcal{Y}\|^2 = z^T P P^T z \leq Q_{\alpha} \quad (9)$$

$\Lambda_k$  是对应于前  $k$  个主成分的特征向量矩阵。确定数字  $k$  的方法是将前  $k$  个主成分的累积百分比方差 ( $CPV$ ) 达到预先设定的 85% 限制。在方程中,  $T_{\alpha}$  是在高斯分布条件假设下  $T^2$  统计量的阈值。

$$T_{\alpha} = \left( \frac{(n^2 - 1)k}{n(n - k)} \right) F_{\alpha}(k, n - k) \quad (10)$$

$F_{\alpha}(k, n - k)$  表示自由度为  $n$  和  $(n - k)$  的

Fisher-Snedecor 分布的临界值,其中  $\alpha$  是显著性水平。

## 2. 实验验证与分析

### 2.1 实验数据

本文的实验数据来自于美国国家能源实验室 (National renewable energy laboratory, NREL) 的 5MW 海上风电机组和金风 GW77-1.5MW 风力发电机的数据。在预先设定的时间间隔内,通过 SimuLink 仿真,分段模拟兆瓦级风力发电机常见

的 6 种传感器故障。

表 1 故障说明

| 故障数量 | 故障位置      | 故障类型 | 危害程度 |
|------|-----------|------|------|
| 故障 1 | 叶片根部弯矩传感器 | 比例偏差 | 低    |
| 故障 2 | 加速度传感器    | 数据偏移 | 中    |
| 故障 3 | 电机转速传感器   | 比例偏差 | 高    |
| 故障 4 | 变桨角度传感器   | 卡死   | 高    |
| 故障 5 | 发电机功率传感器  | 比例偏差 | 中    |
| 故障 6 | 低速位置编码器   | 微小误差 | 低    |

通过对比测试过程对正常运行状态的误报率和对异常状态的漏报率验证本文所提方法的有效性，其中误报率和漏报率的计算公式如下：

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (11)$$

其中， $FP$  代表假阳性 (False Positives)，即实际为负样本但被错误地预测为正样本的数量； $TN$  代表真阴性 (True Negatives)，即实际为负样本且被正确地预测为负样本的数量

$$FNR = \frac{FN}{FN + TP} \quad (12)$$

其中， $FN$  代表假阴性 (False Negatives)，即实际为正样本但被错误地预测为负样本的数量； $TP$  代表真阳性 (True Positives)，即实际为正样本且被正确地预测为正样本的数量。

## 2.2 实验结果分析

风电机组工作环境恶劣、运行状态复杂多变，运行状态数据存在容量巨大，特征之间关联性强，并且存在大量的相似点、噪声点和异常点。因此在采用数据挖掘方法进行故障诊断方法研究之前需要对数据进行数据清洗，尽量剔除数据中的“坏数据”，进而更加有效的从数据中挖掘出有用信息。

表 2 方法对比

| 方法       | FPR / % | FNR / % |
|----------|---------|---------|
| KPCA     | 70      | 60      |
| SVDD     | 65      | 48      |
| PCA-SVDD | 45      | 36      |

故障检测判断风电机组运行数据是否在正常运行范围内，即利用已建立的故障模型对测试数据进行验证。

### 2.2.1 正常数据的测试结果

采用  $K_{pca}$ ,  $SVDD$ ,  $PCA-SVDD$  三种方法对风电机组的正常运行数据进行检测。下图展示了三种方法在测试数据集下的正常数据时的  $FAR$ 。与传统的

$SVDD$  和  $K_{pca}$  相比方法  $PCA-SVDD$  的训练数据集和测试数据集的  $FAR$  的值降低。

### 2.2.2 故障测试数据的测试结果

采用  $K_{pca}$ ， $SVDD$ ， $PCA-SVDD$  方法对测试数据集中的 6 个典型故障的故障数据进行测试，结果如下图所示。显然当使用以上三种方法的时候，随着故障严重程度的增加，准确率也随之增加。然而，对于各种故障， $PCA-SVDD$  方法具有最好的检测精度。

$PCA-SVDD$  在特征空间中反映训练数据的全局密度分布，在特征空间中建立了一个能更好的描述数据密度分布特征的超球体，从而获得更精准的模型，提高了检测性能。

### 2.2.3 结果分析

$K_{pca}$ ， $SVDD$ ， $PCA-SVDD$  通过构建模型，然后利用正常测试数据进行检测。与  $SVDD$  方法相比， $PCA-SVDD$  的方法降低了左右。因此，该改进可以有有效的降低检测过程中的  $FAR$ 。

相比之下，在各种故障， $PCA-SVDD$  的准确率比其他方法基本超过了与  $SVDD$  方法相比，检测准确率都分别又不同程度的提高。

严重程度越低，故障数据和正常数据之间的本身相似度越高。因此，难以在低严重程度下检测故障。然而， $PCA-SVDD$  所提出的方法仍然实现了良好的检测性能。这主要是因为  $SVDD$  方法没有考虑训练数据密度分布。 $PCA-SVDD$  方法首先将训练数据映射到高维特征空间，然后为每个训练数据匹配相应全局密度权重，以适当地反映训练数据在特征空间中的密度分布。然后获得能够更好地描述训练数据分布的超球面。

$PCA-SVDD$  方法是从训练数据密度的角度考虑的，该方法是基于对特征空间中训练数据的全局考虑，根据训练数据的质心点反映数据的密度分布。因此，即使数据高度离散化，也能够取得良好的性能。本文在数据模型训练数据中即构建超球面时，使用的是多种工况下的正常数据，因此数据高度离散化。所以，相较于其他两种方法  $PCA-SVDD$  方法具有更好的性能。

## 3. 总结

作为一种经典的异常检测算法， $SVDD$  的性能受核参数和惩罚因子影响较大，并且在面对高维复杂数据时存在运算量大、实时性差的问题。本文将  $PCA$  与  $SVDD$  相结合，提出一种改进的异常数据检测方法。首先利用  $PCA$  对高维数据进行特征提取和降维，从而提升  $SVDD$  的运算效率；然后  $SVDD$

针对模型参数选择问题, 对其优化, 自动确定最优模型参数, 基数据集和用户异常数据检测问题开展试验, 结果表明所提方法能够有效实现异常数据检测, 并且相对于对比方法具有更高的异常检测性能, 具有较好的应用前景。

## 参考文献

- [1]刘文静, 谢彦红, 李元. 基于 NND-PCASVDD 的多模态工业过程故障检测[J]. 沈阳化工大学学报, 2019, 33(03): 263-269.
- [2]Zhang, Y., Luo, R., Liu, X., & Zhang, Y. (2019). Wind turbine gearbox fault diagnosis based on Z-Score confidence interval with uncertainty analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(11), 9662-9672.
- [3]龙震, 杨婷, 徐劭辉, 等. 基于数据驱动的风电机组状态监测与故障诊断技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 55-69.
- [4]Li, Y., Liu, J., Wang, L., & Wang, X. (2019). Anomaly detection and fault diagnosis for rotating machinery using kernel density estimation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 130, 213-227.
- [5]赖思银. 基于 PCA 和改进 SVDD 的异常检测算法[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(08): 129-132.
- [6]Jin, J., & Yi, H. (2019). Fault diagnosis of wind turbines based on a deep convolutional neural network. *Energies*, 12(3), 518.
- [7]郑楠, 于广亮, 刘娟楠, 等. 一种基于 SVDD 和 PCA 的风机故障诊断方法[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(11): 143-146.
- [8]Yu, H., Yu, D., Liao, B., & Xu, J. (2021). Research on marine engine fault diagnosis method based on decision tree algorithm. *IEEE Access*, 9, 16826-16835.
- [9]马良玉, 程善珍. 基于支持向量数据描述和 XGBoost 的风电机组异常工况预警研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3241-3249. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210625.
- [10]方立华. 基于振动特征的风电机组传动系统机械故障诊断研究[D]. 东北电力大学, 2018.



收稿日期: 2024-06-15。

作者简介:

关帅(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为数据驱动故障诊断, E-mail: 1837863446@qq.com;

刘莉(1963), 女, 教授, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制等。

关帅



文章编号: 中图分类号: 文献标志码: 学科代码:

# 含直驱风电场电力系统的暂态功角稳定性研究

熊瑶

(1. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

## Research on transient power angle stability of power systems with direct drive wind farms

Xiong Yao<sup>1</sup>

(1. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** With the increasing proportion of wind power generation in the power system, the research on transient power angle stability of power systems containing wind farms cannot be ignored. Therefore, based on the EEAC method, this paper analyzes the transient power angle stability of power systems containing grid following direct drive wind turbines (GFL-PMSG) and grid building direct drive wind turbines (GFM-PMSG). Firstly, simulation analysis was conducted on the transient output active external characteristics of PMSG; Secondly, based on the EEAC method and node contraction matrix equivalence, the equivalent rotor motion equation of a multi machine system containing wind power was constructed. Through mechanism analysis, it was found that the impact of wind turbine grid connection on system power angle stability is mainly reflected in its active external characteristics; Finally, the impact of GFL-PMSG and GFM-PMSG integration on the power angle stability of synchronous machines in the system was analyzed, as well as the influence of different control parameters. A dual machine system simulation model was built in PSCAD/EMTDC to verify the correctness of transient stability mechanism analysis.

**KEY WORDS:** transient power angle stability; grid type direct drive fan; EEAC

**摘要:** 随着风力发电占电力系统比例的不断提高, 含风电场电力系统的暂态功角稳定性研究不容忽视, 为此, 本文基于 EEAC 方法, 分析了含跟网型直驱风机(GFL-PMSG)和构网型直驱风机(GFM-PMSG)电力系统的暂态功角稳定性。首先, 对 PMSG 的暂态输出有功外特性进行了仿真分析; 其次, 根据 EEAC 方法和节点收缩矩阵等效, 构建了含风电的多机系统等效转子运动方程, 通过机理分析可知风机并网对系统功角稳定性影响主要体现在其有功外特性; 最后, 分析了 GFL-PMSG 和 GFM-PMSG 接入对系统中同步机功角稳定性的影响, 以及不同控制参数的影响, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建双机系统仿真模型, 验证暂态稳定机理分析的正确性。

**关键词:** 暂态功角稳定性; 构网型直驱风机; EEAC

## 0 引言

随着风力发电占电力系统比例的不断提高, 风力发电的随机性、间歇性和出力波动性, 使风电场接入对电力系统原有的暂态稳定造成极大影响。所以有必要对含风电场的电力系统暂态功角稳定性进行理论分析研究。

根据同步机制的不同, 风机一般可分为电网跟踪型和电网构造型两种控制方式。已有不少文献对跟网型风电场接入电力系统对暂态功角稳定性展开了具体研究。文献[1]采用风电场等效导纳模型和扩展等面积定则, 提出一种有利于系统暂态稳定性的最佳风电接入比例分析方法; 文献[2]将两机系统转化为单机无穷大系统, 推导出风机接入前后  $P_m$  与  $P_e$  关于  $\delta$  的表达式, 提出一种判断风电接入对两机系统暂态功角稳定影响的判据: 故障阶段两同步机功角差的第一摆幅值; 文献[3]在文献[2]所提方法的基础上分析了风电渗透率、风电场选址及风电机组类型等因素对系统功角稳定的影响。文献[4]-[5]对比分析了采用不同低电压穿越方案时对单机无穷大系统暂态功角稳定性的影响, 提出恰当的控制参数选择有利于系统的暂态稳定性; 文献[6]结合扩展等面积定则分析了带有虚拟惯量控制的双馈风机并网对电力系统暂态功角稳定的影响机理。

和电流源型控制的风机相比, 构网型风机有着不同的控制策略和外特性, 与电网的交互机理也不同。目前文献着重于分析其自身的暂态功角稳定性, 文献[7]借鉴同步发电机的暂态稳定分析方法, 讨论了 VSG 的暂态稳定性; 文献[8]-[9]采用相平面法和扩展等面积法对 VSG 暂态稳定性及其边界条件进行理论分析, 提出一种电网故障期间自适应调节有功功率参考值的暂态控制策略, 提高系统暂态稳定裕度。但 VSG 并网同样对系统中同步机稳定性造成了一定影响, 在研究 VSG 自身暂态功角稳

定性的同时,也应考虑其并网对系统暂态稳定性的影响研究。文献[10]在在 2 区域 4 机系统中通过 VSG 等容量替换同步机电源,分析了 VSG 接入比例、并网位置、故障类型等因素对系统暂态功角稳定性的影响,表明 VSG 的接入有利于系统的暂态功角稳定性,但该结论仅通过仿真结果得出,缺乏相应的理论推导过程。

本文采用风电场等效导纳模型,基于扩展等面积法分析了含风机的双机系统等效转子运动方程,得出 PMSG 并网对系统同步机的影响主要取决于 PMSG 的有功外特性;并对 GFL-PMSG 和 GFM-PMSG 功率响应外特性进行了分析研究;然后分析了 GFM-PMSG 和 GFM-PMSG 接入对系统同步机间功角稳定性影响机理以及不同控制参数的影响。最后通过时域仿真验证了理论分析的正确性。

## 1 含风机系统的等效转子运动方程

本文采用 EEAC 进行暂态功角稳定性分析,并为了简化分析,直接对风机并网的扩展双机系统进行分析。

发电机 SG<sub>1</sub> 和 SG<sub>2</sub> 有转子运动方程:

$$\begin{cases} \frac{M_1}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1} \\ \frac{M_2}{\omega_0} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别为机组 SG<sub>1</sub> 和 SG<sub>2</sub> 的转子角;  $P_{m1}$ 、 $P_{e1}$ 、 $P_{m2}$ 、 $P_{e2}$  分别为 SG<sub>1</sub> 和 SG<sub>2</sub> 的机械功率和电磁功率;  $P_{e1}$  和  $P_{e2}$  的表达式可写为:

$$\begin{cases} P_{e1} = E_1'^2 G_{11} + E_1' E_2' (G_{12} \cos \delta + B_{12} \sin \delta) \\ P_{e2} = E_2'^2 G_{22} + E_1' E_2' (G_{12} \cos \delta - B_{12} \sin \delta) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $E_1$ 、 $E_2$  为节点 1、2 的内电势;  $G_{12}$  为节点 1、2 间的电导;  $B_{12}$  为节点 1、2 间的电纳;  $\delta$  为同步发电机 SG<sub>1</sub> 和 SG<sub>2</sub> 间的相对功角差,  $\delta = \delta_1 - \delta_2$ 。

进一步对双机系统作单机无穷大系统等值,等值后的单机转子角即为  $\delta$ , 单机系统惯性时间常数为:

$$M = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \quad (3)$$

可得双机系统的等效转子运动方程为:

$$\frac{M}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = (P_m - P_e) - P_{\max} \sin(\delta + \gamma) \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_m = \frac{M_2 P_{m1} - M_1 P_{m2}}{M_1 + M_2} = \text{const} \\ P_e = \frac{M_2 E_1'^2 G_{11} - M_1 E_2'^2 G_{22}}{M_1 + M_2} = \text{const} \\ P_{\max} = \sqrt{C^2 + D^2} \\ \gamma = -\arctan(C / D) \\ C = \frac{M_2 - M_1}{M_1 + M_2} E_1' E_2' G_{12} \\ D = E_1' E_2' B_{12} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P_m$ 、 $P_e$  分别为系统的机械功率和电磁功率。

风电场接入使系统潮流分布发生改变,引起同步机并网节点电压幅值和相角变化,从而改变整个系统内同步机的功角稳定性。为了便于暂态功角稳定性分析,体现 PMSG 引入的注入功率特性,本文将 PMSG 功率外特性等效为并连接地导纳模型<sup>[1]</sup>,如式(6)所示。

$$y_w = -\frac{P_w}{U_w^2} + j \frac{Q_w}{U_w^2} = -G_w + jB_w \quad (6)$$

其中,  $P_w$ 、 $Q_w$  分别为 PMSG 输出的有功、无功功率;  $U_w$  为风机并网点电压;  $y_w$  为风电场暂态等效模型的接地导纳;  $G_w$ 、 $B_w$  分别为等效电导、电纳。

在分析含风机的系统转子运动方程时,可通过节点矩阵收缩处理,将风机并网节点所包含的注入功率信息等效到系统同步机节点导纳矩阵中,即将 PMSG 对同步机影响转化为同步机之间的电气联系,转化为上述同步机系统等效转子运动方程的研究<sup>[11]</sup>。

则 PMSG 并网后 SG<sub>1</sub> 同步机电磁功率可写作:

$$\begin{aligned} P_{e1} &= E_1'^2 (G_{11} + \Delta G_{11}) \\ &+ E_1' E_2' [(G_{12} + \Delta G_{12}) \cos \delta + (B_{12} + \Delta B_{12}) \sin \delta] \\ &= E_1'^2 [G_{11} - h(G_w)] + E_1' E_2' (G_{12} \cos \delta + B_{12} \sin \delta) \end{aligned} \quad (7)$$

将其代入不含风机的等效转子运动方程中,进一步整理,可得到含风电的多机系统等效转子运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{M}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= (P_m - P_e + \Delta P_c) - P_{\max} \sin(\delta + \gamma) \\ &= P_{m12} - P_{e12} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\Delta P_c = \frac{M_2}{M_1 + M_2} E_1'^2 h(G_w) \quad (9)$$

式中,  $\Delta P_c$  为同步机电磁功率的变化量,可看作  $G_w$  的单调递增函数  $h(G_w)$ 。为了便于分析,将  $\Delta P_c$  归算到等值机械功率部分,  $P_{e12}$ 、 $P_{m12}$  为并入风电场后的系统等效电磁功率和机械功率。

通过 EEAC 进行系统分析所得等效转子运动方程可见, PMSG 并网对系统同步机的影响主要体现在 PMSG 等效电导  $G_w$ , 即 PMSG 注入有功功率的多少。

## 2 PMSG 暂态有功外特性

### 2.1 有功响应特性对比和影响因素分析

在大扰动故障发生期间, GFL-PMSG 功率控制切换至电压支撑模式优先控制无功功率。并且由于电力电子设备过流能力较差, 需要通过限流手段将短路电流限制在 1.1~1.3 倍额定电流范围内。因此当 GFL-PMSG 短路电流达限流值时, 其输出有功外特性主要与限流值和无功电流支撑系数有关。

典型 VSG 有功控制的核心思路是通过模拟同步机转子运动方程, 以在一定程度上模拟同步机的有功响应特性, 可以通过以下公式进行描述<sup>[12]</sup>:

$$J \frac{d\omega_{vsg}}{dt} = P_{ref} - P_e - D(\omega_{vsg} - \omega_0) \quad (10)$$

$$\frac{d\theta_{vsg}}{dt} = \omega_{vsg} - \omega_0 \quad (11)$$

式中,  $P_{ref}$  和  $P_e$  分别为 GFM-PMSG 有功功率指令值和输出的有功功率;  $\omega_{vsg}$  和  $\omega_0$  分别为 GFM-PMSG 输出的转子角速度和角速度的额定值,  $J$  和  $D$  分别为转子惯量系数及阻尼系数;  $\theta_{vsg}$  为 GFM-PMSG 功角。

可知在正常运行方式下, VSG 控制不改变 PMSG 输出外特性, 即此时 GFM-PMSG 等效模型与 GFL-PMSG 等效模型相同; 在机端母线电压跌落导致系统频率升高时, 由于 VSG 功率控制环, GFM-PMSG 输出有功功率降低, 以抑制频率的升高, 相应的改变了故障期间 GFM-PMSG 输出有功外特性, 从而影响系统的暂态功角稳定性。

由式(10)可知在  $P_{ref}$  不变情况下, VSG 有功控制环主要与控制参数转子惯量系数  $J$  和阻尼系数  $D$  有关, 因此在分析 GFM-PMSG 输出有功外特性时可额外考虑  $D$ 、 $J$  的影响。

### 2.2 有功响应特性仿真对比

为比较 GFL-PMSG 和 GFM-PMSG 的暂态有功响应特性, 本节基于 RTDS 实时仿真平台进行实验验证, 平台如图 1 所示。搭建 PMSG 单机并网模型。

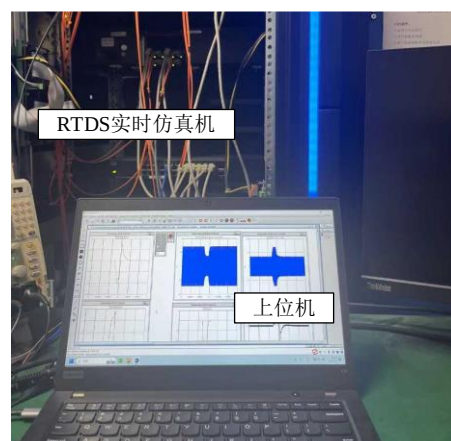


图 1 基于 RTDS 的实时仿真平台

Fig. 1 Real time simulation platform based on RTDS

设置  $P_{ref}=0.6\text{p.u.}$ , 故障时电网电压跌落至  $0.5\text{p.u.}$ , 持续  $0.5\text{s}$ 。GFL-PMSG 和 GFM-PMSG 暂态有功响应特性如图所示:

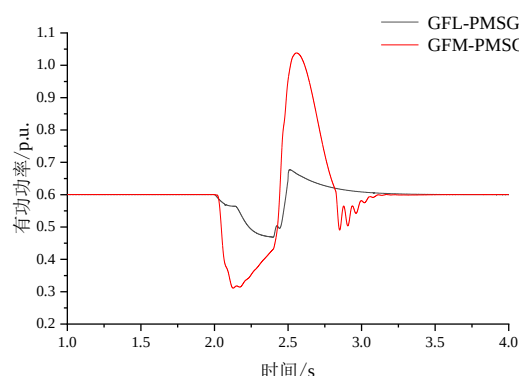


图 2 不同类型 PMSG 有功外特性曲线

Fig. 2 Active external characteristic curves of different types of PMSG

可见对比 GFL-PMSG, GFM-PMSG 在电压跌落时刻能瞬时响应, 并输出更少的有功功率。

## 3 含 PMSG 电力系统暂态功角稳定性机理分析

根据式 EEAC 理论可知, 电力系统的暂态功角稳定性由系统等效转子运动方程中的等效功角表示, 其值由系统的等值机械功率和电磁功率决定。

由式(8)可知当风机并网时, 给等值机械功率带来了  $\Delta P_c$  的变化量。并且由第一章分析可知, 当风机采用 VSG 控制, 对比 GFL-PMSG, 在故障期间电压跌落系统频率上升时, 输出有功功率减少,  $\Delta G_{ij}$  减小, 最终导致  $\Delta P_c$  减小。用系统等效机械功率可表示为:

$$\begin{cases} P_{mSA} = P_{mSA} - P_e \\ P'_{mSA} = P_{mSA} - P_e + \Delta P_c \\ P''_{mSA} = P_{mSA} - P_e + \Delta P_c - \Delta P_e \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P_{mSA}$ 、 $P'_{mSA}$ 、 $P''_{mSA}$  分别为风机未接入、GFL-PMSG 接入、GFM-PMSG 接入系统的等效电磁功率。易知:

$$P_{mSA} < P''_{mSA} < P'_{mSA} \quad (13)$$

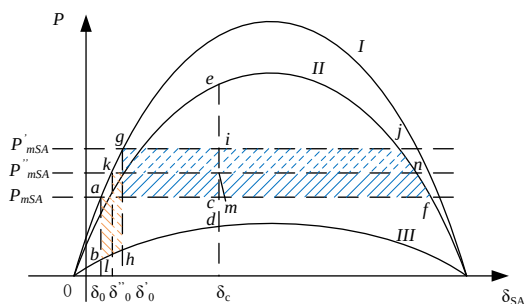


图3 含PMSG系统的等值  $P-\delta$  曲线  
Fig. 3 Equivalent  $P-\delta$  curve of PMSG system

图3画出了系统的等值  $P-\delta$  曲线, 其中曲线I、II和III分别为故障前、故障时和故障后的系统等值电磁功率曲线,  $\delta_0''$ 、 $\delta_0'$ 、 $\delta_0''$ 、 $\delta_0''$  分别为风机未接入、GFL-PMSG 接入、GFM-PMSG 接入后的初始运行角;  $\delta_c$  为故障切除角。

可以看出, 在风机未接入时, 等效后同步机加速面积是  $S_{abcd}$ , 最大减速面积是  $S_{ecf}$ ; 当常规跟网型风机接入时, 加速面积是  $S_{ghid}$ , 最大减速面积是  $S_{eij}$ ; 在 GFM-PMSG 接入时, 加速面积是  $S_{kmld}$ , 最大减速面积是  $S_{emn}$ , 易知:

$$\begin{cases} S_{ghid} > S_{kmld} > S_{abcd} \\ S_{ecf} > S_{emn} > S_{eij} \end{cases} \quad (14)$$

可以得出结论, 无论是 GFL-PMSG 还是 GFL-PMSG 的并网, 都会使系统等效加速面积增加, 最大减速面积减小, 对系统暂态功角稳定性产生了不利影响; 而 GFM-PMSG 对比 GFL-PMSG 接入系统, 等效加速面积减小更多, 最大减速面积增大更多, 所以风机采用构网型控制更有利于系统暂态功角稳定性。

## 4 算例仿真

### 4.1 算例描述

为了验证上文理论分析的正确性, 本文基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建如图4所示的含直驱风电场和2台同步发电机的扩展双机系统模型。其中同步发电机  $SG_1$  为机组1, 额定功率为 120MW;  $SG_2$  为机组2, 额定功率为 75MW; 直驱风电场由 PMSG 等值模型表示, 单台额定功率为 5MW, 从节点3接入系统; 节点5和节点6之间的传输线路为双回线L。设置线路L一回线发生三相对称短路。

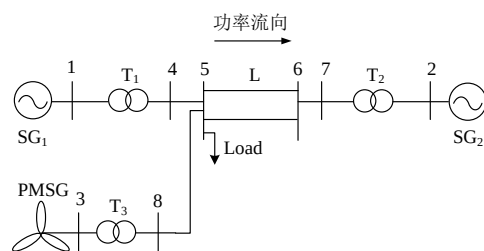


图4 扩展双机系统模型

Fig. 4 Extended Dual Machine System Model

PMSG 网侧变流器分别采用典型跟网型控制策略和采用 VSG 控制的典型构网型控制策略, 即 GFL-PMSG 和 GFM-PMSG。

### 4.2 PMSG 接入对暂态功角稳定性的影响

设置 10 台 GFL-PMSG 并网, 即接入比例约为 20%。设置三相短路故障 10s 开始, 持续时间 0.2s, 图 5-6 为发生故障后 GFL-PMSG 和 GFM-PMSG 的有功外特性曲线、同步机  $SG_1$  和  $SG_2$  之间的功角曲线。

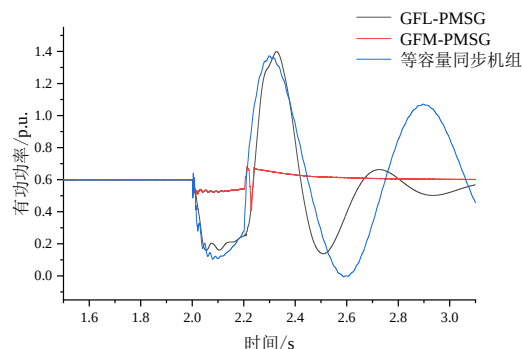


图5 不同类型机组有功外特性曲线

Fig. 5 Active external characteristic curves of different types of units

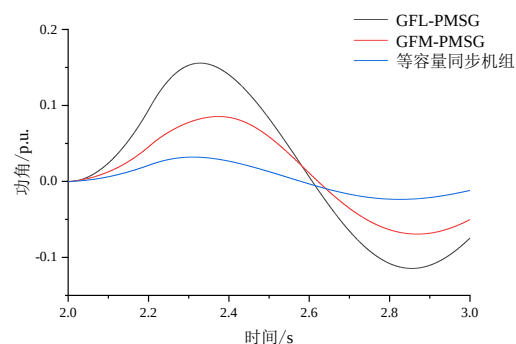


图6 不同类型机组对系统暂态功角影响对比

Fig. 6 Comparison of the impact of different types of units on the transient power angle of the system

从上述仿真结果可知, 风电场并网后系统暂态功角失稳主要是风电场有功外特性导致的。在功角首摆期间, GFM-PMSG 对比 GFL-PMSG 减少更多的有功出力, 改良了系统中同步机间的暂态功角稳定性; 但和等容量同步机并网对比, GFM-PMSG 和 GFL-PMSG 并网仍恶化了系统暂

态功角稳定性。

#### 4.2 PMSG 接入比例的影响

不改变故障工况, 改变风机接入系统比例分别为 0、10%、30%、50%、70%。得到 GFL-PMSG 和 GFL-PMSG 并网后系统同步机功角响应曲线如下。

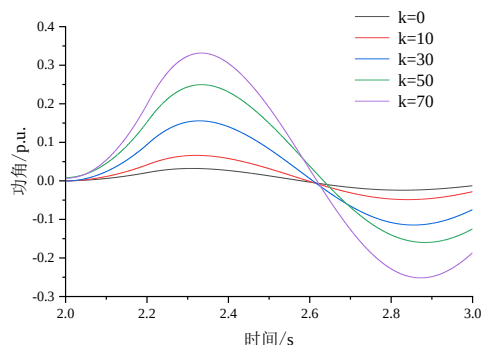


图7 不同比例 GFL-PMSG 并网后同步机间功角变化  
Fig. 7 Changes in power angle between synchronous machines after grid connection of GFL-PMSG with different proportions

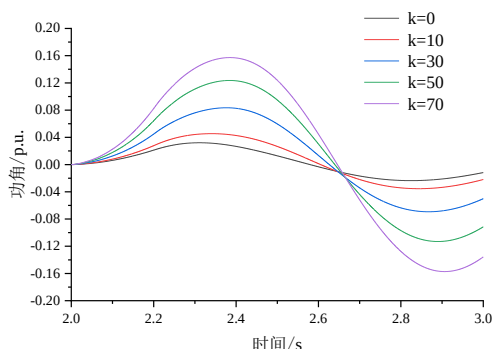


图8 不同比例 GFM-PMSG 并网后同步机间功角变化  
Fig. 8 Changes in power angle between synchronous machines after grid connection of GFM-PMSG with different proportions

由仿真结果可知, 随着风机接入比例增加, 系统同步机间的首摆功角幅值也明显增加, 恶化了系统暂态功角稳定性。

#### 4.3 GFL-PMSG 控制参数 $K_A$ 、 $K_Q$ 影响

在 GFL-PMSG 短路电流达限值时, 控制参数  $K_A$ 、 $K_Q$  的取值不同, GFL-PMSG 也会呈现不同的有功响应特性, 相应地改变系统同步机之间的暂态功角特性, 因此可以对不同  $K_A$ 、 $K_Q$  情况下的功角特性进行仿真分析。

设置相同故障工况, 改变控制参数  $K_A$ 、 $K_Q$  的取值, 得到 GFL-PMSG 接入后系统同步机功角响应曲线如下。

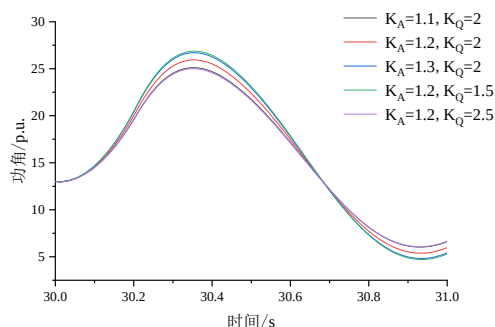


图9 不同  $K_A$ 、 $K_Q$  时同步机之间的功角曲线  
Fig. 9 Power angle curves between synchronous machines at different  $K_A$  and  $K_Q$

从上述仿真结果可知, 减小短路电流限幅, 增加动态无功电流比例系数, 都可以减小故障期间 GFL-PMSG 的有功输出, 改善系统同步机之间的暂态功角特性。但在标准规定范围内, 改善效果有限, GFL-PMSG 并网对同步机之间功角特性影响仍差于 GFM-PMSG 并网影响。

#### 4.4 GFM-PMSG 控制参数 $D$ 、 $J$ 影响

改变控制参数  $D$ 、 $J$  的取值, 会使 GFM-PMSG 呈现不同的有功响应特性, 相应地改变系统同步机之间的暂态功角特性, 所以有必要对不同  $D$ 、 $J$  情况下的功角特性进行仿真分析。

设置相同故障工况, 改变控制参数  $D$ 、 $J$  的取值, 得到 GFM-PMSG 接入后系统同步机功角响应曲线如下。

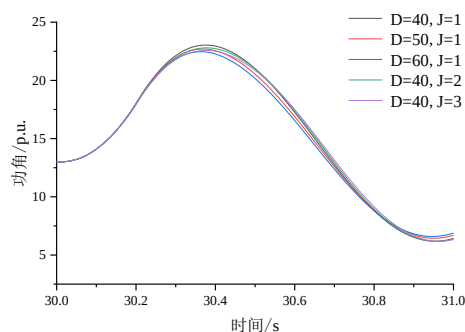


图10 不同  $D$ 、 $J$  时同步机之间的功角曲线  
Fig. 10 Power angle curves between synchronous machines at different  $D$  and  $J$

从上述仿真结果可知, 增加阻尼系数  $D$  和惯量系数  $J$  的取值, 在一定程度上可少量减少故障期间 GFM-PMSG 的有功输出, 改善系统同步机之间的暂态功角特性。

## 5 结论

本文通过 EEAC 分析方法, 提出风机并网对系统功角稳定性影响主要体现在其有功外特性, 以此分析 GFL-PMSG、GFM-PMSG 接入对系统暂态功



角稳定性的影响机理；并基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建双机仿真测试模型，对所得机理进行了仿真验证，最终得出结论如下：

(1) 风机并网会改变系统等效转子运动方程，恶化系统的暂态功角稳定性。而 GFM-PMSG 对比 GFL-PMSG，在故障期间输出有功更少，更接近同步机的输出特性，改善风机并网对系统暂态功角稳定性的恶化影响。

(2) GFL-PMSG 输出有功功率与控制参数  $K_A$ 、 $K_Q$  有关；GFM-PMSG 输出有功功率与控制参数转子惯量系数  $J$  和阻尼系数  $D$  有关。可以通过选取合适的控制参数，在一定程度上改善含 PMSG 电力系统的暂态功角稳定性。

## 参考文献

- [1] 姜惠兰,周照清,蔡继朝.风电接入比例对电力系统暂态功角稳定性影响的分析方法[J].电力自动化设备,2020,40(07):53-67.
- [2] 汤蕾,沈沉,张雪敏.大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一):理论基础[J].中国电机工程学报,2015,35(15):3832-3842.
- [3] 汤蕾,沈沉,张雪敏.大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二):影响因素分析[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4043-4051.
- [4] 于珍,沈沉,张雪敏.双馈风机故障穿越后功率恢复速率对系统暂态稳定的影响分析[J].中国电机工程学报,2018,38(13):3781-3791+4019.
- [5] 冯雷,蔡泽祥,王奕等.双馈风电机组低压穿越特性对电力系统暂态稳定的影响[J].电力自动化设备,2018,38(03):16-23.
- [6] 陈汉杰,罗毅,张磊等.双馈风机虚拟惯量控制对电力系统暂态稳定的影响[J].现代电力,2018,35(04):66-71.
- [7] HE X, GENG H, LI R, et al. Transient stability analysis and enhancement of renewable energy conversion system during LVRT[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2020,11(3):1612.
- [8] 王继磊,张兴,朱乔华等.虚拟同步发电机暂态稳定性分析与控制策略[J].电机与控制学报,2022,26(12):28-37.
- [9] 张赞宁,谢永辉,张磊等.自适应调节有功功率偏差的虚拟同步发电机暂态控制策略[J/OL].电机与控制学报:1-12[2023-12-29].
- [10] 李晓栋,徐政,张哲任.含非同步机电源交流电网暂态稳定性的电磁暂态仿真研究[J].电力自动化设备,2020,40(09):57-68.
- [11] 曹炜,何必伦,陈思远等.改进故障穿越方法的 VSG 对同步机之间功角稳定性的影响研究[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(12):121-128.
- [12] 高振,雷为民,赵峰等.基于 Lyapunov 直接法的虚拟同步发电机并网暂态稳定性分析[J].浙江电力,2019,38(10):52-60.



熊瑶

收稿日期:

作者简介:

熊瑶(2000 年),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: 908305286@qq.com;



文章编号: 中图分类号: 文献标志码: 学科代码:

# 计及分布式光伏接入的配电网安全保障措施灵敏度分析

艾春梅<sup>1</sup>, 吴家毓<sup>1</sup>, 熊瑶<sup>1</sup>

(1. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽 合肥 230009)

## Sensitivity Analysis of Distribution Network Security Measures Considering Distributed Photovoltaic Access

AI Chunmei<sup>1</sup>, WU Jiayu<sup>1</sup>, XIONG Yao<sup>1</sup>

(1. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**ABSTRACT:** Under the guidance of the goals of "dual carbon" and continuous transformation and upgrading of the power system, a new type of power system with new energy as the main body has become an important development direction in the future. The fluctuation characteristics of clean energy have a significant negative impact on the voltage and power flow of the power grid. This article combines the characteristics of distribution networks and first proposes safety evaluation indicators and methods for distribution networks after distributed photovoltaic integration based on practical application scenarios; Then, two safety measures were established, namely the construction of new energy storage power stations and the implementation of distributed photovoltaic regulation; Finally, based on the safety assessment methods and security measures of the distribution network, a case study was conducted to study the operational safety of the distribution network and the sensitivity of security measures, providing a reference basis for the development of high proportion clean energy access schemes in different application scenarios.

**KEY WORDS:** Distribution network, Distributed photovoltaics, Safety measures, Sensitivity

**摘要:** 在“双碳”与电力系统不断转型升级建设的目标引领下,以新能源为主体的新型电力系统成为未来的重要发展方向。清洁能源波动特性对电网电压、功率流动等都产生了较大的负面影响。本文结合配电网特点,首先根据实际应用场景,提出分布式光伏接入后配电网的安全评估指标及评估方法;然后建立了新建储能电站和分布式光伏调控两种安全保障措施实施方案;最后基于配电网安全评估方法和安全保障措施进行算例分析,研究配电网运行安全性以及安全保障措施灵敏度,为不同应用场景高比例清洁能源接入方案的制定提供参考依据。

**关键词:** 配电网,分布式光伏,安全保障措施,灵敏度

**DOI:**

## 0 引言

在“双碳”与电力系统不断转型升级建设的目标引领下,以清洁能源为主体的新型电力系统成为未来的重要发展方向。配电网作为电力系统的一个重要组成部分,其直接与用户端相连,是实现用户电能供应的载体,其运行状态会直接影响到用户的用电质量,对于用户来说停电损失大多是配电网故障引起的<sup>[1]</sup>。依据国家电监会公布的统计情况显示,总停电事故的96%是由于配电环节故障造成的<sup>[2]</sup>,因此,防止大规模停电事故的重点在于保障配电网的安全、稳定运行。

针对目前配电网中存在的大量不安全因素,最大难题来自于分布式电源的渗透率逐渐升高。分布式电源波动特性对电网电压、功率流动、保护机制与机理都产生了较大的影响<sup>[3][4]</sup>,成为制约新能源发电发展的严重障碍,给系统安全运行带来新的挑战。因此,对分布式电源接入配电网后的安全保障措施及灵敏度分析十分必要。

灵敏度分析通过单个输入参数变化的变化率来评估其对系统的影响程度,现有研究主要基于随机潮流方法和电压灵敏度分析方法。文献[5]针对分布式光伏与负荷双重不确定性引起的ADN电压波动和越限概率分析问题,来研究电压灵敏度。基于电压灵敏度分析方法是通过对潮流计算 Jacobian 电压灵敏度矩阵,将不确定源的概率映射到电压波动的概率分布。但该类方法建立的电压波动概率模型依赖潮流计算的 Jacobian 矩阵,系统状态发生变化时,其电压波动概率模型需重新计算,对系统计算能力要求高<sup>[6]</sup>。针对以上问题,文献[7]和[8]建立概率电压灵敏度的近似解析模型,将功率波动的概率分布特征映射到节点电压波动的概率分布。但其概率电

压灵敏度需进行模值运算,只能够展现出电压波动值大小的概率分布特征,无法展现高电压或低电压的波动方向。可再生能源分布式发电的无功调节能力有限且具有不确定性,而配电网中线路电阻和电抗接近,有功功率对电压曲线也有较大的影响,两方面因素将影响电压调整效果<sup>[9]</sup>。对于有功削减,文献[10]根据点电压灵敏度系数和可再生能源装机容量,调节各可再生能源发电机的有功出力,以防止在配电网馈线间发生负荷转移时出现过电压。但有功功率削减会降低可再生能源运营商的收益,不能作为长期调节手段。其次,在挖掘配电网灵活性资源调压潜力方面,储能具有举足轻重的作用。文献[11]基于长短时间尺度优化模型,在分钟级尺度控制可再生能源出力,小时级尺度控制可投切电容电抗器、储能系统进而控制电网电压波动。文献[12]利用节点电压灵敏度来确定接入储能节点及其充放电功率。现有关于配电网安全性和灵敏度相关研究的文献中对安全保障措施灵敏度的研究较少。

在目前研究现状的基础上,本文结合配网特点,根据实际应用场景,结合配电网特点,首先调研实际应用场景,提出分布式光伏接入后配电网的安全评估指标及指标计算方法;然后基于配电网模型,建立了新建储能电站和分布式光伏调控两种安全保障措施实施方案,研究配电网运行安全性并分析安全保障措施灵敏度,为不同应用场景高比例清洁能源接入方案的制定提供参考依据。

## 1 配电网安全评价指标

### 1.1 电压偏差水平

随着分布式电源容量的不断增大,分布式电源功率变化所造成的电压波动愈发明显,而用户侧部分精密设备对电压的要求较高,电压偏差较大将会降低用户体验甚至可能演变为过电压、低电压事件,对配电网安全造成更大影响。因此,本课题计及多时间断面、多子系统的预测电压偏差值,构建电压偏差水平指标如下:

计量单位:%。

指标释义:在目标周期内评估对象所包含的各电压等级配电网中,同一电压等级中所有子系统节点最大电压偏差的加权平均值,电压偏差水平  $R_{VDg}$ (voltage deviation)的计算公式为

$$R_{VDg} = \sum_{j=1}^{N_{s,g}} \left[ \frac{\omega_j}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} [\Delta U_{i,j}] \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_{s,g}$ 为评估对象  $s$  中电压等级  $g$  包含的子系统数量, $g$  为电压等级,可取 35kV、10kV 和 400V, $\omega_j$  为子系统  $j$  所占权重, $N_t$  为目标周期时段

总数, $\Delta U_{i,j}$  为子系统  $j$  时段  $i$  下的节点电压偏差最大值,公式为:

$$\Delta U_{i,j} = \max \left( \frac{U_{\max}(i,j) - U_N, U_N - U_{\min}(i,j)}{U_N} \right) \quad (2)$$

式中: $U_N$  为系统标称电压, $U_{\max}(i,j)$  和  $U_{\min}(i,j)$  表示子系统  $j$  时段  $i$  的节点电压最大值和最小值。

### 1.2 功率倒送风险水平

在高比例清洁能源配电网中,当分布式光伏出力较大而配电网负荷需求量较小时,可能会出现向主电网功率倒送的情况,这会导致分布式光伏接入点及沿馈线节点不同幅度的上升,甚至造成节点电压越限问题以及由反向功率所引发的继电保护误动作等一系列安全问题。因此,本课题计及多时间断面、多子系统的跨电压等级的功率倒送风险,构建功率倒送风险水平指标如下:

计量单位:%。

指标释义:在目标周期内评估对象所包含的各电压等级配电网中,同一电压等级中所有子系统功率倒送事件发生的加权平均水平,功率倒送风险水平  $R_{PRg}$ (power reversal)的计算公式:

$$R_{PRg} = \sum_{j=1}^{N_{s,g}} \left( \frac{\omega_j}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} S_{PR,i,j} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: $N_{s,g}$  为评估对象  $s$  中电压等级  $g$  包含的子系统数量, $g$  为电压等级, $\omega_j$  为子系统  $j$  所占权重, $N_t$  为目标周期时段总数,可取 35kV、10kV 和 400V, $S_{PR,i,j}$  为子系统  $j$  时段  $i$  功率倒送事件参数,公式为

$$S_{PR,i,j} = \begin{cases} 1 & \text{存在功率倒送事件} \\ 0 & \text{不存在功率倒送事件} \end{cases} \quad (4)$$

其中功率倒送仅考虑跨电压等级的功率倒送,以上级电网向子系统首端输入电能为正方向,考虑子系统首端线路功率的正负号来判定,若为正则事件参数为 0,不存在功率倒送,反之则为 1,存在功率倒送事件。

## 2 配电网安全保障措施分析

### 2.1 新建储能电站

新建储能电站是一项关键的发展规划类措施,旨在增强系统对分布式光伏能源的接纳能力。储能电站通过将多余的电力转化为储存的能量,实现了能源的平衡调度和高效利用。

以配电网安全评估为背景开展配电网储能配置研究,旨在针对该配电网模拟新建储能电站安全保障措施,并且计算采取该措施后的安全评估指

标,判断配电网风险问题是否得到解决或缓解。

在配电网中,可以实施一种旨在平抑净负荷波动、考虑续航能力的储能实用充放电策略,该储能装置控制策略的数学模型如下:

$$|P(t) - P(t-1)| \leq S \times \lambda \quad (5)$$

$$P(t) = P_{\max}(t) + P_{\text{ess}}(t) \quad (6)$$

式中, $P(t-1)$ 为分布式光伏在 $t-1$ 时刻平抑后的输出功率; $P_{\max}(t)$ 、 $P(t)$ 分别为 $t$ 时刻输出的最大输出功率和平抑后的值; $P_{\text{ess}}(t)$ 为储能装置的充放电功率; $S$ 、 $\lambda$ 分别为装机容量和允许的输出功率的最大变化值。若 $P_{\text{ess}}(t) > 0$ ,则储能装置放电;若 $P_{\text{ess}}(t) < 0$ ,则储能装置充电。

本文采用一种含光储的配电网潮流计算分析方法,计算分布式光伏接入后的潮流与安全评估指标,以改善配电网当前存在的风险问题,详细步骤如下:

1) 将实际配电网转化为可进行潮流计算的数学模型,生成网络拓扑、节点负荷、支路阻抗及最大载荷等基础数据,同时输入光伏容量、储能装置接入点、储能装置容量、SOC限值及初值等参数;

2) 选取四个典型日以5min为时间间隔的288个时段为计算时间断面;

3) 计算配电网净负荷值,并基于平抑净负荷波动的实用充放电策略确定储能出力;

4) 实施配电网潮流计算及校验,对于发生越限的情形,调整储能出力以尽可能消除越限,并记录场景下当前时段的电压、功率、损耗等潮流关键参数。

5) 判断是否所有时段均完成计算,若完成,则计算当前日场景的配电网运行评价指标;否则进入下一时段,返回步骤2);

6) 判断是否四个典型日场景均完成计算,若完成,则潮流计算结束,继而基于安全评估指标开展配电网运行分析和储能配置的相关研究;否则进入下一日场景,返回步骤2)。

## 2.2 分布式光伏调控

布式光伏调控是运行调控类的关键措施,通过实时监测和智能调度,使得分布式光伏系统与电力系统协同运行。这包括对光伏设备的精准监测、输出功率的动态调整、无功功率的主动控制以及对电网频率的灵敏响应。通过这些策略,分布式光伏调控确保系统中的光伏发电系统稳定、可靠地输出电能,同时与电力系统的运行保持协调。

本文介绍一种计及分布式光伏无功调节能力的配电网电压主动调控模型,根据预测负荷和光伏

预测出力提前确定电压调控问题,以经济灵敏度的顺序合理选择调控手段,从而有效保证电压质量及其调控的经济性。

分布式光伏功率 $P$ 随机变化规律可用Beta分布表示,其概率密度 $f(P)$ 为:

$$f(P) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \times \Gamma(\beta)} \times \left(\frac{P}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1} \times \left(1 - \frac{P}{P_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (7)$$

式中, $P_{\max}$ 为功率上限值, $\alpha$ 、 $\beta$ 表示分布函数的参数值, $\Gamma$ 表示伽玛函数。

当分布式光伏接入配电网后,系统的电压调控会变得更加复杂和困难,且分布式光伏功率存在很大的波动性,传统的被动式调压难以满足要求,因此需采用更加有效的主动式调控策略。电压调控系统根据当前 $t$ 时刻的 $U_{m,t}$ 及 $t+1$ 的预测负荷和光伏预测功率计算获得 $U_{m,t+1}$ ,若 $U_{m,t+1}$ 不符合要求,则计算出 $t+1$ 的无功优化目标值 $\Delta Q_{m,t+1}$ ,然后系统再根据目标值和无功分摊原则获得各调压手段的无功调节量。

## 3 配电网安全保障措施灵敏度分析

### 3.1 灵敏度分析方法

灵敏度是指以状态变量表征的系统运行状况对控制变量和扰动变量的变化的敏感性程度。灵敏度分析是一种用于评估系统或模型输出结果对输入参数变化的敏感程度的方法。电力系统中,灵敏度分析可以用于评估不同安在全保护措施对系统运行状态的影响程度,从而为系统运行和调度提供参考。通常采用的方法包括局部灵敏度分析、全局灵敏度分析等。局部灵敏度分析是通过计算系统输出结果随着单个输入参数变化的变化率来评估该参数的影响程度。这种方法比较容易实现,但只能评估单个参数的影响,无法考虑多个参数相互作用的影响。全局灵敏度分析则可以同时考虑多个参数的影响,并通过计算各个参数对系统输出结果的总体影响程度来评估各个参数的重要性。全局灵敏度分析通常需要使用更复杂的数值方法,如Monte Carlo模拟、样条插值法等。

在电力系统中,灵敏度分析法是以潮流方程为基础,从定性物理概念出发,利用系统中某些变量间的关系,通过计算在某种扰动下系统变量对扰动量的灵敏度来判别系统的稳定性的一种分析方法。

若以控制变量及状态变量来广泛描述电力系统中各种变量及其之间的关系可将系统的潮流方程及其他依从变量写为:

$$\begin{cases} f(x, u) = 0 \\ y = y(x, u) \end{cases} \quad (8)$$

上式中,  $x$  为系统的状态变量,  $u$  为系统的控制变量, 函数  $f$  为系统的功率约束方程; 函数  $y$  则为关于上述两变量的依从变量。

若此时系统正处于稳态运行情况, 可设系统的状态量及控制量在  $(x_0, y_0)$  点处运行, 当其产生扰动或对其进行调控时期运行点做出调整在  $(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u)$  处运行。为探寻控制变量的变化对状态变量的变化影响程度, 可通过对(8)式在为了在  $(x_0, u_0)$  处进行泰勒展开同时略去二次及以上的高次项:

$$\begin{cases} f(x_0 + \Delta x, u_0 + \Delta u) = f(x_0, u_0) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u = 0 \\ y_0 + \Delta y = y(x_0, u_0) + \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u \end{cases} \quad (9)$$

将式(9)代入, 有:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u = 0 \\ \Delta y = \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u \end{cases} \quad (10)$$

可得:

$$\begin{cases} \Delta x = -\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u = S_{xu} \Delta u \\ \Delta y = \frac{\partial y}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial y}{\partial u} \Delta u = \left(\frac{\partial y}{\partial x} S_{xu} + \frac{\partial y}{\partial u}\right) \Delta u = S_{yu} \Delta u \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} S_{xu} = -\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^{-1} \frac{\partial f}{\partial u} \\ S_{yu} = \left(\frac{\partial y}{\partial x} S_{xu} + \frac{\partial y}{\partial u}\right) \end{cases} \quad (12)$$

上式的推导适用于电力系统中各种灵敏度的求解, 其思想及方法是明确的, 将电力系统中不同的函数代入其中可以进行不同灵敏度矩阵的求解。

### 3.2 安全保障措施灵敏度分析步骤

在配电网安全保障措施问题研究中, 灵敏度分析可以用于评估不同安全保护措施的效果, 并确定最优的保护方案。通过灵敏度分析, 可以识别出最关键的保护措施, 从而提高电网的可靠性和安全性。对于安全保障措施的灵敏度分析问题, 就是要求配电网接入用户选择的安全保障措施方案后, 对所提配电网安全评价指标的改善效果灵敏度情况。

根据 1、2 节内容, 总结基于配电网安全评价指标的安全保障措施灵敏度分析步骤如下流程图

1 所示。

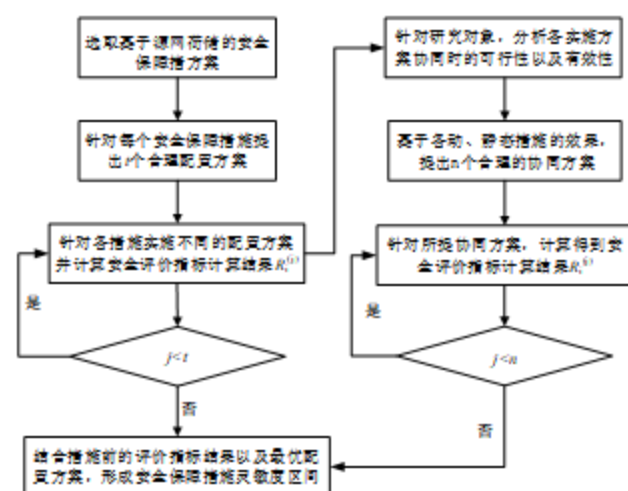


图 1 安全保障措施灵敏度分析步骤

Fig. 1 Sensitivity analysis steps for security measures

步骤 1、基于调研的配电网安全保障措施资料, 分析配电网网架结构、规划情况、电网现状以及现存的风险问题等因素, 选取适用的安全保障措施方案;

步骤 2、针对步骤 1 选取的安全保障措施, 设计  $t$  个合适的措施配置方案和配置策略;

步骤 3、计算实施各措施下的不同配置方案  $j$  ( $0 < j \leq t$ ) 时的安全评价指标结果  $R_i(t)$ , 其中  $i$  为不同的评价指标;

步骤 4、针对研究对象实施安全保障措施后的安全评价指标计算结果, 分析各实施方案协同的可行性及有效性;

步骤 5、基于各措施的实施效果, 提出  $n$  各合适的措施协同配置方案和配置策略;

步骤 6、计算实施各措施下的不同配置方案  $j$  ( $0 < j \leq n$ ) 时的安全评价指标结果  $R_i(n)$ , 其中  $i$  为不同的评价指标;

步骤 7、比较不同实施方案下的安全评价指标计算结果, 当结果最优时则认为该情况下的安全保障措施实施方案最为合理, 即找到了该安全保障措施的最优配置方案, 并基于措施前的指标结果形成该安全保障措施的灵敏度区间。

## 4 算例仿真

### 4.1 算例描述

本文选取安徽省某配电线路进行算例验证, 电压等级为 110kV, 其网络拓扑图及节点编号如图 2 所示。该网络共包含 18 个节点、其中 2 个分布式光伏接入点、2 个新建储能电站措施接入点和 17 条支路, 线路参数如下表 1。本文算例是由 MATLAB R2019b 编程实现。

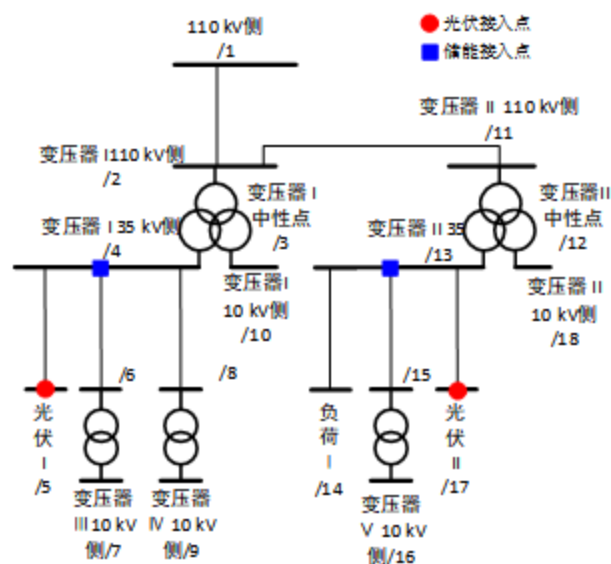


图 2 配电线路系统结构图

Fig. 2 System structure diagram of distribution line

表 1 线路参数列表

Table 1 Line parameter table

| 线路<br>编号 | 首端<br>节点 | 末端<br>节点 | 电压等级<br>(kV) | 电阻 ( $\Omega$ ) | 电抗 ( $\Omega$ ) |
|----------|----------|----------|--------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 1        | 2        | 110          | 1.08433         | 3.23631         |
| 2        | 2        | 3        | 110          | 0.453788        | 20.88690        |
| 3        | 3        | 4        | 110          | 0.22301         | -1.71900        |
| 4        | 3        | 10       | 110          | 0.318429        | 14.85610        |
| 5        | 4        | 5        | 35           | 0.20272         | 0.62374         |
| 6        | 4        | 6        | 35           | 1.00680         | 1.59720         |
| 7        | 6        | 7        | 35           | 0.24453         | 4.83880         |
| 8        | 4        | 8        | 35           | 0.15100         | 0.28800         |
| 9        | 8        | 9        | 35           | 0.24453         | 4.83880         |
| 10       | 2        | 11       | 110          | 0.02041         | 0.06094         |
| 11       | 11       | 12       | 110          | 0.45379         | 21.09820        |
| 12       | 12       | 13       | 110          | 0.22301         | -1.71900        |
| 13       | 12       | 18       | 110          | 0.31843         | 14.85610        |
| 14       | 13       | 14       | 35           | 0.11991         | 0.41683         |
| 15       | 13       | 15       | 35           | 0.15100         | 0.28800         |
| 16       | 15       | 16       | 35           | 0.24453         | 4.83880         |
| 17       | 13       | 17       | 35           | 0.18668         | 0.57440         |

## 4.2 安全保障措施改善电压偏差风险灵敏度分析

由于光伏电站的出力特征,在午间出力更多,因此电压在 9:00~15:00 区间对储能电站充电措施可以平衡新能源的不稳定性,提供稳定的供电能力,并缓解电压和频率波动等问题。本算例通过对比不同储能电站接入容量,得到接入新建储能电站

措施改善电压偏差风险水平的灵敏度区间。除此之外,分布式光伏调控也可以很好地改善电压偏差问题。通过对比多组分布式光伏调控策略,得到接入分布式光伏调控措施改善电压偏差风险水平的灵敏度区间。不仅如此,将新建储能电站和分布式光伏调控措施协同作用于配电网中,还可以得到储能光伏协同的措施改善电压偏差风险水平的灵敏度区间。

选取接入这三种安全保障措施前后节点电压偏差风险改善最明显的节点 4、5、13、17 的电压情况绘制了灵敏度区间对比如图 3 所示。

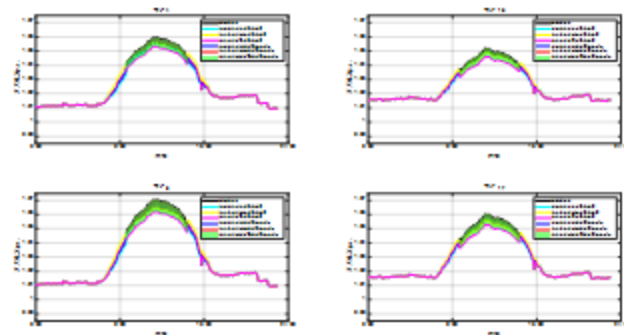


图 3 安全保障措施前后电压偏差改善灵敏度对比

Fig. 3 Sensitivity comparison of voltage deviation improvement before and after safety measures

通过对比新建储能电站和分布式光伏调控措施单独作用的灵敏度区间可以看出,分布式光伏调控对于线路电压偏差风险缓解的灵敏度区间更宽,对于电压偏差风险的改善效果更明显。然而以上两种配电网安全保障措施并不是孤立存在的,分布式光伏调控还可以结合储能系统,将多余的电能暂时存储起来,并在电网需要时释放。

分析结果可知储能光伏协同的安全保障措施相比直接进行分布式光伏调控或新建储能电站措施对于电压偏差的缓解效果更好、灵敏度区间更宽。储能和分布式光伏协同调控的安全保障措施对比两种措施单独应用可以进一步缓解电压偏差问题,这种技术手段对于适应高比例清洁能源接入的要求,确保电网安全运行具有重要意义。

## 4.3 安全保障措施改善功率倒送风险灵敏度分析

当分布式光伏系统的出力较大时,可能会发生功率倒送现象,即超过用户自身负荷需求的电力被输送回电网。为了减少功率倒送情况,可以对分布式光伏系统进行调控,以平衡其发电和用户负荷之间的差异;新建储能系统,可以将多余的电能暂时存储起来,对用户所需电力,并在需要时释放储存的电能,减少对电网的功率倒送。这样的调控措施有助于提高光伏系统的自用比例,减轻电网负

担,同时优化能源利用效率。

为分析新建储能电站以及分布式光伏调控这两种措施以及协同调控下改善功率倒送风险水平的灵敏度情况,选取了存在功率倒送现象且风险缓解程度较为明显的线路1、线路5以及不存在功率倒送现象的线路6、线路8来进行对比分析。

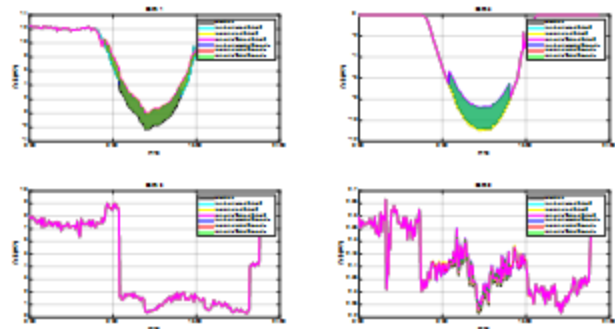


图4 安全保障措施前后线路功率情况对比

Fig. 4 Comparison of line power before and after safety measures

分析图4可知,对于线路1而言,分析存在功率倒送时段9:00~15:00内的三种安全保障措施效果,可以发现该时段内三种安全保障措施的效果灵敏度区间基本一致,在其余时段没有调节分布式光伏出力,仅实施储能措施和协同措施的效果一致。而对于线路5而言,新建储能电站基本没有缓解功率倒送现象,通过对配电网拓扑进行分析可知,由于该线路是分布式光伏接入电网处的线路,即使接入储能该线路上的功率依然要传输,因此对于功率倒送几乎没有改善效果,而其他两种措施的灵敏度区间一致。

分析结果可知储能光伏协同的安全保障措施相比直接进行分布式光伏调控或新建储能电站措施对于功率倒送的缓解效果更好、灵敏度区间更宽。光储协同作用可以实现能量平衡,避免功率倒送风险;可以实现快速响应,分布式光伏调控结合储能电站可以快速响应电网需求的变化,电网负荷突然增加或光伏发电突然减少时,储能电站可以迅速释放储存的电能,弥补供电缺口,保持电网稳定,相比之下,单独进行分布式光伏调控或新建储能电站的响应速度可能较慢,无法及时应对功率倒送风险。

## 5 结论

为进一步提高配电网运行稳定性,本文研究了两种适用基于光储系统的配电网安全保障措施,提出了一种配电网安全保障措施灵敏度分析方法。算例结果表明新建储能电站和分布式光伏调控两种措施协同起来能够更好地解决电压偏差

风险和功率倒送风险,其灵敏度更高、灵敏度区间更宽,提供了可操作性更高的安全保障措施方案。通过这种协同作用提高了系统的灵活性和响应速度,有效地平衡电网负荷,保持电压稳定,并提高了电网的可靠性和稳定性。

## 参考文献

- [1] 周名煜,谢宁,王承民. 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式权重评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 130-137
- [2] 王季. 考虑不确定性因素的配电网运行风险评估[D]. 湖南大学, 2017.
- [3] 阮思清. 含高渗透率分布式光伏的配电网运行风险评估与控制[D]. 江苏: 南京理工大学, 2019.
- [4] 陈炜, 文欣, 吴涛等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(02): 26-32+39.
- [5] 徐一帆, 董树峰, 毛航航, 等. 基于无源变换法的配电网电压稳定指标概率分析及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(s1): 47-55.
- [6] 晋飞, 刘静利, 刘锐亮, 等. 基于电压灵敏度的配电网DG接纳能力不确定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 183-189.
- [7] S. Munikoti, B. Natarajan, K. Jhala and K. Lai. Probabilistic Voltage Sensitivity Analysis to Quantify Impact of High PV Penetration on Unbalanced Distribution System[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(4): 3080-3092.
- [8] K. Jhala, B. Natarajan and A. Pahwa. Probabilistic Voltage Sensitivity Analysis (PVSA)—A Novel Approach to Quantify Impact of Active Consumers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2518-2527.
- [9] 徐巨, 余贻鑫. 提高配电网状态估计精度的量测配置优化方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 17-21.
- [10] Stetz T, Marten F, Braun M. Improved Low Voltage Grid-Integration of Photovoltaic Systems in Germany[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2013, 4(2): 534-542.
- [11] Ku T, Lin H, Chen S, et al. Coordination of PV Inverters to Mitigate Voltage Violation for Load Transfer Between Distribution Feeders with High Penetration of PV Installation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1167-1174.
- [12] 张剑, 崔明建, 何怡刚. 结合数据驱动与物理模型的主动配电网双时间尺度电压协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2023: 1-13.
- [13] 顾怡, 邢洁, 马洪艳等. 计及配网电压越限的光储协同优化运行策略[J]. 储能科学与技术, 2023: 1-10.
- [14] 张明光, 张钰. 基于ANN仿真的配电网状态估计[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(17): 253-256+260.



艾睿琦

收稿日期:

作者简介:

艾睿琦(2002年),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: 1015803644@qq.com;

吴家骥(1999年),男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: wjy2223@163.com;

熊瑶(2000年),女,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: quanlirong520@qq.com;



文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 342 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于改进量子遗传算法的分布式调相机参数优化

曹仕通, 石开明, 苟于亮, 孔繁泽, 汪家晗, 彭腾辉

(内蒙古工业大学电力学院, 呼和浩特, 010080)

## Optimization of Distributed Synchronous Condenser Parameters based on Improved Quantum Genetic Algorithm

CAO Shitong, SHI Kaiming, GOU Yuliang, KONG Fanze, WANG Jiahao, PENG Tenghui

(School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080)

**ABSTRACT:** To enhance the reactive power performance of distributed synchronous condensers and address voltage safety issues caused by the large-scale integration of new energy into the grid, the parameters of distributed synchronous condensers were optimized. Firstly, the impact of distributed synchronous condenser parameters on their reactive power performance was analyzed, and the parameters to be optimized were identified. Using wind power as an example, the role of distributed synchronous condensers in suppressing transient overvoltage in wind farms was examined. Secondly, a parameter optimization method for distributed synchronous condensers based on an improved quantum genetic algorithm (S-QGA) was proposed, which takes into account the suppression of transient overvoltage in wind farms. Finally, a wind power grid-connected system model was established, and simulations verified the effectiveness of the proposed optimization method.

**KEY WORDS:** distributed synchronous condenser; transient overvoltage; parameter optimization; improved quantum genetic algorithm

**摘要:** 为了提高分布式调相机无功性能, 解决大规模新能源并网带来的电压安全问题, 对分布式调相机进行了参数优化。首先, 分析了分布式调相机参数对其无功性能的影响, 确定了待优化参数, 以风电为例, 分析了分布式调相机在风电场暂态过电压的抑制作用; 其次, 提出了一种基于改进量子遗传算法的分布式调相机参数优化方法, 并将风电场暂态过电压抑制考虑在内; 最后, 建立了风电并网系统模型, 仿真验证了所提优化方法的有效性。

**关键词:** 分布式调相机, 暂态过电压, 参数优化, 改进量子遗传算法

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.论文序号 (小五号 Times New Roman 字体加黑)

## 0 引言

大规模新能源接入电网导致系统电压支撑能力削弱, 新能源机组易因暂态过电压而脱网<sup>[1-3]</sup>。分

布式调相机在稳定电压方面能够发挥重要作用<sup>[4]</sup>。为充分发挥其无功性能, 需进行参数优化。

通过参数优化可以提高分布式调相机无功性能, 文献[5-6]对调相机电机参数进行了优化, 但未考虑励磁参数的影响。文献[7-8]研究了励磁参数或附加励磁控制方式, 缺乏与调相机电机参数的综合考虑。文献[9-10]将分布式调相机电机参数与励磁参数相结合考虑, 但未涉及暂态过电压问题。

针对现有研究的不足, 本文分析了分布式调相机参数对其无功性能的影响, 提出一种基于改进量子遗传算法的分布式调相机参数优化方法, 且目标函数考虑了风电的暂态过电压抑制能力。通过算例验证了所提方法的有效性。

## 1 参数优化理论基础

### 1.1 参数对无功特性的影响

#### 1.1.1 电机参数对无功特性的影响

由文献[5]可得调相机无功电流增量  $\Delta I_d$  与电压增量  $\Delta U$  的传递函数:

$$\Delta I_d = \frac{(X'_d - X''_d)T'_{d0}s + X_d - (L(s)+1)X''_d}{As^2 + Bs + X_d + (L(s)+1)X_k} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta U}{X''_d + X_k} - \frac{\Delta U}{X'_d + X_k}$$

式中  $X_d$ 、 $X'_d$ 、 $X''_d$  分别为同步、暂态、次暂态电抗;  $T'_{d0}$ 、 $T''_{d0}$  分别为暂态、次暂态开路时间常数;  $L(s)$  代表励磁系统;  $A$  和  $B$  表示为:

$$A = T'_{d0}T''_{d0}(X''_d + X_k) \quad (2)$$

$$B = (X''_d + X_k)T'_{d0} + \frac{X_d - X'_d}{X'_d - X''_d}(X''_d + X_k)T''_{d0} \quad (3)$$

由式(1)可知, 分布式调相机的无功出力主要与以下参数有关:  $X_d$ 、 $X'_d$ 、 $X''_d$ 、 $X_k$ 、 $T'_{d0}$ 、 $T''_{d0}$  及励磁系统的相关参数, 励磁参数在下一小节分析,  $X_k$  为分布式调相机升压变阻抗, 不将其考虑在优

化范围内。

### 1.1.2 励磁参数对无功特性的影响

励磁系统普遍采用调节速度快、可控性强的自并励静止励磁系统。

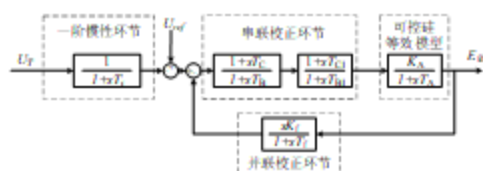


图1 励磁系统模型

Fig. 1 Excitation system model

图1中,  $T_f$  为输入滤波时间常数;  $T_C$ 、 $T_B$  分别为调节器分子超前、分母滞后时间常数;  $T_{C1}$ 、 $T_{B1}$  分别为调节器分子超前、分母滞后时间常数;  $K_A$  为可控硅放大倍数;  $T_A$  为稳压器时间常数;  $K_f$  为速率反馈增益;  $T_f$  为速率反馈时间常数。由式(1)可以, 励磁系统参数影响分布式调相机无功特性, 除  $K_A$  为固定值外, 优化参数时其他参数均需考虑。

### 1.2 分布式调相机对风电场暂态过电压的影响

目前风电并网普遍采用恒电压模式, 即调节风电无功输出以维持电压稳定。当机端电压发生变化时, 风电控制系统具有延时特性, 导致其无功增发具有迟滞; 故障清除后, 由于控制系统的延时, 故障期间风电增发的无功未及时撤销, 产生无功盈余, 引起机端暂态过电压。

当风电场配置分布式调相机后, 在故障发生时, 分布式调相机瞬时增发无功缓解电压跌落; 故障清除后, 分布式调相机瞬时减小无功并吸收多余无功, 有效抑制了暂态过电压。相关标准规定新能源机组在 1.1pu 至 1.3pu 要有一定的耐高压能力, 但从实际情况来看, 当风电机组暂态过电压超过 1.1pu 就可能脱网<sup>[11]</sup>, 严重威胁新能源汇集地区送电安全, 所以应尽可能降低暂态过电压幅值。

## 2 基于改进量子遗传算法的参数优化方法

### 2.1 参数优化模型

优化参数目的是提高分布式调相机的暂态性能及风电场站对暂态过电压的抑制能力, 所以构建双目标函数:

目标函数 1: 分布式调相机的暂态性能, 即:

$$J_1 = \max \{ \gamma Q_{SC, \max} + \lambda v_{SC}, \gamma + \lambda = 1 \} \quad (4)$$

式中:  $\gamma$  和  $\lambda$  分别为分布式调相机暂态输出无功  $Q_{SC, \max}$  和响应速度  $v_{SC}$  的调节系数。

目标函数 2: 风电机端暂态过电压最小, 即:

$$J_2 = \min \{ U_{tra, \max} \} \quad (5)$$

式中:  $U_{tra, \max}$  表示风电机端暂态过电压峰值。

约束条件:

约束 1: 暂态电压安全约束, 表示为:

$$1.0U_N \leq U_{tra, \max} < 1.3U_N \quad (6)$$

约束 2: 分布式调相机参数约束, 表示为:

$$\begin{cases} T_{r, \min} \leq T_r \leq T_{r, \max} & X_{d, \min} \leq X_d \leq X_{d, \max} \\ K_{f, \min} \leq K_f \leq K_{f, \max} & X'_{d, \min} \leq X'_d \leq X'_{d, \max} \\ T_{f, \min} \leq T_f \leq T_{f, \max} & X''_{d, \min} \leq X''_d \leq X''_{d, \max} \\ T_{A, \min} \leq T_A \leq T_{A, \max} & T'_{d0, \min} \leq T'_{d0} \leq T'_{d0, \max} \\ T_{B, \min} \leq T_B \leq T_{B, \max} & T''_{d0, \min} \leq T''_{d0} \leq T''_{d0, \max} \\ T_{B1, \min} \leq T_{B1} \leq T_{B1, \max} & \\ T_{C, \min} \leq T_C \leq T_{C, \max} & \\ T_{C1, \min} \leq T_{C1} \leq T_{C1, \max} & \end{cases} \quad (7)$$

### 2.2 基于改进的量子遗传算法

#### 2.2.1 量子遗传算法

量子遗传算法(QGA)将量子比特和量子态叠加特性的引入到遗传算法中<sup>[12]</sup>, 并利用量子旋转门实现染色体进化, 寻优能力比遗传算法更优。

(1) 量子比特编码

量子比特编码替代了常规编码, 其编码为:

$$|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (8)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  为复数, 分别表示自旋向上态和自旋向下态, 同时满足  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。  $|\alpha|^2$  代表量子态测量到  $|0\rangle$  的概率,  $|\beta|^2$  代表量子态测量到  $|1\rangle$  的概率。

(2) 量子旋转门

QGA 利用量子理论中特有的量子旋转门调整来实现种群更新, 过程如式(9)(10)所示:

$$D(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha'_j \\ \beta'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_j \\ \beta_j \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中,  $\alpha_j$ 、 $\beta_j$  代表染色体中第  $j$  个染色体的量子比特;  $\alpha'_j$ 、 $\beta'_j$  是通过旋转门进行更新后的量子比特;  $\theta_j$  表示第  $j$  个染色体的旋转角。

#### 2.2.2 改进量子遗传算法

在 QGA 的基础上, 针对寻优参数较多存在局部搜索能力差、寻优速度慢的缺点, 进行了两项改进。一是加入旋转角的调整, 根据控制变量  $flag$  调整旋转角的角度。式(11)(12)中, 上标 “inf”、下标 “lat” 分别表示迭代前、后期的旋转角调整策略,  $t_{\max}$  表示最大迭代数,  $t$  表示当前迭代数。如果控制变量  $flag$  不为 3, 角度按式(11)调整, 适应度差异越大, 旋转角增量越大。反之角度按式(12)调整, 计算  $\theta$  时加入一个额外因子, 该因子可根据迭代次数动态调整, 迭代次数越接近最大次数, 该因子越

接近 0, 提高了算法在不同阶段的灵活性。

$$\Delta\theta_{inf} = \theta_{min} + \left(\frac{f_{max} - f_i}{f_{max}}\right)(\theta_{max} - \theta_{min}) \quad (11)$$

$$\Delta\theta_{inf} = \theta_{min} + \left(\frac{f_{max} - f_i}{f_{max}} + \frac{e^{\frac{1-f_{max}}{t}}}{2}\right)(\theta_{max} - \theta_{min}) \quad (12)$$

二是引入自适应的变异率, 根据种群的适应度动态调整变异率, 使得在早期迭代中具有较高的变异率以增加探索能力, 而在后期迭代中降低变异率以增加开发能力。具体可以表示为:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{t}{t_{max}}\right) \left(\frac{f_{avg} - f_i}{f_{avg}}\right) \quad (13)$$

式(13)中,  $p$  表示自适应变异率,  $p_0$  表示初始变异率,  $f_{avg}$  表示种群平均适应度。其中初始变异率  $p_0$  取 0.05。综上, S-QGA 求解优化模型的过程如下:

(1) 初始化种群  $Z(t)$ , 随机生成染色体  $W$  个:

$$Z(t) = \{q_1^t, q_2^t, \dots, q_W^t\} \quad (14)$$

(2) 对种群  $Z(t)$  进行测量得到一组测量值  $z(t)$ 。

$$z(t) = \{z_1^t, z_2^t, \dots, z_W^t\} \quad (15)$$

(3) 基于该组测量值表示的分布式调相机的各个参数值, 计算  $J_1$  和  $J_2$ 。

(4) 适应度评估, 逐级判断是否满足  $J_1$  和  $J_2$ 。若都满足, 则记录下该组对应的染色体适应度作为目标值; 反之, 利用自适应的变异率更新种群。

(5) 使用改进量子旋转门更新新种群量子。

(6) 若达到最大迭代次数, 则结束迭代, 得到适应度最高的值; 反之, 则返回 (2)。

### 3 算例分析

以风电并网为例, 构建如图 2 所示的 Simulink 仿真模型。双馈风电总装机容量为 300MW, 风电经 0.69/35kV 箱变、35/220kV 升压站后通过集电线路送入 220kV 电网, 35kV 母线装设 2 台 50Mvar 分布式调相机作为无功补偿装置。

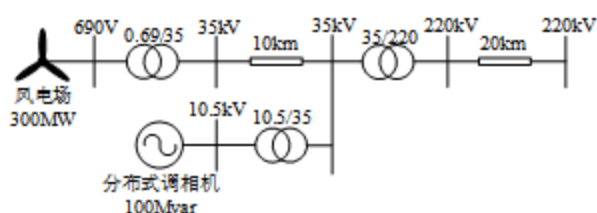


图 2 系统接线图

Fig. 2 System wiring diagram

设置两种算法的染色体数和迭代次数均为 50。参数取值范围及优化结果如表 1 所示。

表 1 参数优化结果对比

Tab. 1 Comparison of parameter optimization results

| 电机       | 励磁 | 单位 | 范围           | 初值    | QGA    | S-QGA  |
|----------|----|----|--------------|-------|--------|--------|
| $X_d$    |    | pu | [1-1.5]      | 1.49  | 1.106  | 1.046  |
| $X_d'$   |    | pu | [0.1-0.15]   | 0.104 | 0.103  | 0.086  |
| $X_d''$  |    | pu | [0.08-0.12]  | 0.09  | 0.082  | 0.072  |
| $T_{d0}$ |    | s  | [7-8]        | 7.865 | 7.945  | 7.894  |
| $T_{d0}$ |    | s  | [0.04-0.07]  | 0.04  | 0.063  | 0.048  |
| $T_f$    |    | s  | [0.0001-0.2] | 0.02  | 0.082  | 0.0002 |
| $T_C$    |    | s  | [0-50]       | 1     | 10.58  | 9.23   |
| $T_n$    |    | s  | [0-50]       | 1     | 0.25   | 0.36   |
| $T_{C1}$ |    | s  | [0-50]       | 0     | 24.65  | 6.99   |
| $T_{n1}$ |    | s  | [0-50]       | 0     | 0.27   | 3.09   |
| $T_A$    |    | pu | [0.0001-0.2] | 0     | 0.0023 | 0.0001 |
| $K_C$    |    | pu | [0.0001-0.2] | 0     | 0.04   | 0.1    |
| $T_f$    |    | s  | [0-10]       | 1     | 0.98   | 0.95   |

QGA 和 S-QGA 迭代曲线如图 3 所示, S-QGA 在迭代 14 次即可达到收敛, 而 QGA 在迭代 21 次收敛, S-QGA 可以显著提升收敛速度。

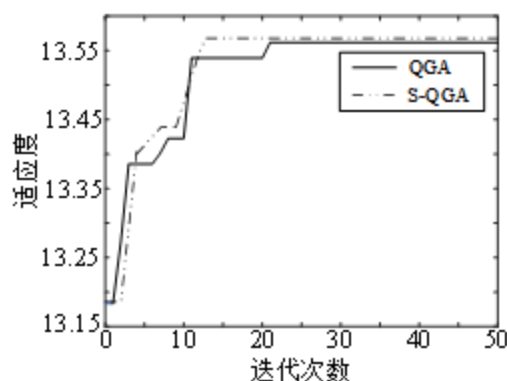


图 3 算法迭代曲线

Fig. 3 Algorithm iteration curve

设置系统运行 0.5s 时 35kV 母线发生三相短路, 经 0.1s 后故障消失, 仿真结果见图 4 所示。

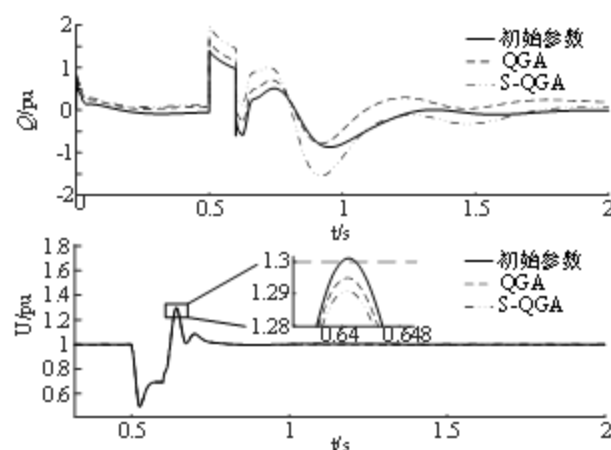


图 4 三相短路故障仿真

Fig. 4 Simulation of three-phase short circuit fault

图 4 中, 无功曲线显示为两台分布式调相机中一台的无功变化, 初始值时无功输出最小且响应最慢, 优化后, 显著提高了无功的响应速度, 使用

S-QGA 比初始值和 QGA 的瞬时无功分别增加了 0.57pu 和 0.34pu。初始值时电压恢复伴随明显的暂态过电压,经过优化改善了暂态过电压幅值,尤其是 S-QGA,使暂态过电压减少了 0.015pu。

#### 4 总结

为提高分布式调相机在大规模新能源并网中的动态无功支撑能力和暂态过电压抑制问题,提出了一种基于改进量子遗传算法的参数优化方法,以风电为例,通过仿真研究表明,改进的量子遗传算法优化(S-QGA)效果更好,参数优化后的分布式调相机显著提高了无功响应速度,减少了暂态过电压幅值,从而更好地保障新能源系统的电压安全。

#### 参考文献

- [1] 孙华东,于琳,赵兵.基于暂态过电压约束的新能源并网系统电压支撑强度量化分析方法[J].中国电机工程学报,2023,43(11):4207-4218.
- [2] 金一丁,贺静波,李光峰等.风电基地经特高压直流送出系统换相失败故障(二):送端风电机组暂态无功电压特性与作用机理分析[J].中国电机工程学报,2022,42(13):4738-4749.
- [3] 林伟芳,任晓钰,张桂红等.考虑功角稳定和暂态过电压的新能源电压穿越控制参数优化[J].电网技术,2023,47(04):1323-1331.
- [4] 郭强,李志强.同步调相机发展综述[J].中国电机工程学报,2023,43(15):6050-6064.
- [5] 李志强,种艺艺,黄金军.快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6877-6885.
- [6] Y. Ma, J. Wang, Y. Xiao, et al. Two-Level Surrogate-Assisted Transient Parameters Design Optimization of a Wound-Field Synchronous Machine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(01): 737-747.
- [7] 付敏,崔灿灿,王璐璐等.分布式调相机励磁系统参数优化模型研究[J].电机与控制学报,2022,26(02):102-110.
- [8] 刘丽丽,袁亚洲,张建承等.PSVR 参数对调相机性能的影响分析及其参数优化[J].大电机技术,2022(02):75-81.
- [9] Y. Xu, X. Pan, J. Guo, et al. Dynamic Reactive Power Characteristics Analysis and Optimization of Synchronous Condensers[C]. 2023 10th International Forum on Electrical Engineering and Automation, Nanjing, China, 2023: 484-488.
- [10] Z. Liu, H. Qi, M. Xu, et al. Optimization and Transient Analysis of Distributed Asynchronous Condenser[J]. IEEE Access, 2022, 10: 45811-45819.
- [11] 杜维柱,罗亚洲,李莲红等.风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J].中国电机工程学报,2022,42(09):3224-3239.
- [12] 闫朋,曾四鸣,李铁成等.基于改进量子遗传算法的虚拟电厂在长时间尺度下参与 AGC 优化调度[J].电网与清洁能源,2023,39(03):23-32.



曹仕涛

收稿日期:2024-07-21。

作者简介:

曹仕涛(1999),男,硕士研究生,研究方向为电力系统规划运行与新能源发电研究,E-mail:cao36992022@163.com;

石开明(1970),男,副教授,硕士生导师,研究方向为电力系统规划运行与新能源发电研究,E-mail:skming2006@126.com。

(编辑 五号楷体,居右,段前空 6pt)

文章编号: \*\*\*\*\* 中图分类号: \*\*\*\*\* 文献标志码: \* 学科代码: \*

# 基于多源信息融合的海上风电机组逆变模块故障诊断

刘浩<sup>1</sup>, 王荣杰<sup>1,2,\*</sup>, 王亦春<sup>1,2,\*</sup>, 张博<sup>1</sup>, 王耀琪<sup>1</sup>

(1.集美大学轮机工程学院、福建 厦门 361021;

2.福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

\*通讯作者: [cd604@163.com](mailto:cd604@163.com)

## Fault Diagnosis of Offshore Wind Turbine Inverter Modules Based on Multi-Source Data Fusion

Hao Liu<sup>1</sup>, Rongjie Wang<sup>1,2</sup>, Yichun Wang<sup>1,2,\*</sup>, Bo Zhang<sup>1</sup>, Yaoqi Wang<sup>1</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen Fujian 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen Fujian 361021, China)

\*Corresponding author: [cd604@163.com](mailto:cd604@163.com)

**ABSTRACT:** Given the harsh operating environment of offshore wind turbines and the high similarity of fault features in inverter modules, this paper proposes a fault diagnosis method based on attention mechanism-weighted fusion and one-dimensional convolution of multi-source data. By extracting multi-source information from the inverter modules, accurate fault localization and identification are achieved. Firstly, a parallel one-dimensional convolutional neural network is constructed to effectively extract fault features from multi-source raw data. Then, an attention mechanism is introduced to perform weight-ed fusion of the extracted fault features, improving the diagnostic accuracy. Finally, the weighted and fused fault features are classified and identified. Semi-physical simulation experiments for inverter module faults show that this method can extract highly distinguishable fault types from the collected multi-source sensor signals, with a diagnostic accuracy exceeding 99%. Compared to other diagnostic methods, this method achieves higher fault diagnosis accuracy.

**KEY WORDS:** Multi-source Information Fusion; Offshore Wind Turbines; Inverter Modules; Attention Mechanism; Fault Diagnosis

**摘要:** 针对海上风电机组运行环境恶劣, 逆变模块容易发生

故障且故障特征相似度高的难题, 本文提出一种结合注意力机制和多源数据一维卷积的故障诊断方法。该方法通过提取逆变模块的多源信息, 有效实现故障的精确定位和准确识别。首先, 构建并行一维卷积神经网络, 从多源原始数据中提取故障特征; 然后, 利用注意力机制加权融合所提取的故障特征; 最后, 对融合后的故障特征进行分类识别。逆变模块故障半实物仿真实验的诊断结果表明, 该方法可以从采集到的多源传感器信号中准确提取出高辨识度的故障特征, 诊断准确率超过 99%。与其他诊断方法相比, 该方法的诊断准确率更高, 表现出更强的故障故障诊断能力。

**关键词:** 多源信息融合; 海上风电机组; 逆变模块; 注意力机制; 故障诊断

**DOI:** \*\*\*\*\*

## 0 引言

在“双碳”目标和新能源发展的背景下, 我国制定了一系列关于风力发电发展的战略和政策<sup>[1]</sup>, 海上风电作为风电领域的重要组成部分, 具有巨大的发展潜力。然而, 由于风电机组运行环境的复杂性和恶劣条件, 逆变模块经常在过载、过压、腐蚀、潮湿的环境下工作, 导致逆变模块故障的风险大幅增加<sup>[2]</sup>。随着风电机组大规模并网, 对其健康管理的重要性日益凸显, 这对于保障风电场安全运行和构建新型能源体系至关重要<sup>[3]</sup>。

随着深度学习技术的迅速发展, 基于深度学习算法的故障诊断方法在逆变模块故障诊断领域得到了广泛应用<sup>[4,5]</sup>。深度学习具有强大的学习能力,

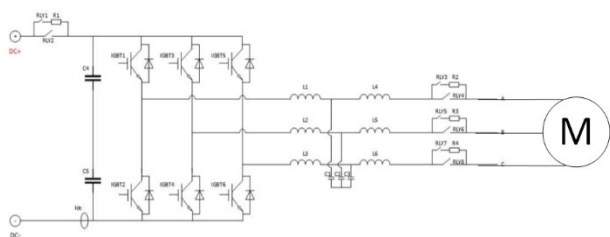


能够从大量的原始数据中提取高层次特征,从而实现故障识别和定位<sup>[6, 7]</sup>。文献[8]提出了一种三相永磁同步电机(PMSM)驱动系统中VSI的故障诊断方法,仅采用三相电流信号作为深度神经网络的输入。文献[9]针对三电平中性点钳位(NPC)逆变器提出了一种基于改进随机梯度优化方法的新型一维卷积神经网络(CNN),该方法采集较短时间内的故障信号即可完成故障诊断。文献[10]提出了一种基于一维卷积的电机故障诊断方法,该方法仅使用电流信号作为神经网络的输入。综合这些研究成果可以看出,基于深度学习算法的故障诊断方法在逆变模块故障诊断领域有着巨大的潜力和应用前景。

但上述的方法仅采集一类故障信号送入神经网络中进行训练,针对一些故障特征相似度较高、某个数据源失效或数据质量较差等问题时,无法提供有效故障特征。而多源信息融合可以弥补单一数据源的不足、提取更准确的故障特征,从而降低误诊、漏诊的概率,提高系统的可靠性和鲁棒性<sup>[11]</sup>。因此,本文以海上风电机组逆变模块为研究对象,提出了一种基于多源信息融合的故障诊断方法。首先,引入多输入的并行一维卷积神经网络,对不同源数据进行故障特征提取;然后,利用注意力机制对提取到的特征向量进行加权融合,保留重要特征忽略无用特征;最后,通过Softmax层输出分类结果,完成对逆变模块的故障诊断。

## 1 问题描述

海上风电机组的逆变模块关键的能源转换和整合接口,必须得到有效保护以确保系统的可靠运行<sup>[12]</sup>。逆变模块故障主要为功率管击穿或损坏,以及错误的驱动信号导致功率管误触发,进而导致短路或开路故障。然而,在工程应用中通常会配置硬件保护电路或快速熔断器来保护电路。当短路故障发生时,保护电路将切断故障单元,因此短路故障可以等效为开路故障。三相桥式全控型两电平逆变器的拓扑如图1所示。



图(1) 三相桥式全控型两电平逆变器的拓扑示意图

由实验可知,当出现超过2个功率管发生开路

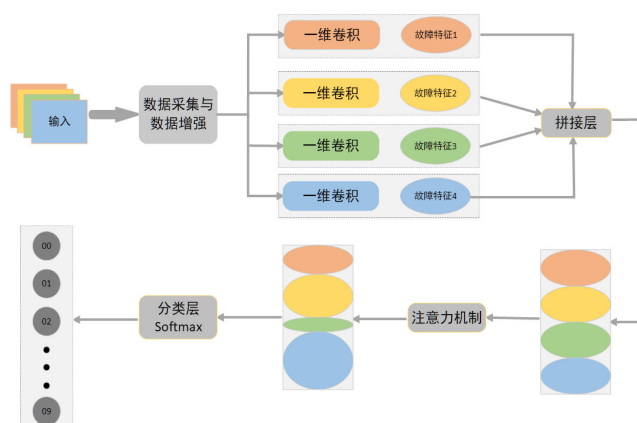
故障时系统会直接陷入瘫痪状态,因此,本文在故障类型设置上主要考虑了单管和双管故障状态,其中在同相双管、异相同侧双管和异相异侧双管中只选取了一种作为代表,即1A1B、1A2A和1A2B。因此,本文的共设置了10种故障类型,包括正常状态。具体故障位置和组合情况如表1所示。

表(1) 逆变器故障分类

| 状态 | 故障类型   | 故障位置 | 标签 |
|----|--------|------|----|
| 正常 | 无      | 无    | 00 |
| 故障 | 单管     | 1A   | 01 |
|    |        | 1B   | 02 |
|    |        | 2A   | 03 |
|    |        | 2B   | 04 |
|    |        | 3A   | 05 |
|    |        | 3B   | 06 |
|    | 异相异侧双管 | 1A2B | 07 |
|    | 异相同侧双管 | 1A2A | 08 |
|    | 同相双管   | 1A1B | 09 |

## 2 方法论

基于多源信息融合的海上风电系统逆变模块诊断框架如图2所示,主要包括数据采集与数据增强、多源信息特征提取、注意力机制加权融合和故障分类四个关键步骤。这一框架的设计旨在综合利用各种信息源,弥补单一数据源的不足,以提高故障特征的准确性,并为故障诊断提供更全面的信息视角。



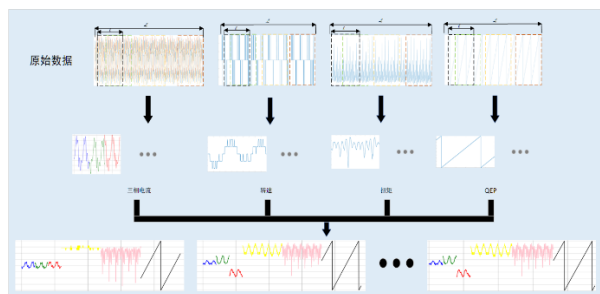
图(2) 多源信息融合网络的特征结构

### 2.1 数据采集与数据增强

在电气故障发生时,故障只会存在很短的时间就会引发一系列的保护措施或者其他并发故障,导致数据采集时间极短。这使得获取足够的数据样本以供深度网络训练变得困难。因此,采用有效的数据增强方法至关重要,它不仅可以防



止模型发生过度拟合,还能够提高模型的泛化性能<sup>[13]</sup>。本文采用随机切片采样方法,对原始一维原始数据进行扩充,以便于深度神经网络训练。具体过程如图3所示。

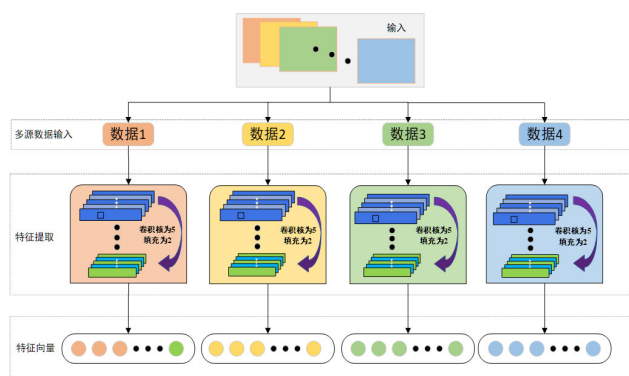


图(3) 随机切片采样

## 2.2 网络结构模型

### (1) 多源信息特征提取

多源信息一维卷积是一种处理来自多个独立数据源信息的深度学习架构。该架构通过并行运行多个一维卷积层,分别处理不同数据源的信息。每个一维卷积层专注于从特定数据源中提取故障特征,确保网络能够有效地捕捉每个数据流中的特征信息。在这种处理方式下,每个数据源的信息被独立处理,互不干扰,这意味着每个源的特征提取和学习过程都是相互独立的。这种独立性是理解和分析复杂数据中模式的关键。通过独立处理每个数据源,网络可以更好地适应不同来源的信息,并更有效地学习到数据中的潜在规律和特性。该深度学习架构的网络结构如图4所示。



图(4) 多源信息特征提取网络结构

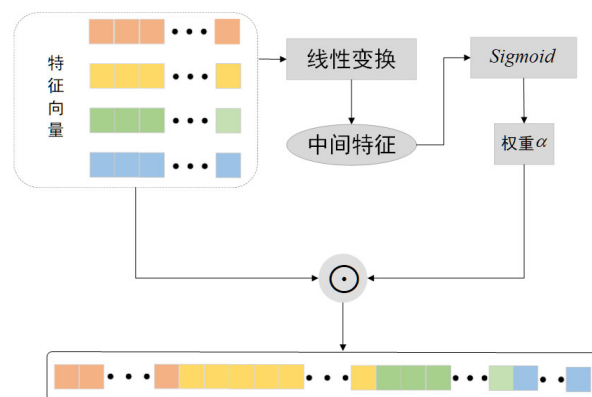
多源信息一维卷积的定义如式1所示:

$$Y_i = \text{LeakyReLU}(W_i^{(5)} * X_i + b_i) \quad (1)$$

式中,\*为卷积算子; $X_i$ 是第*i*个数据源的输入数据序列; $W_i^{(5)}$ 是*i*个卷积核; $b_i$ 是第*i*个卷积层的偏置; $Y_i$ 是第*i*个数据源经过卷积层后的输出特征; $\text{LeakyReLU}$ 是激活函数。

### (2) 注意力机制加权融合

在处理特征提取结果时,本文采用了注意力机制来提升特征融合效果,通过自注意力机制评估多源数据特征之间的关系,生成对应的注意力权重。利用这些权重对特征进行加权操作,有效整合各个特征。该注意力机制特征融合层如图5所示。



图(5) 注意力机制特征融合层

首先将由多源信息中提取的特征向量 $O_t = [O_1, O_2, \dots, O_t]$ 经过一个注意力模块的处理,通过线性变换得到中间特征 $Z_k$ 。接着,通过一个非线性变换函数— $\text{Sigmoid}$ 函数对 $Z_k$ 进行处理,生成注意力权重向量 $\alpha$ 。最终,这个注意力权重 $\alpha$ 被用来对原始特征向量 $O_t$ 进行逐元素的相乘操作,生成经过注意力机制加权的特征向量 $y$ 。这一过程的数学表达式如式2所示:

$$\begin{aligned} Z_k &= W_k O_t + b_k \\ \alpha &= \sigma(Z_k) \\ y &= \alpha \odot Z_k \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $W_k$ 是线性变换的权重矩阵; $b_k$ 是偏置项;

$\sigma$ 是 $\text{Sigmoid}$ 激活函数,用于将线性变换后的输出映射到(0,1)范围内; $\alpha$ 表示权重; $\odot$ 表示逐元素乘法,即Hadamard乘积。

## 2.3 网络优化方法

在模型训练初期,使用较大的学习率有助于加速模型收敛到最优解。然而,随着训练的进程,逐步减小学习率是为了避免过高的学习率导致模型无法稳定收敛或出现发散。为了动态调整学习率,余弦退火算法被广泛采用。其调整学习率的公式通常采用余弦函数,这种方法能够平稳地降低学习率而不至于引起模型训练的不稳定性。因此,在实际的深度学习应用中,余弦退火

算法被证明是一种有效的学习率调整策略，能够帮助模型更好地收敛到全局最优点。。余弦退火算法调整学习率的公式通常如式 3 所示：

$$\eta_t = \eta_{\min} + \frac{1}{2}(\eta_{\max} - \eta_{\min}) \left( 1 + \cos\left(\frac{t\pi}{T}\right) \right) \quad (3)$$

式中， $\eta_t$  是第  $t$  轮训练的学习率； $\eta_{\min}$  和  $\eta_{\max}$  分别是学习率的最大值和最小值； $t$  是当前轮次； $T$  是学习率退火周期的总轮次数，即在多少轮内完成从  $\eta_{\max}$  到  $\eta_{\min}$  的过度。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 半实物仿真实验

为了验证所提出的方法，进行了半实物仿真实验，使用了一台 PMSM 作为实验平台。实验平台如图 6 所示。该实验平台包括一台处理器为 i7-10700F, 16GB 内存和 NVIDIA GeForce GTX 3060 Ti GPU 的上位机、配备了 YXSPACE-SP2000 快速原型控制器、电力电子功率硬件 YXPHM-TP2xb-I 以及带编码器的永磁同步电机搭建。本文的故障诊断算法是在开源的神经网络框架“Pytorch”上进行实验的，使用 Python3.10 进行编程。



图 (6) 半实物仿真实验平台

#### 3.2 数据集划分

为了验证本文所提出的方法在海上风电机组逆变模块故障诊断中的有效性和适用性，使用半实物仿真实验平台进行模拟实验，模拟了逆变器单管及双管开路故障情况，并在 10kHz 采样频率下对输出电流信号、电机转速、扭矩和 QEP 信号进行采样和分析。故障类型分为 10 类，包括单管开路、双管开路和正常状态，具体数据描述请参

考图 7。

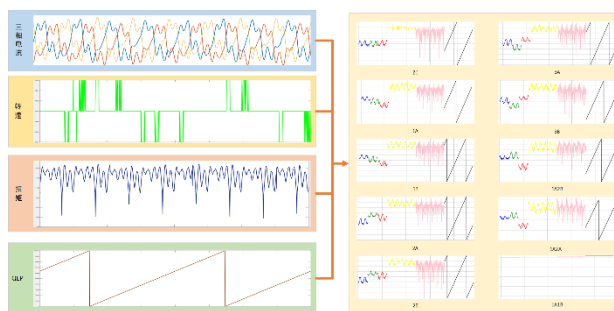


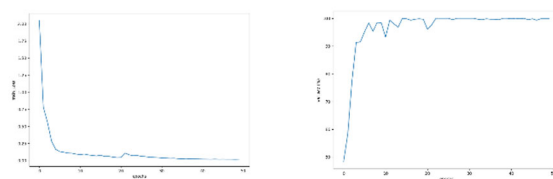
图 (7) 故障类型波的波形

如图 7 所示，首先对左侧采集的原始数据进行数据预处理，将采集到的一维故障数据中 70% 作为训练集原始样本，20% 作为验证集原始样本，10% 作为测试集原始样本，采用 2.1 节的方法进行数据增强，以满足实验要求。在进行数据增强时，每类数据都被长度为 600 窗口随机切片，并根据训练集、验证集和测试集的比例进行划分：在训练集中，每类故障有 400 个样本；在验证集中，每类故障有 60 个样本；在测试集中，每类故障有 40 个样本。

为了解决不同数据幅值大小不一致的问题，在数据拼接前进行了归一化处理，将数据幅值压缩到 -1 到 1 范围内。这样可以确保各类数据在送入模型前具有相同的重要性，避免幅值差异对处理结果的影响。这种个性化的归一化处理方式有助于提高数据处理的准确性和稳定性，保证模型的有效性和可靠性。

#### 3.3 模型性能分析

利用处理完善的数据集对模型进行训练，其训练损失曲线和验证集准确率曲线如图 8 所示。从图中可以看出，训练初期损失迅速下降，随后趋于稳定；同时验证集准确率在最初迅速提高后也保持稳定。这表明该模型展现出了良好的稳定性和高效的诊断性能，能够在故障诊断任务中高效准确地完成任务。



损失曲线

验证集准确率曲线

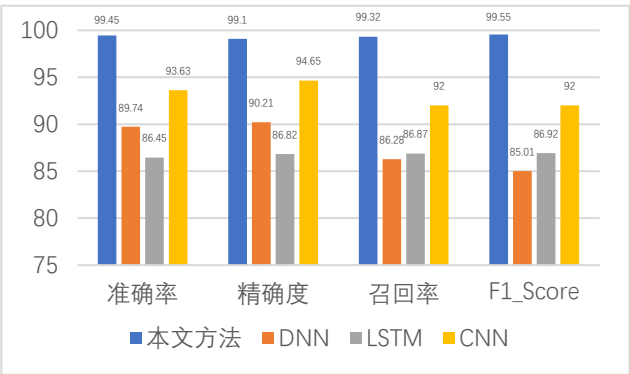
图 (8) 损失曲线和验证集准确率曲线

测试集被用来评估经过训练的模型性能，通常使用准确率(ACC)、精确度(P)、召回率(R)和 F1\_score 四个指标。获得的评估指标如表 2 所示。经过评估后发现，多源信息融合模型在捕捉不同故障特征上表现出色，能够准确地辨别出不同的故障类型。这表明该模型具有较高的分类准确性和鲁棒性，在实际应用中具有潜在的价值。

表（2）模型性能评估指标

| 准确率    | 精确度   | 召回率    | F1_Score |
|--------|-------|--------|----------|
| 99.45% | 99.1% | 99.32% | 99.55%   |

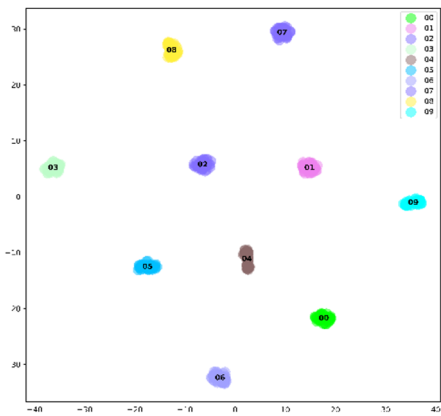
为了进一步验证本文多源信息融合模型的性能，将本文的诊断表现与其它主流深度学习模型诊断性做对比，结果如图 9 所示。



图（9）与其他主流算法的比较

通过图表数据分析，本文使用的算法在准确率、精确度、召回率和 F1\_score 等指标上表现出色，超越其他主流深度学习算法。该算法能够有效区分相似特征的故障类型并具有较强的识别能力。

为更好展示模型的故障诊断性能，在图 10 中展示了测试集的 T-SNE 可视化结果。通过这种方式，能够清晰地观察到模型对于不同故障情况的分类效果，进一步验证其准确性和可靠性。图中展示了不同故障类别的故障特征分布情况，不同颜色代表不同故障类别的故障特征，显示出它们之间的明显聚集效应。特征间没有出现混叠现象。



图（10）T-SNE 可视化

结论

本文以海上风电机组逆变模块为对象，提出了一种多源信息融合的故障诊断方法。通过半实物仿真实验提取了多源数据，为诊断模型提供了更全面的信息视角，弥补了单一数据源的不足。实验结果表明该方法可以准确区分不同故障特征，能够有效区分故障类型。与其它主流深度学习算法比较，本文方法更有优势。

参考文献

[1] 彭慧. 海上风电是未来新能源发展的重要方向 [N]. 2023-09-07.

[2] CUI Y, WANG R, SI Y, et al. T-type inverter fault diagnosis based on GASF and improved AlexNet [J]. 2023, 9: 2718-31.

[3] 李相俊, 官亦标, 胡娟, et al. 我国储能示范工程领域十年（2012—2022）回顾 [J]. 2022, 11(9): 2702.

[4] 陈雪峰, 郭艳婕, 许才彬, et al. 风电装备故障诊断与健康监测研究综述 [J]. 2020, 31(2).

[5] FU Y, JI Y, MENG G, et al. Three-Phase Inverter Fault Diagnosis Based on an Improved Deep Residual Network [J]. 2023, 12(16): 3460.

[6] HUSSAIN M, MEMON T D, HUSSAIN I, et al. Fault Detection and Identification Using Deep Learning Algorithms in InductionMotors [J]. 2022, 133(2).

[7] YU J, ZHANG Y J N C, APPLICATIONS. Challenges and opportunities of deep learning-based process fault detection and diagnosis: a review [J]. 2023, 35(1): 211-52.

[8] YAN H, PENG Y, SHANG W, et al. Open-circuit fault diagnosis in voltage source inverter for

- motor drive by using deep neural network [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 120: 105866.
- [9] YUAN W, LI Z, HE Y, et al. Open-Circuit Fault Diagnosis of NPC Inverter Based on Improved 1-D CNN Network [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.
- [10] INCE T, KIRANYAZ S, EREN L, et al. Real-time motor fault detection by 1-D convolutional neural networks [J]. 2016, 63(11): 7067-75.
- [11] 李令莱, 信息与控制 周 J. 基于解析模型的非线性系统鲁棒故障诊断方法综述 [J]. 2004, 33(4): 451-6,62.
- [12] CATALÁN P, WANG Y, ARZA J, et al. A Comprehensive Overview of Power Converter Applied in High-Power Wind Turbine: Key Challenges and Potential Solutions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6169-95.
- [13] CHEN H, HU N, CHENG Z, et al. A deep convolutional neural network based fusion method of two-direction vibration signal data for health state identification of planetary gearboxes [J]. 2019, 146: 268-78.

---

作者简介:

刘浩, 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋牧场供电系统故障诊断,

E-mail: lauh66@163.com;

王荣杰, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为图像处理和新型电力系统故障诊断, E-mail: Roger11207@163.com。

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07

中图分类号: TK01+1

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 基于改进组合赋权 MARCOS 的配电网运行状态 评估研究

何泽霖<sup>1</sup>, 张龙添<sup>2</sup>, 李佳丽<sup>2</sup>, 马 硕<sup>2</sup>, 王德林<sup>2</sup>, 王世山<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 唐山研究院, 河北 唐山 063000; 2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756;  
3. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

## Research on Operational State Assessment of Distribution Network Based on Improved Combination Weights MARCOS

HE Zelin<sup>1</sup>, ZHANG Longtian<sup>2</sup>, LI Jiali<sup>2</sup>, MA Shuo<sup>2</sup>, WANG Delin<sup>2</sup>, WANG ShiShan<sup>3</sup>

(1. School of Tangshan Institute, Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, China; 2. School of Electrical Engineering,  
Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 3. School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and  
Astronautics, Nanjing 210016, China)

**ABSTRACT:** Systematic assessment of distribution network operation state is necessary to ensure the safe and stable operation of distribution network, in order to accurately grasp the operation state of distribution network, a method for assessing the operational state of distribution networks based on improved combination weights MARCOS is proposed.. Firstly, a set of key index system for assessing the operating state of distribution network is constructed. Secondly, the FBWM method is used to process the subjective fuzzy semantic assessment information of experts on the qualitative indicators, the improved CRITIC method is proposed to dynamically respond to the objective weights of the indicators, and finally, the utility function of the distribution network to be assessed is calculated by integrating the combination of weights to the improved MARCOS method, and the superiority or inferiority scores of the distribution network operating status are obtained based on the results of the calculation of the utility function. The utility of the proposed method is verified by the IEEE 13-bus distribution system example, and the evaluation results can provide effective guidance for the optimal operation of distribution networks.

**KEY WORDS:** distribution network condition assessment; Improvement of CRITIC method; combination weights; improvement of MARCOS method

**摘要:** 对配电网运行状态进行系统性的评估是保证配电网安全稳定运行的必要条件, 为准确的掌握配电网的运行状态, 提出了一种基于改进组合赋权 MARCOS 配电网运行状态评

估方法。首先构造了一套评估配电网运行状态的关键指标体系。其次, 用 FBWM 方法处理专家对定性指标的主观模糊语义评估信息, 提出改进的 CRITIC 方法动态响应指标客观权重, 最后融合组合权重到改进后的 MARCOS 方法计算待评估配电网的效用函数, 根据效用函数的计算结果得到配电网运行状态的优劣度评分。通过 IEEE 13 节点配电系统算例验证了所提方法的实用性, 评估结果可为配电网优化运行提供有效指导。

**关键词:** 配电网状态评估; 改进 CRITIC 方法; 组合赋权; 改进 MARCOS 方法

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

随着智能电网建设的不断推进, 配电网的结构与运行状态变得愈加复杂, 为了实现配电网长期安全可靠运行, 构建一种可靠的评估方法, 科学地评估配电网运行状态具有重要意义。

采用多指标赋权综合评估的方法进行状态评估<sup>[1-2]</sup>是该领域的一个重要研究方向。文献[3]构建了一个包含安全态势、经济态势、低碳态势和调控态势四个方面的评估指标体系, 但在实际应用中需要大量复杂的计算。

为了得到科学合理的指标权重, 文献[4]采用了一种新兴的模糊最优最劣方法 (Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method, FBWM) 确定评估指标的主观权重, 该方法通过引入模糊数更精准的捕捉决策者的偏好, 有效反映了赋权时的主观关键因素。文献[5-6]通过结合主观和客观权重计算评估指标的综合权重, 但对专家经验的依赖可能影响评估结果的普适性。文献[7]实现对评估指标影

基金项目: 四川省成都市科技局揭榜挂帅项目 (2023-JB00-00002-SN), 国家自然科学基金项目(52207117)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(52207117).



响权重的动态赋予，但是都缺乏对主观因素的考虑。

状态评估的最后阶段，需要充分利用指标数据信息和对应权重获取最终的状态评估结果。基于折中方案的备选方案排序法（measurement of alternatives and ranking according to compromise solution, MARCOS）作为多准则决策方法中的一种新型方法，该方法便于应用且简单可靠，但要应用于配电网运行状态评估时需要考虑不同时段指标数据的差异性[8]。

## 1 评估指标体系构建

构建的配电网运行状态评估指标体系需要满足系统性、客观性、实用性原则，能够综合反映配电网的运行状况和特征，同时要兼顾数据获取难度、处理难度等方面的要求[9-10]。本文考虑从安全性、经济性、优质性、可靠性这4个角度对配电网运行状态进行综合评估，评估指标体系如图1所示。

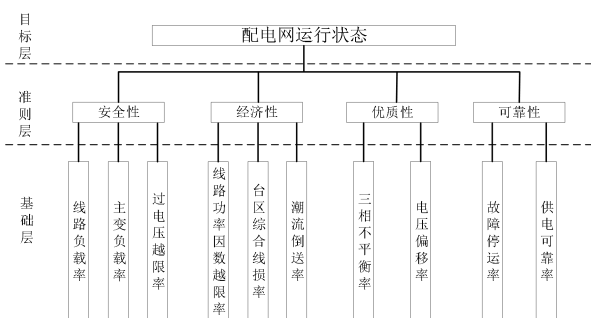


图1 配电网运行状态评估指标体系

Fig. 1 Indicator system for distribution network operation status assessment

所构建的评估指标体系分为3层，分别如下：

第1层为目标层，即配电网的运行状态，其评估结果表征配电网的总体运行状态优劣程度；

第2层为准则层，分为安全性、经济性、优质性、可靠性4个角度，其评估结果表征配电网不同角度下的状态优劣程度；

第3层为基础层，其均为配电网数据采集系统中直接获取或间接计算得到的指标数据。

## 2 改进组合赋权 MARCOS 评估方法

### 2.1 基于 FBWM 法的主观权重计算

本文采用 FBWM 法进行主观权重的计算，通过模糊逻辑处理不确定性，更适用于处理主观因素的模糊场景，FBWM 法求解步骤如下：

1) 确定评估指标集  $\{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n\}$ ，其中  $n$  为评估指标个数；

2) 确定评估指标中的相对最重要指标  $\eta_B$  和最不重要指标  $\eta_W$ ；

3) 专家使用模糊评语变量确定最重要、最不重要指标与所有指标相比的重要程度，模糊评语转换规则如表1所示。

表1 模糊评语变量转换规则

Table 1 Transformation rules for fuzzy rubric variables

| 模糊评语变量 | 三角模糊数       |
|--------|-------------|
| 同等重要   | (1,1,1)     |
| 一般重要   | (2/3,1,3/2) |
| 很重要    | (3/2,2,5/2) |
| 非常重要   | (5/2,3,7/2) |
| 绝对重要   | (7/2,4,9/2) |

4) 通过专家的模糊评语变量构建最重要指标相对所有指标的偏好向量  $Y_B$  为

$$Y_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad (1)$$

式中， $a_{Bj}$  为最重要指标与第  $j$  个指标的模糊对比值， $j=1,2,3,\dots,n$ 。同理可得到最不重要指标相对所有指标的偏好向量  $Y_W$  为

$$Y_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}) \quad (2)$$

式中， $a_{jW}$  为第  $j$  个指标与最不重要指标的模糊对比值， $j=1,2,3,\dots,n$ ； $a_{BB}=a_{WW}=(1,1,1)$ 。

5) 求解目标规划模型求出最优的模糊指标权重  $(\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*)$ ，目标规划模型为：

$$\begin{aligned} \min \quad & \max_j \left\{ \left| \omega_B / \omega_j - a_{Bj} \right|, \left| \omega_j / \omega_W - a_{jW} \right| \right\} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{j=1}^n R(\omega_j) = 1 \\ \omega_j > 0 \quad j=1,2,\dots,n \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

目标规划模型使专家在所有指标之间的判断达到最佳一致性。采用信赖域约束法[11]求解目标规划模型得到最优权重向量  $(\omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_n^*)$  后，再通过分级积分表示法[12]即可将三角模糊数转换为一个反映其整体特征的单值，并将其作为各评估指标的主观权重值，分级积分法的具体表达式为

$$R(\omega_j) = \frac{1}{6}(l_j + 4m_j + u_j) \quad j=1,2,\dots,n \quad (4)$$

式中， $l_j$ 、 $m_j$ 、 $u_j$  分别为第  $j$  个指标权重  $\omega_j$  的三角模糊数下界、最可能值和上界。

### 2.2 基于改进 CRITIC 法的客观权重计算

本文提出改进的 CRITIC 法使其得到的客观权重能更加灵敏的反映配电网的运行状态。CRITIC 法利用指标的标准差来衡量数据间的差异性，并使用相关系数来量化指标间的冲突性，每个指标的标准差和指标间的相关系数表达式如下：



$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\rho_{ij}^* - \bar{\rho}_j^*)^2} \quad j=1,2,\dots,n \quad (5)$$

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{\sigma_i \sigma_j} \text{cov}(\mathbf{P}_i^*, \mathbf{P}_j^*) \quad i, j=1,2,\dots,m \quad (6)$$

式中,  $\bar{\rho}_j^*$  为第  $j$  个指标的均值;  $\text{cov}(\mathbf{P}_i^*, \mathbf{P}_j^*)$  表示正向归一化矩阵  $\mathbf{P}^*$  中第  $i$  个指标与第  $j$  个指标的协方差;  $\sigma_j$  为第  $j$  个指标的标准差;  $\lambda_{ij}$  为指标  $i$  和指标  $j$  间的相关系数。

每个指标中的信息量  $X_j$  表达式为

$$X_j = \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad i, j=1,2,\dots,n \quad (7)$$

式 (7) 中  $X_j$  越大, 代表第  $j$  个指标中的信息量越大, 该指标对评估结果的影响也相对更大, 第  $j$  个指标的初步客观权重  $w_j$  表达式为

$$w_j = X_j / \sum_{i=1}^n X_i \quad (8)$$

在实时的评估过程中, 某些指标出现急剧恶化的情况时, 其相对重要程度提升。因此, 本文引入变权系数  $\gamma$  动态调整初步客观权重, 其表达式为

$$\gamma_j = e^{\lambda k_j} \quad (9)$$

式中,  $\gamma_j$  为第  $j$  个指标数据的变权系数;  $\lambda$  为增益系数, 其取值用于调节变权强度;  $k_j$  为第  $j$  个指标数据的线性回归趋势线斜率, 用其来表示指标数据的变化趋势。

线性回归趋势线斜率  $k_j$  的表达式为

$$k_j = \frac{\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x})(\rho_{ij} - \bar{\rho}_j)}{\sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

式中,  $\bar{\rho}_j$  为第  $j$  个指标的平均值;  $x_i$  代表该指标第  $i$  个时序下的值;  $\bar{x}$  为  $\tau$  个指标数据的平均值。

对初步客观权重向量  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_n]$  应用 Hadamard 乘积与  $\gamma$  相乘, 即可得到变权后的最终客观权重, 其表达式为

$$\mathbf{w} = \mathbf{w} \gamma / \sum_{j=1}^n w_j \gamma_j \quad (11)$$

式中,  $\gamma$  为变权系数向量;  $\mathbf{w}$  为初步客观权重向量。

经过变权后的客观权重适当调整权重大小, 使得具有明显恶化趋势的指标权重更大, 从而使得权重结果能更灵敏的反应配电网状态的变化。

### 2.3 组合权重计算

为使组合权重不偏重主客观权重中的任意一项, 采用最小鉴别信息原理<sup>[11]</sup>计算组合权重, 其目标函数以及约束式为:

$$J(\omega) = \min \sum_{j=1}^n (\omega_j \ln \frac{\omega_j}{\alpha_j} + \omega_j \ln \frac{\omega_j}{\beta_j}) \quad (12)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \quad j=1,2,\dots,n$$

式中,  $\omega$  为组合权重向量;  $\alpha_j$  和  $\beta_j$  分别为第  $j$  个指标的主观权重和客观权重。

求解此优化模型后得到的组合权重表示为

$$\omega_j = \sqrt{\alpha_j \beta_j} / \sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j} \quad (13)$$

### 2.4 改进 MARCOS 法的评分计算

本文对传统 MARCOS 法正负理想解的确定方法进行改进, 改进的 MARCOS 法考虑并解决了传统 MARCOS 法是基于数据组内比较的问题, 保证了评估标准的一致性。

#### 2.4.1 加权扩展矩阵的确定

正向归一化矩阵  $\mathbf{P}^*$  即作为 MARCOS 法中的初始评估矩阵, 在初始评估矩阵中引入理想解  $\mathbf{AI}$  和负理想解  $\mathbf{AAI}$  形成扩展矩阵  $\mathbf{D}$ , 其表达式为

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{AAI} & \begin{matrix} \rho_{aa1}^* & \rho_{aa2}^* & \cdots & \rho_{aan}^* \\ \rho_{11}^* & \rho_{12}^* & \cdots & \rho_{1n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1}^* & \rho_{m2}^* & \cdots & \rho_{mn}^* \\ \mathbf{AI} & \begin{matrix} \rho_{a1}^* & \rho_{a2}^* & \cdots & \rho_{an}^* \end{matrix} \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, 负理想  $\mathbf{AAI}$  是具有最差特性的指标数据向量, 理想解  $\mathbf{AI}$  是具有最佳特性的指标数据向量,  $\rho_{aa_j}^*$  和  $\rho_{a_j}^*$  分别为第  $j$  个指标最差和最优的指标值。

$\mathbf{AAI}$  和  $\mathbf{AI}$  分别取各个元素定值为  $\varepsilon$  和 1 的向量,  $\varepsilon$  反映指标理论下限值, 若指标类型不同取值需对应修改, 本文取  $\varepsilon$  为 0.3。

得到扩展矩阵后, 组合权重与扩展矩阵相乘即可得到加权矩阵  $\mathbf{D}_\omega$ 。

#### 2.4.2 基于效用度函数的 MARCOS 评分计算

计算加权矩阵  $\mathbf{D}_\omega$  中的元素相对于理想解与负理想解的效用度表达式如下:

$$\chi_i^+ = \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^* \omega_j / \sum_{j=1}^n \rho_{aj}^* \omega_j \quad (15)$$

$$\chi_i^- = \sum_{j=1}^n \rho_{ij}^* \omega_j / \sum_{j=1}^n \rho_{aa_j}^* \omega_j \quad (16)$$

式中,  $\chi_i^+$  为第  $i$  个时序下指标数据相对于理想解的效用度;  $\chi_i^-$  为第  $i$  个时序下指标数据相对于负理想解的效用度。

得到每组指标数据的效用度后, 进而通过效用度函数的值得到各个时序配电网状态的优劣度评分作为最终的评估得分, 效用度函数的表达式为

$$f(x_i) = \frac{x_i^+ + x_i^-}{1 + \frac{1 - f(x_i^+)}{f(x_i^+)} + \frac{1 - f(x_i^-)}{f(x_i^-)}} \quad (17)$$

式中,  $f(x_i^+)$  表示与理想解相关的效用函数,  $f(x_i^-)$  表示与负理想解相关的效用函数,  $f(x_i)$  表示第  $i$  个时序数据的效用函数。

评估得分值的大小反映评估配电网各个指标的优劣程度, 值越大代表配电网运行情况越好。

## 2.5 总体评估流程

得到配电网的各项运行数据后, 通过 2.1 节计算步骤得到 FBWM 法主观权重。再根据收集到的配电网运行数据, 通过 2.2 节的计算步骤可得到改进后的 CRITIC 法客观权重, 进一步根据 2.3 节方法确定指标的组合权重, 至此完成评估方法的赋权部分, 将组合权重应用到 MARCOS 方法, 根据 2.4 节计算步骤即可得到最终的配电网综合评估结果, 配电网运行状态评估总体流程如图 2 所示。

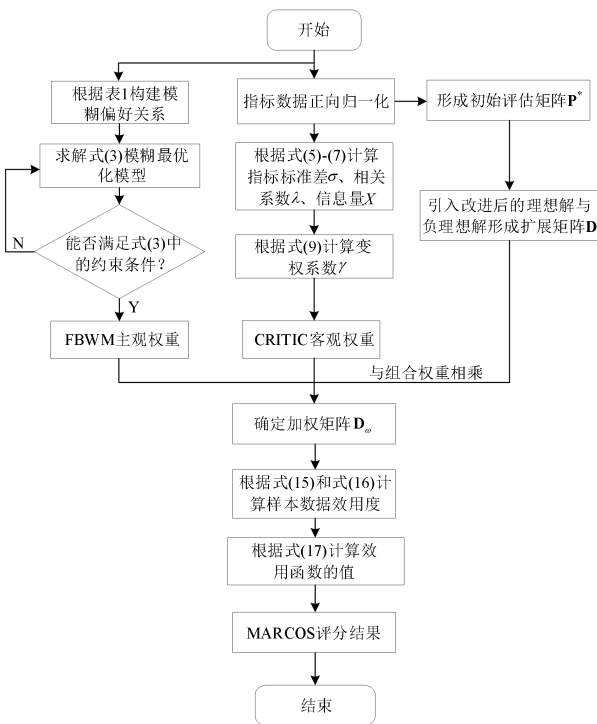


图2 总体状态评估流程

Fig. 2 General status assessment process

## 3 算例

本文基于 OpenDSS (Open Distribution System Simulator) 仿真软件以 IEEE-13 节点配电系统模拟实际配电网运行场景, 根据算例分析结果验证本文方法的可行性, 再对比传统方法计算结果验证所提方法的有效性。

### 1) 基于 FBWM 法的主观权重

使用 FBWM 法根据 2.1 节的步骤确定评估指标体系的主观权重, 同时计算了指标的 AHP 法主观

权重加以对比分析, 计算结果如表 2 所示。

表2 各层次评估指标的 FBWM 法权重和 AHP 法权重  
Table 2 FBWM method weights and AHP method weights for each level of assessment indicators

| 准则层<br>指标 | FBWM权重<br>/AHP权重 | 基础层指标   | FBWM权重<br>/AHP权重 |
|-----------|------------------|---------|------------------|
| 安全性       | 0.60/0.48        | 线路负载率   | 0.34/0.30        |
|           |                  | 主变负载率   | 0.44/0.53        |
|           |                  | 过电压越限率  | 0.22/0.17        |
|           |                  | 线路功率因数  | 0.23/0.16        |
| 经济性       | 0.09/0.07        | 越限率     | 0.45/0.54        |
|           |                  | 台区综合线损率 | 0.32/0.30        |
|           |                  | 潮流倒送率   | 0.45/0.54        |
| 优质性       | 0.12/0.15        | 三相不平衡率  | 0.55/0.46        |
|           |                  | 电压偏移率   | 0.40/0.34        |
| 可靠性       | 0.19/0.30        | 故障停运率   | 0.60/0.66        |
|           |                  | 供电可靠率   |                  |

由表 2 的数据可知, 由两种方法得到的主观权重结果整体接近, 如准则层指标的权重大小排序都是安全性>可靠性>优质性>经济性, 可见 FBWM 法权重能够有效体现专家主观意见。同时, FBWM 法相较于传统 AHP 法无需根据各层级指标一一构造判断矩阵, 只需给出最优、最劣向量即可计算得出主观权重, 简化了计算过程, FBWM 法引入的三角模糊数变量转换专家的模糊语句, 解决了传统方法对专家主观随意性考虑不足的问题。

### 2) 基于改进 CRITIC 法的客观权重

使用改进的 CRITIC 法根据 2.2 节的计算步骤确定评估指标体系的客观权重, 同时计算了改进前的 CRITIC 法权重作为对照, 计算结果如表 3 所示。

表3 基础层评估指标的改进前后 CRITIC 法权重  
Table 3 Weights of the CRITIC method before and after the improvement of the indicators for base level

| 基础层指标     | 改进后<br>CRITIC权重 | 改进前<br>CRITIC权重 |
|-----------|-----------------|-----------------|
| 线路负载率     | 0.21            | 0.28            |
| 主变负载率     | 0.32            | 0.35            |
| 过电压越限率    | 0.47            | 0.37            |
| 线路功率因数越限率 | 0.33            | 0.36            |
| 台区综合线损率   | 0.28            | 0.32            |
| 潮流倒送率     | 0.39            | 0.31            |
| 三相不平衡率    | 0.29            | 0.30            |
| 电压偏移率     | 0.71            | 0.70            |
| 故障停运率     | 0.32            | 0.33            |
| 供电可靠率     | 0.68            | 0.67            |

由表 3 可知, 改进后的 CRITIC 权重根据不同指标的劣化趋势或优化趋势进行了更新。如过电压越限率指标在评估时段内有明显的劣化趋势, 其权重上升了 0.1, 成为影响配电网运行状态的主要指标。可见改进的 CRITIC 法根据指标恶化情况动态调整权重, 可用于快速查找配电网运行状态恶化的主要成因。

计算得到指标的主客观权重后, 由 2.3 节方法算出基础层和准则层指标的组合权重如表 4 所示。

表 4 各层次评估指标的组合权重  
Table 4 Combined weights of indicators for each level

| 准则层指标 | 组合权重 | 基础层指标   | 组合权重 |
|-------|------|---------|------|
| 安全性   | 0.42 | 线路负载率   | 0.28 |
|       |      | 主变负载率   | 0.39 |
|       |      | 过电压越限率  | 0.33 |
| 经济性   | 0.11 | 线路功率因数  | 0.28 |
|       |      | 越限率     | 0.36 |
|       |      | 台区综合线损率 | 0.36 |
| 优质性   | 0.22 | 潮流倒送率   | 0.39 |
|       |      | 三相不平衡率  | 0.61 |
|       |      | 电压偏移率   | 0.41 |
| 可靠性   | 0.25 | 故障停运率   | 0.59 |
|       |      | 供电可靠率   | 0.59 |

获取了综合主客观因素的组合权重后,再通过改进的 MARCOS 方法即可计算得到评估指标的优劣度得分结果。

### 3) 与传统方法评估结果对比分析

传统 MARCOS 评估结果与改进后评估的结果对比图如图 3 和图 4 所示。

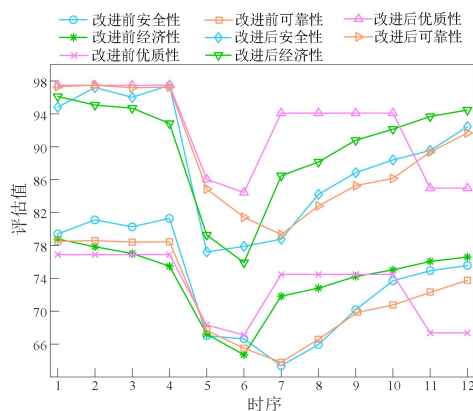


图 3 准则层指标评估得分对比图

Fig. 3 Comparison of assessment scores for normative level indicators

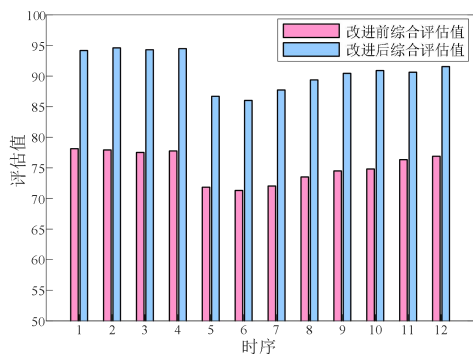


图 4 目标层综合指标评估得分对比图

Fig. 4 Comparison of assessment scores for composite indicators at the target level

传统 MARCOS 方法由于其组内比较的问题,其准则层指标评估值与综合指标评估值在时序 1 至 4 都低于改进后的 MARCOS 方法。同时,对比图 3 准则层可靠性指标第 5 和第 9 个时序的评估结果可以发现,改进前后的 MARCOS 评估结果存在明显差异,传统 MARCOS 方法由于其理想解与负理想

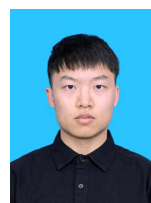
解的选择与组内数据相关,使其得到的结果相差 2 分,改进后的 MARCOS 方法解决了传统方法的在这方面的不足之处,具有更高的准确性。

## 4 结论

本文提出了一种结合组合赋权 MARCOS 的配电网运行状态评估方法,由理论分析和算例验证可知,结合组合赋权到改进后的 MARCOS 方法可以有效应用于配电网状态评估问题,同时解决了传统方法评估标准对于数据的依赖,能够准确的区分不同时段的数据,保证了不同组别数据具有可比性。

## 参考文献

- [1] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 电网运行状态评价指标体系与综合评价方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2245-2252.
- [2] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
- [3] 刘杰, 戴雨剑, 范龙文, 等. 考虑海量可再生能源接入的区域配电网综合态势评估方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 65-74.
- [4] Sun H, Li M X, Jiang H, Ruan X J, Shou W C. Inundation resilience analysis of metro-network from a complex system perspective using the grid hydrodynamic model and FBWM approach: a case study of Wuhan. Remote Sensing[J]. 2022, 14(14): 3451-3451.
- [5] 王敏, 邹婕, 王惠琳, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC-MARCOS 配电网设备风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 164-172.
- [6] 罗宁, 贺墨琳, 高华, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC 组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 86-96.
- [7] 胡润泽, 吕世轩, 张灿, 等. 基于状态熵权和双轨制 TOPSIS 的电能质量实时综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 102-114.
- [8] Stevic Z, Pamucar D, Puska A, et al. Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS). Computers & Industrial Engineering[J]. 2020, 140: 106231.
- [9] 翁国庆, 舒俊鹏, 谢方锐, 等. 基于组合权重及属性区间法的主动配电网运行状态态势评估[J]. 高技术通讯, 2020, 30(11): 1149-1160.
- [10] 徐长宝, 王玉磊, 赵立进, 等. 基于信息趋势预测和组合赋权的智能变电站继电保护系统状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 162-168.
- [11] Byrd R H, Hribar M E, Nocedal J. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming. SIAM Journal on Optimization[J]. 1999, 9(4): 877-900.
- [12] Zavadskas E K, Turskis Z. Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview. Technological and Economic Development of Economy[J]. 2011, 17(2): 397-427.



何泽霖

收稿日期:

作者简介:

何泽霖(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网状态评估, E-mail: hezelinnn@outlook.com;  
王德林(1970), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源并网发电和系统稳定与控制研究等, E-mail: wdl@swjtu.edu.cn.

文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TK01+1 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 基于组合赋权改进遗传算法的配电网承载力评估

张龙添<sup>1</sup>, 何泽霖<sup>2</sup>, 马硕<sup>1</sup>, 李佳丽<sup>1</sup>, 王德林<sup>1</sup>, 王世山<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756; 2. 西南交通大学 唐山研究院, 河北 唐山 063000;

3. 南京航空航天大学 自动化学院 江苏 南京 210016)

## CARRYING CAPACITY ASSESSMENT OF DISTRIBUTION NETWORK BASED ON COMBINED-WEIGHTED IMPROVED GENETIC ALGORITHM

ZHANG Longtian<sup>1</sup>, HE Zelin<sup>2</sup>, MA Shuo<sup>1</sup>, LI Jiali<sup>1</sup>, WANG Delin<sup>1</sup>, WANG Shishan<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 2. School of Tangshan Institute,

Southwest Jiaotong University, Tangshan 063000, China; 3. School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**ABSTRACT:** The paper explores the impact of new energy and energy storage access on distribution network carrying capacity, propose a method for evaluating the carrying capacity of distribution network about improving Pareto optimal genetic algorithm with combination empowerment methodology. Under the premise of considering the integration of new energy and energy storage access to the distribution network, derive the impact of load increase on the status of the distribution network, on this basis, building a distribution network carrying capacity model based on objective function and constraint conditions on this basis. For multi-objective function problems, constructing a distribution network carrying capacity evaluation indicator system with safety, reliability, and economy, then calculate indicator weights using a combination empowerment methodology combining AHP and EWM. Use combination empowerment methodology to improving the evaluation process of Pareto optimal genetic algorithm, so as to achieve the optimal carrying capacity solution. Evaluate the distribution network with new energy and energy storage in example, analyze the potential carrying capacity of the distribution network, provide theoretical basis for regional planning and construction.

**KEY WORDS:** distribution network carrying capacity; combination empowerment methodology; Pareto optimal genetic algorithm; new energy; energy storage

**摘要:** 本文以配电网承载力为研究对象探究新能源及储能接入的影响, 提出一种基于组合赋权法改进 Pareto 最优遗传算法的配电网承载力评估方法。考虑新能源及储能接入配电网前提下, 推导负荷增加对配电网状态的影响, 构建基于目标函数和约束条件的配电网承载力模型; 针对多目标函数问题,

从安全性、可靠性、经济性方面构建了配电网承载力评估指标体系, 并以层次分析法和熵权法结合的组合赋权法对各项指标赋权; 利用组合赋权法改进 Pareto 最优遗传算法的评估过程, 实现最优承载力求解。最后, 基于算例对新能源及储能接入的配电网进行评估, 分析了配电网潜在的承载能力, 为地区规划建设提供理论依据。

**关键词:** 配电网承载力; 组合赋权法; Pareto 最优遗传算法; 新能源; 储能

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

分布式新能源 (Distributed Generation, DG) 充分提高了供电灵活性和电压支撑能力, 但其供电存在不平衡、不确定性; 储能能够利用“削峰填谷”缓解负荷压力, 但是投资成本较大。有必要建立一套科学的、全面的考虑 DG 和储能接入的配电网承载力评估方法。

现阶段对于配电网承载力的评估极少涉及到对负荷的直接计算: 文献[1]~[3]基于电压偏差等指标的分布式光伏并网准入容量规划方法, 以最大光伏并网容量为目标函数, 利用人工智能算法优化求解; 文献[4]分析包括分布式电源的多元接入体的特性, 计算相似度指标, 建立相似度最优和新能源接入量最大为目标的两段优化模型; 文献[7]~[8]选取合适的指标并建立配电网承载力评估指标体系, 以综合评分为结果评价配电网; 文献[11]通过对电能替代的主要负荷进行分析并建模, 基于二阶锥松弛转化承载力优化模型并求解。

综上所述, 现有对配电网承载力评估的研究中大多基于间接测算或者采用指标作为评估手段, 且

基金项目: 四川省成都市科技局揭榜挂帅项目 (2023-JB00-00002-SN), 国家自然科学基金项目 (52207117)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52207117).

多考虑仅接入分布式新能源对配电网承载力进行评估。本文在上述研究的基础上,构建承载力评估的多目标函数和约束条件,从配电网安全、经济、灵活性角度构建配电网承载力评估模型;提出基于组合赋权法改进 Pareto 最优的遗传算法优化求解考虑 DG 及储能加入的配电网承载力。

## 1 配电网负荷承载影响分析

以单条线路的配电网为例分析如图 1,配电网有  $N$  个节点,接入点电压为  $U_0$ ,第  $i$  个节点电压为  $U_i$ ,接入负荷为  $P_i+jQ_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ),节点  $i$  与节点  $i-1$  间的线路阻抗为  $R_i+jX_i$ ,首先分析节点电压实部,假设有功、无功负荷以及电阻、电抗均为正数,则节点  $i-1$  与节点  $i$  的电压差实部  $\Delta U_i$  表示为

$$\Delta U_i = \frac{1}{U_{i-1}} \left[ \sum_{j=1}^N (P_j + P_{\text{loss},j}) R_i + \sum_{j=1}^N (Q_j + Q_{\text{loss},j}) X_i \right] \quad (1)$$

式中,  $P_{\text{loss},j}$  为节点  $j$  至节点  $j+1$  线路的有功损耗,  $Q_{\text{loss},j}$  为节点  $j$  至节点  $j+1$  线路的无功损耗。

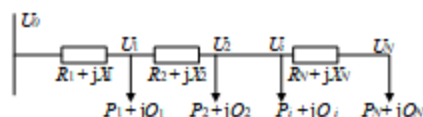


图1 辐射型配电网结构

Fig. 1 Radial distribution network structure

在配电网中,线路损耗通常比负荷的  $10^{-2}$  小,认为线路损耗远小于负荷,式(1)进一步修改为

$$\Delta U_i = \frac{1}{U_{i-1}} \left[ \sum_{j=1}^N P_j R_i + \sum_{j=1}^N Q_j X_i \right] \quad (2)$$

式中,  $P_j$ 、 $Q_j$ 、 $R_i$ 、 $X_i$  均为正数,电压降  $\Delta U_i > 0$ 。

同理可以得到电压差的虚部公式为

$$\Delta U_{\text{Im}} = \frac{1}{U_{i-1}} \left[ \sum_{j=1}^N P_j X_i - \sum_{j=1}^N Q_j R_i \right] \quad (3)$$

式中,  $\Delta U_{\text{Im}}$  为节点  $i-1$  与节点  $i$  的电压差虚部。可知  $\Delta U_{\text{Im}}$  没有明显的变化规律,不作为主要分析对象。

考虑 DG、储能接入配电网后,假设接入点分别为  $p$ 、 $k$ ,推导配电网中任一节点  $i$  电压公式为

$$U_i = U_0 - \sum_{n=1}^i \frac{1}{U_{n-1}} \left[ \sum_{j=n}^N P_j R_n + \sum_{j=n}^N Q_j X_n - P_{\text{DG},p} R_{n,p} - P_{\text{ESS},k} R_{n,k} \right] \quad (4)$$

式中,  $P_{\text{DG},p}$  为  $p$  点接入 DG 的出力,  $P_{\text{ESS},k}$  为  $k$  点接入储能的出力,  $R_{n,x}$  为电阻决策因子 ( $x=k, p$ )。进一步转化公式为

$$U_i = U_0 - [J_{R,i} \ J_{X,i}] \begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix} + J_{\text{DG}} P_{\text{DG}} + J_{\text{ESS}} P_{\text{ESS}} \quad (5)$$

式中,  $J_{R,i}$ 、 $J_{X,i}$ 、 $J_{\text{DG}}$ 、 $J_{\text{ESS}}$  分别为有功系数向量、无功系数向量、DG 系数向量、储能系数向量,  $P_L$ 、

$Q_L$  为有功无功负荷向量。上述均为  $N$  阶向量。

同理,由式(3)推导任意节点电压虚部为

$$U_{i,\text{Im}} = U_{0,\text{Im}} - [J_{X,i} \ -J_{R,i}] \begin{bmatrix} P_L \\ Q_L \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $U_{0,\text{Im}}$  为接入点电压虚部,  $U_{i,\text{Im}}$  为节点  $i$  电压虚部。由式(4)可得,随着承载负荷增大,节点电压减小,推导整个节点电压相量与负荷关系为

$$J_1 = \begin{bmatrix} J_{R,1} & \dots & J_{R,N} & J_{X,1} & \dots & J_{X,N} \\ J_{X,1} & \dots & J_{X,N} & -J_{R,1} & \dots & -J_{R,N} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$L = J_1^{-1} (U_0 - U + J_{\text{DG}} P_{\text{DG}} + J_{\text{ESS}} P_{\text{ESS}}) \quad (8)$$

式中,  $J_1$  为  $2N$  阶负荷系数方阵;  $U$  为电压向量,  $U = [U_{\text{Re}} \ U_{\text{Im}}]^T$ ;  $U_0$  为初始电压相量,  $U_0 = [U_{0,\text{Re}} \ U_{0,\text{Im}}]^T$ ;  $L$  为负荷向量,  $L = [P_L \ Q_L]^T$ ;  $J_{\text{DG}}$ 、 $J_{\text{ESS}}$  均为向量  $J_{\text{DG}}$ 、 $J_{\text{ESS}}$  的扩充,  $J_{\text{DG}} = [J_{\text{DG}} \ 0]^T$ ,  $J_{\text{ESS}} = [J_{\text{ESS}} \ 0]^T$ 。  $U$ 、 $U_0$ 、 $L$ 、 $J_{\text{DG}}$ 、 $J_{\text{ESS}}$  均为  $2N$  阶向量。

配电网节点电压已知时,所承载的负荷集合  $L$  是唯一的。假设存在某一节点电压最小值恰好为允许电压下限,对应的多种负荷解集中必定存在至少一种解,使得接纳负荷总和为该节点电压条件下的最大值。遍历所有节点后,至少存在一组负荷解集,使得总和为配电网电压约束下的承载力。

## 2 配电网承载力模型构建

本文在考虑 DG 与储能接入的基础上,以一个完整的调度周期内配电网容纳的负荷极限为目标函数,并对配电网潮流状态、DG、储能进行条件约束,构成承载力模型。

### 2.1 目标函数

以容纳负荷最大作为目标函数

$$f_1 = \max \sum_{i=1}^N S_{i,t} \quad (9)$$

式中,  $S_{i,t}$  为第  $i$  节点  $t$  时刻所接纳的负荷容量。

### 2.2 约束条件

考虑 DG、储能接入的配电网需满足如下约束:

(1) 线路潮流约束

$$\begin{cases} I_{ij,t}^2 = (P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2) / U_{ij,t}^2 \\ P_{j,t} = P_{ij,t} - R_{ij} I_{ij,t}^2 - \sum_{n=1}^m P_{jn,t} \\ Q_{j,t} = Q_{ij,t} - X_{ij} I_{ij,t}^2 - \sum_{n=1}^m Q_{jn,t} \\ U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij,t}^2 \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$  为注入点  $j$  的有功功率、无功功率,  $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$  为  $t$  时刻线路  $ij$  首端有功功率、无功功率,  $I_{ij,t}$  为支路  $ij$  在  $t$  时刻的电流,  $n$  为  $j$  节点的子节点。

(2) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_{i,t} \leq U_{\max} \quad (11)$$

式中,  $U_{\max}$ 、 $U_{\min}$  为节点电压允许上下限。

(3) 支路电流约束

$$I_{ij,t} \leq I_{\lim} \quad (12)$$

式中,  $I_{\lim}$  为线路持续通过电流的最大允许值。

(4) DG 容量约束

$$\begin{cases} S_{DG,i} \leq S_{poi\_m} \\ \sum_{i \in N_{DG}} S_{DG,i} \leq S_{sys\_m} \end{cases} \quad (13)$$

式中,  $S_{DG,i}$  为节点  $i$  接入分布式新能源容量,  $S_{poi\_m}$  为节点允许接入 DG 容量最大值,  $S_{sys\_m}$  为系统中允许接入的 DG 总容量最大值。

### 3 组合赋权改进遗传算法

#### 3.1 配电网承载力评估体系

本文从灵活性、安全性、经济性 3 方面, 构建承载力评估体系如图 2 所示, 各项指标表达式如下:



图 2 配电网承载力评估体系

Fig. 2 Assessment system for distribution network carrying capacity

(1) 负荷增长率 ( $C_{LGR}$ )

$$C_{LGR} = \frac{1}{S_{\text{ave},t}} |S_{\text{load},t} - S_{\text{ave},t}| \quad (14)$$

式中,  $S_{\text{load},t}$  为  $t$  时刻配电网所接纳负荷总量,  $S_{\text{ave},t}$  为配电网计算前接纳负荷总量。

(2) 净负荷波动率 ( $C_{FRL}$ )

$$C_{FRL} = \frac{1}{S'_{\text{load},t}} |S'_{\text{load},t} - S'_{\text{load},t-1}| \times 100\% \quad (15)$$

式中,  $S'_{\text{load},t}$  为  $t$  时刻配电网净负荷。

(3) 电压偏差率 ( $C_{VEI}$ )

$$C_{VEI} = \sum_{i \in N} \frac{1}{U^2} (U_{i,t} - U_{i,\text{rated}})^2 \times 100\% \quad (16)$$

式中,  $U_{i,\text{rated}}$  为节点电压额定值。

(4) 电压合格率 ( $C_{VQR}$ )

$$C_{VQR} = \left(1 - \frac{N_{\text{fail}}}{N}\right) \times 100\% \quad (17)$$

式中,  $N_{\text{fail}}$  为电压越限的节点数。

(5) 投资回报率 ( $C_{ROI}$ )

$$\begin{cases} C_{\text{In}} = \mu_{\text{csc}} \sum_{j \in N_{\text{ESS}}} E_{\text{ESS},j} + \mu_{\text{esc}} \sum_{j \in N_{\text{ESS}}} P_{\text{E-rated},j} + \mu_{\text{c}} N_{\text{ESS}} \\ C_{\text{Re}} = \sum_{t \in T} \mu_{\text{toll},t} P_{\text{ESS},t} \\ C_{\text{ROI}} = C_{\text{In}} / (\mu_{\text{year}} C_{\text{Re}}) \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $C_{\text{In}}$  为储能投资函数,  $C_{\text{Re}}$  为储能收益函数,  $P_{\text{E-rated},j}$  为储能额定功率,  $\mu_{\text{csc}}$  为单位储能容量投资,  $\mu_{\text{esc}}$  为单位储能功率投资,  $\mu_{\text{c}}$  为基础建设投资,  $\mu_{\text{toll},t}$  为  $t$  时间段收取电费,  $\mu_{\text{year}}$  为时间长度系数。

(6) 平均线损率 ( $C_{ALR}$ )

$$C_{\text{ALR}} = \frac{P_{\text{loss},t}}{l} \times 100\% \quad (19)$$

式中,  $P_{\text{loss},t}$  为配电网总的损耗,  $l$  为配电网支路数。

#### 3.2 组合赋权法

本文采用主观层次分析法和客观熵权法结合对 6 项指标进行赋权。

##### 3.2.1 层次分析法

层次分析法通过将待评测目标按照具体评价方案分为不同层次进而确定主观权重。对于同层次下的指标需按照表 1 所示标度系统表建立判断矩阵。

表 1 标度系统表

| Table 1 Scaling system |         |
|------------------------|---------|
| 指标 a 相较于指标 b 的标度       |         |
| 指标 a 相比 b 同等重要         | 1       |
| 指标 a 相比 b 稍微重要         | 3       |
| 指标 a 相比 b 明显重要         | 5       |
| 指标 a 相比 b 强烈重要         | 7       |
| 指标 a 相比 b 极端重要         | 9       |
| 指标 a 相比 b 介于上述中间       | 2/4/6/8 |
| 指标 b 相比 a 重要程度         | 标度的倒数   |

根据判断矩阵求取最大特征值  $\lambda_{\max}$  及特征相量  $D$ 。最后进行一致性校验, 过程为

$$\begin{cases} c_{\text{CI}} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \\ c_{\text{CR}} = c_{\text{CI}} / c_{\text{RI}} \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $n$  为判断矩阵阶数,  $c_{\text{CI}}$ 、 $c_{\text{RI}}$ 、 $c_{\text{CR}}$  为一致性指标、随机一致性指标及一致性偏差。当  $c_{\text{CR}} < 0.1$  时通过校验, 特征相量  $D$  归一化得到主观权重。

##### 3.2.2 熵权法

熵权法依靠数据本身信息熵赋权, 其过程如下:

$$E_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (21)$$

$$\beta_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j) \quad (22)$$

$$w_j = \sqrt{\alpha_j \beta_j} / \sum_{j=1}^n \sqrt{\alpha_j \beta_j} \quad (23)$$



式中,  $E_j$  为第  $j$  类指标信息熵,  $P_{ij}$  为第  $i$  个  $j$  类指标信息熵,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $w_i$  为主客观以及组合权重。

### 3.3 Pareto 最优遗传算法

基于组合赋权改进 Pareto 最优遗传算法。首先以初始化负荷、DG 和储能数据作为种群的个体基因, 带入配电网潮流计算, 判断是否在约束条件内, 满足的个体参与种群和档案集个体竞争, 留下的个体最终参与遗传过程, 直到最大代数时, 输出 Pareto 解集, 利用组合赋权法对各项指标加权求和, 取综合评分最高作为承载力最优解。

## 4 算例

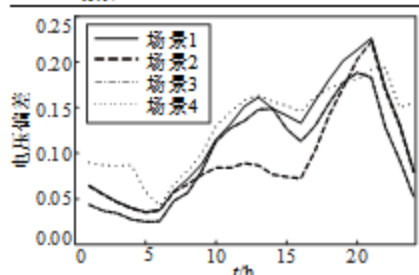
本文以 IEEE 33 节点配电系统为算例, 利用改进遗传算法计算承载力验证分析, 设计如表 2 所示的 8 个场景: 原始 IEEE 33 节点配电网, 接入光伏, 接入风机, 接入储能, 接入风机、光伏, 接入光伏、储能, 接入风机、储能, 接入风机、光伏及储能。本文分场景 1~4 和 5~8 讨论。

(1) 首先, 对比场景 1~4: 相比场景 1, 场景 2 承载力相差不大, 场景 3 和 4 都有较大提升, 其相关指标曲线如图 4 所示。

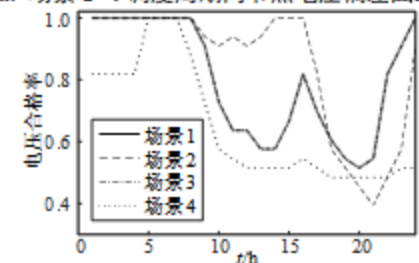
表 2 各个场景配电网承载力

Table 2 Distribution network carrying capacity in various situations

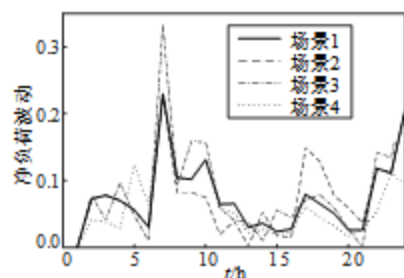
| 场景   | 承载力/MW |
|------|--------|
| 场景 1 | 5.2492 |
| 场景 2 | 5.2734 |
| 场景 3 | 5.7850 |
| 场景 4 | 5.4442 |
| 场景 5 | 5.7718 |
| 场景 6 | 5.7563 |
| 场景 7 | 5.8820 |
| 场景 8 | 5.7989 |



a. 场景 1~4 调度周期内节点电压偏差曲线



b. 场景 1~4 调度周期内电压合格率曲线



c. 场景 1~4 调度周期内净负荷波动曲线

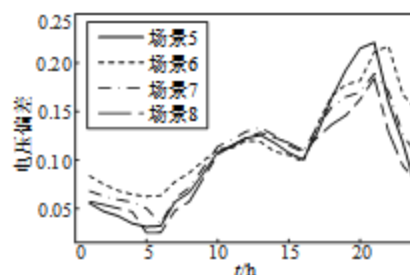
图 3 场景 1 至 4 各项指标时序曲线

Fig. 3 Curves of various indicators in scenarios 1 to 4

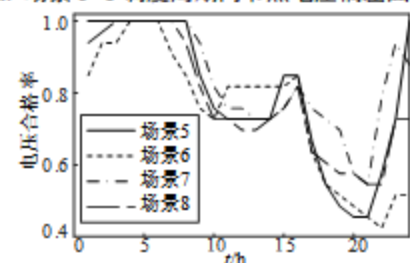
分析图 4 曲线可得出结论:

- 1) 承载力取决于系统净负荷最大的时刻;
- 2) 承载力提升和电压偏差下降受负荷与 DG 曲线特性的影响, 曲线越契合, 效果越好;
- 3) 储能能够提升配电网承载力, 平抑净负荷波动, 但是对配电网整体电压质量优化作用小。

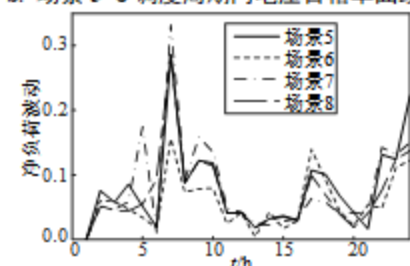
(2) 接着, 对比场景 5~8: 相比场景 1, 场景 6 承载力提升效果最差, 场景 7 提升效果最好, 剩余场景提升相差不大, 相关指标曲线如图 5 所示。



a. 场景 5~8 调度周期内节点电压偏差曲线



b. 场景 5~8 调度周期内电压合格率曲线



c. 场景 5~8 调度周期内净负荷波动曲线

图 4 场景 5 至 8 各项指标时序曲线

Fig. 4 Curves of various indicators in scenarios 5 to 8

由图 5 曲线分析可得出结论:

- 1) DG 与储能结合能够进一步提升承载力;
- 2) 储能的承载力提升作用受到净负荷特性曲

线的影响,曲线越平滑,提升作用越小。

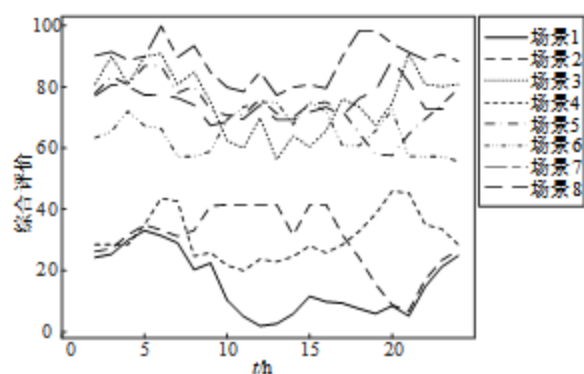


图5 不同场景综合评分曲线

Fig. 5 Comprehensive rating curves for different scenarios

利用组合赋权法对上述8个场景综合评分见图5。场景7整体评分最好,证明了上述分析所得结论的正确性。

进一步地,以场景8为例,对经过评估的 Pareto 解集由高至低进行排序,取前100个体对应6项指标如图6所示。

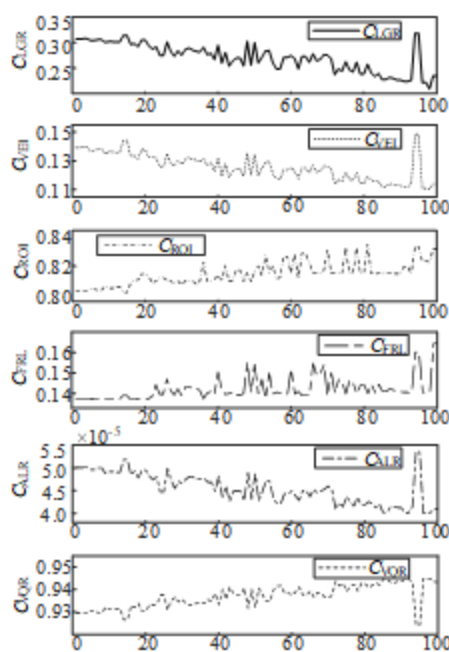


图6 Pareto 解集6项指标曲线

Fig. 6 6 index curves of Pareto solution set

根据图6可知,随着负荷增加,系统电压、电流、网损质量不可避免会变差,电压偏差、电压合格率和平均线损率在评估中起约束的作用;而投资回报率、净负荷波动的趋势与负荷增长相似在评估过程中起到促进作用。

## 5 结论

本文提出的一种利用组合赋权改进 Pareto 最优遗传算法求解 DG、储能接入的配电网承载力方法,

主要得出以下结论:

- 1) 从理论上推导考虑配电网负荷与电压、电流关系,证明求解配电网承载力的可行性;
- 2) 创建了负荷增长率和投资回报率指标,与其余合适指标共同构成配电网承载力评估体系;
- 3) 提出组合赋权改进的 Pareto 最优遗传算法并应用到算例中,考虑多层次下最优场景承载力为 5.882MW,同比原始场景承载力提升了 12.05%,证明接入 DG、储能对配电网承载力的提升作用和提出算法科学性、合理性。

## 参考文献

- [1] 王强强,姚良忠,盛万兴,等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载力提升方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 132-141.
- [2] Ghezalbash G, Babaelahi M, Saadatfar M. New analytical solution and optimization of a thermocline solar energy storage using differential quadrature method and genetic programming[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52.
- [3] 孙玲玲,赵美超,王宁,等. 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1560-1569.
- [4] 李宏伟,汪理,胡智晨,等. 双碳背景下配电网对多元接入体的承载力评估[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3595-3603.
- [5] Camargos R S, Shayani R A, De Oliveira M A, et al. Evaluation whether photovoltaic distributed generation postpones or anticipates reinforcements detected by distribution network expansion planning[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019, 13(7): 1036-1048.
- [6] Aldousab I, Daniels M, Ordóñez R. MPC for optimized energy exchange between two renewable-energy prosumers[J]. APPLIED SCIENCES-BASEL, 2019, 9(18): 3709-3709.
- [7] 郝文斌,孟志高,张勇,等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
- [8] 屈高强,王诚良,靳盘龙,等. 新型负荷及分布式电源接入配网承载力综合评估[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 37-45, 113.
- [9] Behzadi A, Alirahmi S M, Yu H S, et al. An efficient renewable hybridization based on hydrogen storage for peak demand reduction: A rule-based energy control and optimization using machine learning techniques[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57.
- [10] Capitanescu F, Ochoa L F, Margossian H, et al. Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 346-356.
- [11] 张铭泽,华晨辉,李铁立,等. 考虑电能替代负荷的配电网承载力评估方法[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(5): 1-8.



张龙涛

收稿日期:

作者简介:

张龙涛(2000-),男,硕士研究生,研究方向为配电网承载力, E-mail: 1773219702@qq.com

王德林(1970-),男,教授,博士生导师,研究方向为新能源并网发电和系统稳定与控制研究等,

E-mail: wdl@swjtu.edu.cn.

# 基于动态社区划分的广义负荷两阶段调控策略

常培鑫, 魏占宏

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃兰州 730050)

## Generalized load control strategy based on dynamic community

CHANG Peixin, WEI Zhanhong

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050 China)

**ABSTRACT:** In order to improve the controllability of generalized load in different time periods and operation scenarios, a two-stage control strategy for generalized load based on dynamic community partition is proposed in this paper. Firstly, a comprehensive partition index is designed to dynamically divide the generalized load in the distribution network and form multiple production and consumption user (PCU) communities. Then, a two-stage control model of generalized load was proposed. In the first stage, an optimization model was established for each community with the goal of minimizing the flat cost of electric energy storage and the minimum mean square deviation of net electricity load, so as to improve the local consumption rate of new energy in the community and the ability to stabilize the fluctuation of net electricity load in real time. In the second stage, based on the cooperative game and the Carbon Emission Trading-Green Certificate Trading (CET-GCT) mechanism, the model is established with the goal of maximizing the overall benefit of generalized load and minimizing the operating cost of each community, and the reasonable distribution of comprehensive income is realized through the power interaction contribution. Finally, simulation analysis shows that the proposed model and strategy can effectively improve the utilization rate of new energy in the generalized load, and ensure the economy and income balance of the generalized load control.

**KEY WORDS:** Generalized load; Community partition; Load control; Cooperative game; Complex network theory.

**摘要:** 为提高广义负荷在不同时段及运行场景的可控性及可调度性, 本文提出了基于动态社区划分的广义负荷两阶段调控策略。首先, 设计综合划分指标对配电网中的广义负荷进行动态划分, 形成多个产消者社区。然后, 提出一种广义负

荷两阶段调控模式。第一阶段, 针对每个社区, 以电储能平抑成本最小和净电负荷均方差最小为目标建立优化模型, 提高社区内新能源就地消纳率和实时平抑净电负荷波动的能力。第二阶段, 各社区之间基于合作博弈和 CET-GCT 机制, 以广义负荷总体收益最大和各社区的运行成本最小为目标建立模型, 并通过功率交互贡献度实现综合收益的合理分配。最后, 仿真分析表明所提模型和策略有效提高了广义负荷中新能源的利用率, 保证了广义负荷调控的经济性和收益平衡。

**关键词:** 广义负荷; 社区划分; 负荷调控; 合作博弈; 复杂网络理论

## 0 引言

近年来, 用户侧新型市场主体受到了广泛重视, 新型电力系统的负荷类型正向广义负荷转变<sup>[1-2]</sup>。广义负荷涵盖了可调节用电负荷、不可调节用电负荷、分布式电源、分布式储能等多种资源。在传统负荷特性的基础上, 广义负荷净功率具有与分布式新能源发电功率相似的不确定性和波动性。此外, 广义负荷的用电需求具有多样性, 可以在电力现货市场中竞价购电满足, 或者通过内部分布式电源供电满足, 或者利用激励型需求响应 (Incentive-Based Demand Response, IBDR) 等资源自主调整满足。但从本质上讲, 广义负荷中可再生能源发电与本地电能需求一般具有不同时空特征, 本地供需不匹配性导致实现高效能源系统需要大容量能源设备, 难以兼具经济性和本地能效。如何充分实现广义负荷中可再生能源的经济性就地消纳和引导可调资源灵活参与电网供需互动都是亟需研究的问题<sup>[3-5]</sup>。

由于高比例分布式电源及负荷出力的时间分布特性各异, 使得广义负荷在不同时段具有不同的功率调节需求。因此, 需要将配电网中的广义负荷按照时空特性进行聚类分区, 从社区个体和广义负荷整体两个方面分别进行调控。目前分区方法有基于网络拓扑和地理位置

分区、基于高级测量体系分区和基于多代理系统分区<sup>[6-7]</sup>。社区划分方法也已广泛应用于电力系统多种运行控制的场景中。文献[8]对电网进行分区,采用规划的手段保证各分区内部电源可以满足正常与紧急情况下的电力需求。文献[9-10]基于配电网区域划分结果,解决了高比例光伏接入的配电网电压协调控制问题。由此可见,现有文献多针对电网典型运行场景或采用典型时刻数据,采用固定的分区方法对配电网进行分区。但广义负荷运行状态复杂多变,固定的分区方法难以适应新能源及负荷功率波动所形成的多种运行场景。因此,需要针对配电网的网络拓扑,设计一种动态划分方法,将配电网中的广义负荷划分为多个社区,从而提高广义负荷的灵活调节能力。

对于配电网中负荷调控策略,相关文献已有较多研究,但对于广义负荷的调控方法研究较少。文献[11-12]建立了主从博弈的能源交易模型,其中由能源卖方或买方作为领导者设定卖价或买价,其他作为跟随者实现负荷灵活调控计划。但是当考虑到很多产消者参与时,这样的模式将会增加博弈设计和交互的复杂性。文献[13]构建了空调负荷和柔性负荷的日内响应模型用来应对源-荷不确定性,通过保守配置储能,降低系统综合成本。上述文献都未针对广义负荷特性进行研究,且在新能源消纳和节能减排方面表现不足。

在已有研究基础上,本文提出了基于动态社区划分的广义负荷两阶段调控策略。在分析广义负荷的组成及其分类基础上,构建了含广义负荷的配电网网络拓扑,设计综合划分指标和拓扑结构变化触发机制,实现配电网拓扑图的动态划分。动态划分后形成多个产消者社区(production and consumption users, PCU),社区内利用储能的充放电策略实现净电负荷平抑和新能源就地消纳。社区间基于合作博弈,并引入绿色电力证书-碳排放权(Carbon Emission Trading-Green Certificate Trading, CET-GCT)机制,进一步提升能源利用率,增加广义负荷整体的经济效益。最后,利用改进的 shapley 值法对各社区利润进行合理分配。

## 2 配电网广义负荷动态划分

动态社区划分的目的是为了充分利用广义负荷中多类型资源的调节潜力,提高广义负荷时序运行场景下各社区的自治能力。因此,本节通过构建网络拓扑将广义负荷划分为非重叠社区结构,实现产消者社区的最优划分。

社区划分指标体系主要由广义负荷的划分目标和原则决定。本文以平抑净负荷波动为目标,在兼顾社区功能性的基础上,提出综合指标体系,包含考虑配电网网架结构的模块度指标,考虑应对净负荷波动的功率持续性调节能力指标,并辅以电压

调节能力指标,从而最大化广义负荷的社区自治能力。结合上述网络社区划分指标,并考虑社区内源-荷-储的调节能力,充分发挥社区自治特性,本文提出的广义负荷综合分区指标体系表达式如式(1)所示。

$$\phi = \gamma_1 \rho + \gamma_2 \phi_V + \gamma_3 \phi_P \quad (1)$$

本文采用遗传算法求解最优综合指标,遗传算法的全局搜索能力可以确保随着迭代次数的增加而逐渐靠近全局最优解。在应用于动态社区划分中时,以广义负荷综合分区指标为适应度函数进行寻优,遗传算法的解即为社区划分结果。

为了不改变配电网的网架结构,本文基于网络的邻接矩阵,对染色体进行编码。网络的邻接矩阵表示网络中节点的连接情况,其仅包含 0,1 元素,0 表示节点之间无连接,1 表示节点相连。如图 1 左半部分所示。

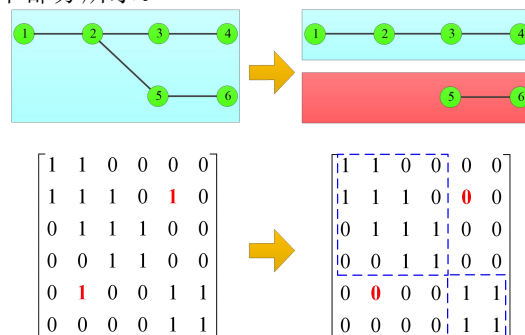


图 1 染色体编码方式

Fig.1 Chromosome coding approach

对初始邻接矩阵进行交叉和变异等遗传操作后,节点间的连接关系改变,部分 1 元素变成 0 元素,变换后的邻接矩阵可以看成多个分块矩阵的组合。保留变换后分块矩阵中的非 0 方阵,其行或列编号对应广义负荷节点编号,同一分块矩阵中的节点归为同一社区,如图 1 右半部分所示。

同时,本文通过设置综合指标权重差值阈值,触发广义负荷分区结构动态更新。通过对比当前时刻最优分区结构  $\Phi_t$  下的指标值  $\phi_t(t)$  与沿用上一时刻分区结构  $\Phi_{t-1}$  下的指标值  $\phi_{t-1}(t)$  之间的差值,仅当差值超出阈值时触发分区结构改变,实现最优分区和通讯需求之间的平衡。如式(2)所示。

$$\Phi_t = \begin{cases} \Phi_{t-1}, & \phi_t(t) - \phi_{t-1}(t) < \sigma \\ \Phi_t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

## 3 广义负荷两阶段调控策略

### 3.1 产消者社区内部优化模型

基于电储能调节构建电储能平抑成本最小和净电负荷均方差最小的多目标优化模型。

1) 净电负荷均方差 Kr 最小

$$\begin{cases} K_r = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{r,t}^e - P_{r,t}^{NE} - P_r^{ave} + U_{ESS,in}^{r,t} P_{ESS,in}^{r,t} - U_{ESS,out}^{r,t} P_{ESS,out}^{r,t}) \\ P_r^{ave} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{r,t}^e - P_{r,t}^{NE} + U_{ESS,in}^{r,t} P_{ESS,in}^{r,t} - U_{ESS,out}^{r,t} P_{ESS,out}^{r,t}) \end{cases} \quad (3)$$



式中:  $P_{r,t}^e$ 、 $P_{r,t}^{NE}$  分别为时段  $t$  内社区的电负荷和新能源电能;  $T$  为总调度时段;  $P_r^{ave}$  为社区在一个调度周期内的等效电负荷平均值;  $U_{ESS,in}^{r,t}$ 、 $U_{ESS,out}^{r,t}$  分别为时段  $t$  内社区的电储能充、放电状态,  $U_{ESS,in}^{r,t}$  取 1 表示充电状态, 取 0 表示未充电状态,  $U_{ESS,out}^{r,t}$  取 1 表示放电状态, 取 0 表示未放电状态, 且  $U_{ESS,in}^{r,t} U_{ESS,out}^{r,t} = 0$ , 即电储能系统不能同时充、放电;  $P_{ESS,in}^{r,t}$ 、 $P_{ESS,out}^{r,t}$ , 分别为时段  $t$  内社区的电储能充、放电功率。

2) 电储能平抑成本  $f_{r1}$  最小:

$$f_{r1} = \alpha_r \sum_{t=1}^T |P_{ESS,in}^{r,t}| + \beta_r \sum_{t=1}^T |P_{ESS,out}^{r,t}| \quad (4)$$

式中:  $\alpha_r$ 、 $\beta_r$  分别为社区的电储能单位充、放电的成本系数。

平抑净电负荷波动的约束条件主要考虑电储能单元运行约束条件:

$$\begin{cases} E_{ESS}^{r,t} = E_{ESS}^{r,t-1} + \eta_{ESS,C}^{r,t} P_{ESS,in}^{r,t} - P_{ESS,out}^{r,t} / \eta_{ESS,D}^{r,t} \\ 0 \leq P_{ESS,in}^{r,t} \leq U_{ESS,in}^{r,t} P_{ESS,in}^{r,max} \\ 0 \leq P_{ESS,out}^{r,t} \leq U_{ESS,out}^{r,t} P_{ESS,out}^{r,max} \\ E_{ESS}^{r,min} \leq E_{ESS}^{r,t} \leq E_{ESS}^{r,max} \\ E_{ESS}^{r,0} = E_{ESS}^{r,t} \\ U_{ESS,in}^{r,t} + U_{ESS,out}^{r,t} \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $E_{ESS}^{r,t}$  为  $t$  时段电储能的电量;  $\eta_{ESS,C}^{r,t}$  和  $\eta_{ESS,D}^{r,t}$  分别为电储能的充、放电效率;  $P_{ESS,in}^{r,max}$  和  $P_{ESS,out}^{r,max}$  分别为电储能的充、放电功率;  $E_{ESS}^{r,max}$  和  $E_{ESS}^{r,min}$  分别为电储能的容量上、下限。

### 3.2 社区间基于合作博弈的电能交易机制

多个产消者社区构成广义负荷。广义负荷利益诉求表现为多产消者社区的综合收益最大化, 多社区的运维成本以及各社区向电网购电的成本最小化, 目标函数如下:

$$\max C = C_{pro} - C_{cost} - C_{grid} \quad (6)$$

式中:  $C$  表示广义负荷总收益;  $C_{pro}$  表示多社区收益;  $C_{cost}$  表示多社区运维成本;  $C_{grid}$  表示各社区向电网购电成本。

产消者社区调度模型表示为:

$$C_{pro} = \sum_{t=1}^T \sum_{i,j=1}^N (P_{i,t}^{load} c_{i,t}^{load} + P_{i,j,t}^{sell} c_{i,j,t}^{yq} + C_i^{CET} + C_i^{GCT}) \quad (7)$$

$$C_{cost} = \sum_{t=1}^T \sum_{i,j=1}^N (P_{i,t}^{grid} c_{i,t}^{grid} + P_{i,j,t}^{buy} c_{i,j,t}^{yq} + P_{i,t}^B c_{i,t}^B) \quad (8)$$

$$C_{grid} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{grid} c_{i,t}^{grid}) \quad (9)$$

式中:  $N$  表示社区个数;  $P_{i,t}^{load}$ 、 $c_{i,t}^{load}$  表示  $t$  时刻社区  $i$  不同类型的负荷需求以及对应能源的售能

价格;  $P_{i,t}^{grid}$ 、 $c_{i,t}^{grid}$  表示  $t$  时刻社区  $i$  购电以及对应的购电价格;  $P_{i,j,t}^{buy}$ 、 $P_{i,j,t}^{sell}$ 、 $c_{i,j,t}^{yq}$  表示  $t$  时刻社区  $i$  向社区  $j$  购、售电和电价;  $P_{i,t}^B$ 、 $c_{i,t}^B$  表示  $t$  时刻社区  $i$  的机组  $B$  的出力以及单位功率维护成本。

## 4 仿真分析

本文采用改进的 IEEE33 节点结合中国西部某配电网数据进行算例验证, 如图 2 所示。该系统的电压基准值为 12.66kV, 基准功率为 1MW。设置四组分布式光伏, 三组分布式风电, 四组电储能设备和一台微型燃气轮机, 其位置已在图 6 中标出; 包含装机容量为 800kW 和 1000kW 的分布式光伏 (photovoltaic, PV) 和分布式风电 (wind turbine, WT), 容量 400kW 的储能蓄电池以及容量 100kW 的微型燃气轮机。电网负荷水平 2.6MW。

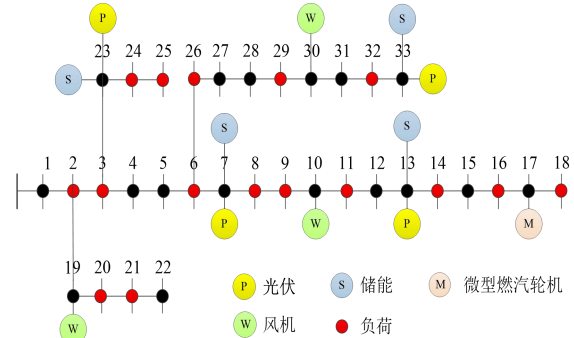


图 2 改进的 IEEE33 节点系统示意图

Fig. 2 Improved IEEE33 node system diagram

### 4.1 广义负荷调控结果分析

模型采用软件 MATLAB2021b 的 CPLEX 求解器求解。产消者社区间的购售电价相同, 低于电网电价。电网向社区送电上限 800kW/h, 社区以及风力发电机组向外界送电上限 600kW/h, 储能电站与外界功率传输上限 400kW/h。

根据时刻 1 的广义负荷划分结果, 通过分析产消者社区在不同模式下运行的优化结果来验证所提策略有效性。运行模式如下: 模式 1: 各社区采用独立运行方式, 不存在功率交互。模式 2: 各社区采用合作博弈进行功率交互的联合运行方式。模式 3: 为探究联合后社区碳排放及风光消纳情况, 加入 CET-GCT 策略。3 种模式下各社区的运维成本、收益、各产消者社区利润及广义负荷总收益优化结果如表 1 所示。

表 1 不同模式下广义负荷收益优化结果

Table 3 General load revenue optimization results in different modes

| 模式 | 社区 1<br>运维<br>成本/元 | 社区 2<br>运维成<br>本/元 | 社区 3<br>运维<br>成本/元 | 社区<br>1 收<br>益/元 | 社区 2<br>收益<br>/元 | 社区<br>3 收<br>益/元 | 总成本<br>/元 | 购电<br>成本<br>/元 | 储能<br>利润<br>/元 | 风电<br>利润<br>/元 | 总收<br>益/元 |
|----|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|-----------|
| 1  | 1592               | 103544             | 78553              | 5466             | 19745            | 17600            | 140878    | 22187          | 204            | 11271          | 54286     |
| 2  | 1659               | 103981             | 69890              | 6731             | 23378            | 16771            | 128650    | 22354          | 1316           | 11209          | 59405     |
| 3  | 1500               | 103819             | 70028              | 6838             | 24890            | 16807            | 126812    | 22807          | 980            | 11323          | 60838     |

社区 1 的电功率优化如图 3 所示。相比于模式 1, 模式 2 的广义负荷总成本减少 12228 元。社区 1 光伏充足, 独立运行时多余的光伏出力未充分利用, 只能出售给储能电站, 社区和储能电站利润较低。联合运行时, 社区 1 结合储能电站灵活调节作用给缺电较多的社区 3 供电, 剩余电能补充给社区 2, 保证其他社区电能供给的同时, 提高光伏出力, 利润增加 1265 元。高峰时段, 社区 2、3 通过向电价较低的社区 1 购电, 使得社区成本减少。联合运行下, 广义负荷收益提升 5119 元。可以看出, 将广义负荷分区并进行功率交互, 有助于能源的充分使用, 提升整体与个体的经济效益。

以模式 2 方式运行时, 由于 0~7 时电价较低, 用户向电网购电, 购电成本增加, 风电出力较低, 未消纳的风电输送给储能电站和电网。模式 3 引入 GCT 机制后, 社区为完成消纳指标, 风电出力增多。结合 CET 机制, 优化新能源出力, 降低碳排放, 从而获得一定补贴, 减少系统成本。由于风光及社区间电能互补, 电能充盈, 社区与储能电站能量交互较少, 储能电站利润减少。对比模式 1 和模式 2, 广义负荷收益提升 1433 元。可以看出, CET-GCT 能够在功率交互模式基础上, 进一步提升整体与个体的经济效益。

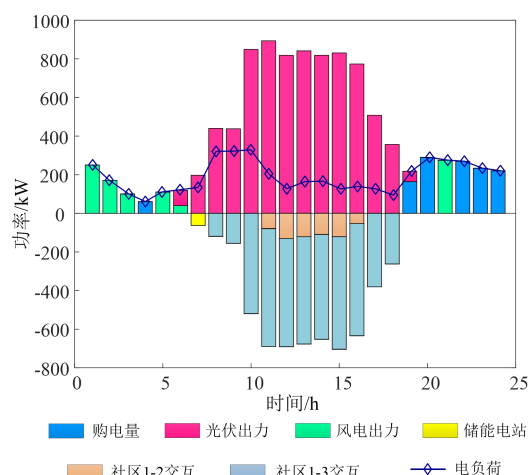
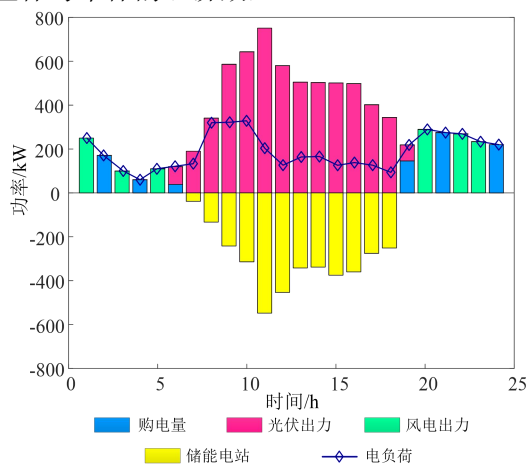


图 3 2 种模式下社区 1 的电功率优化

Fig.3 Electrical power optimization of community 1 under 2 modes

#### 4. 2 基于功率交互贡献度的合作博弈收益分析

根据合作博弈理论, 在模式 3 的基础上, 分别采用 Shapley 值和改进 Shapley 值的分配方式分摊并均衡各社区的成本和收益, 运行结果与模式 3 对比, 如图 4 所示。

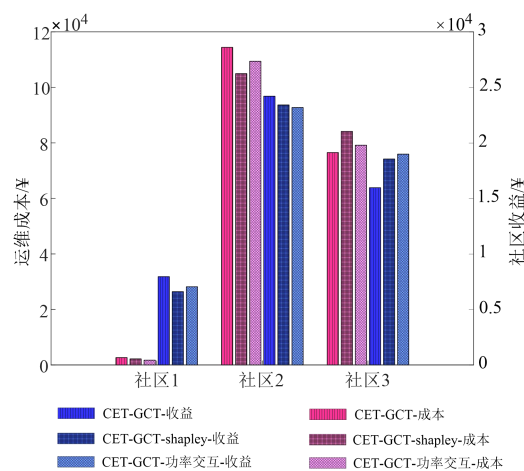


图 4 不同分配策略下的各社区成本和收益对比

Fig.11 Cost and benefit comparison among each community under different distribution strategies

社区 1 作为余电型社区, 给社区 2、3 供电, 获得电能收益。考虑到社区 1、2 收益过多影响社区 3 参与联合调度的积极性, 在 CET-GCT 机制的



基础上采用 Shapley 值分配整体收益后,使得社区 1、2 的成本和收益减少,社区 3 的成本和收益增加。而改进 Shapley 值从社区间实时功率传输角度进行收益分配,得到社区 1~3 功率交互占比为 0.5、0.041、0.459。社区 3 作为缺电型社区,社区 1 向社区 3 传输功率较多,使得社区 1、3 的成本减少,收益增加。综上所述,CET-GCT 机制有利于产生碳排放以及新能源消纳较多的社区,通过配额制获得更多收益。Shapley 值分配策略有利于均衡各社区收益,提高各社区参与联合调度的积极性。基于功率交互贡献度分配策略有利于社区间功率交互较多的社区,使其获得更多收益。

## 5 结论

为提高含高比例分布式电源等可控资源的广义负荷在不同时段及运行场景的可控性及可调度性,本文提出了基于动态社区划分的广义负荷两阶段调控策略。通过仿真验证所述模型和策略的有效性,得到如下结论:

1)将广义负荷划分为多个产消者社区,可以提高净电负荷持续平抑能力,促进社区内新能源就地消纳。相较于不分区或者固定分区的情况,动态分区对社区内负荷波动平抑效果更加显著。

2)将多产消者社区联合运行作为广义负荷调控策略,有助于优化各社区机组出力,保证资源的合理分配,提升各社区与广义负荷整体的经济效益。

## 参考文献

- [1] Li J H, Lei Y S, Huang Q. Feature analysis of generalized load patterns considering active load response to real-time pricing[J]. IEEE Access, 2019, (7): 119443-119453
- [2] RABUZIN T, ERIKSSON R, NORDSTRÖM L. Model structure selection and validation for dynamic equivalencing of distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(2): 1347-1356.
- [3] Y. Zou, Y. Xu, X. Feng, et al. Transactive Energy Systems in Active Distribution Networks: A Comprehensive Review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(5): 1302-1317.
- [4] K. H. Mohd Azmi, N. A. Mohamed Radzi, N. A. Azhar, et al. Active Electric Distribution Network: Applications, Challenges, and Opportunities[J]. IEEE Access, 2022, 10: 134655-134689.
- [5] Lai S, Qiu J, Tao Y. Credit-Based Pricing and Planning Strategies for Hydrogen and Electricity Energy Storage Sharing[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(1): 67-80.
- [6] Su X, Xue S, Liu F, et al. A comprehensive survey on community detection with deep learning[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2022.
- [7] Li W, Zhou X, Yang C, et al. Multi-objective optimization algorithm based on characteristics fusion of dynamic social networks for community discovery [J]. Information Fusion, 2022, 79: 110-123.
- [8] OSKOEI M Z, MOHAMMADI-IVATLOO B, ERDINÇ O, et al. Optimal allocation of renewable sources and energy storage systems in partitioned power networks to create supply-sufficient areas[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 999-1008.
- [9] Zhang R, Liu H, Yang M, et al. Network partitioning and hierarchical voltage regulation for distribution networks using holomorphic embedding method-based sensitivity[J]. IET Generation, transmission & Distribution, 2022, 603-620.
- [10] X. Sun, J. Qiu, J. Zhao. Real-Time Volt/Var Control in Active Distribution Networks with Data-Driven Partition Method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2448-2461.
- [11] 帅轩越, 马志程, 王秀丽, 等. 基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 679-690.
- [12] LIU N, HE L, YU X H, et al. Multiparty energy management for grid-connected microgrids with heat- and electricity-coupled demand response[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2018, 14(5): 1887-1897.
- [13] 张宏业, 吴杰康, 蔡锦健, 等. 考虑空调负荷和柔性热负荷响应的综合能源系统储能鲁棒优化配置[J]. 电网技术, 2022, 46(07): 2733-2744.

作者照片



常培鑫

收稿日期: 2024-07-20。

作者简介:

常培鑫(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为负荷预测及调控, E-mail: 3057342712@qq.com;

魏占宏, 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与优化运行, E-mail: eezhw@lut.edu.cn

文章编号: 1000-3673 (2024) 01-0001-07

中图分类号: TM 72

文献标志码: A

学科代码: 470 4054

# 双碳目标下电机前沿技术课程思政教学实践

李俊卿

(华北电力大学电力工程系, 071003, 河北保定)

## Teaching practice of electric machines advanced technology course based on dual carbon target ideological and political ideas

Li Junqing

(Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, 071003, Hebei, Baoding)

**ABSTRACT:** In this paper, the dual carbon goal and ideological and political education concept are integrated with the course teaching, and the course teaching goal, teaching content, teaching method and evaluation system of advanced electric machines technology are expounded in detail. The dual carbon goal and ideological and political elements are integrated into each stage of the teaching of advanced machines technology courses, and the dual carbon and ideological and political elements in professional knowledge are deeply excavated. Through teaching activities, students' dual carbon awareness, professional accomplishment, innovation ability, comprehensive ability and ideological and political level are improved. It has realized the goal of cultivating people and talents by shaping value, imparting knowledge and cultivating ability.

**KEY WORDS:** electric machines advanced technology; carbon peaking and carbon neutrality goals; ideological and political; teaching practice

**摘要:** 本文将双碳目标和思想政治教育理念与课程教学融为一体,详细阐述了电机前沿技术课程的教学目标、教学内容、教学方法和评价体系。将双碳目标和思政元素融合于电机前沿技术课程教学的各个阶段,深入挖掘专业知识中的双碳和思政元素,通过教学活动提高了学生的双碳意识、专业素养、创新能力、综合能力和思想政治水平。实现了价值塑造、知识传授和能力培养的育人和育才目标。

**关键词:** 电机前沿技术、双碳目标、课程思政、教学实践

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01.

## 0 引言

2023年,我国碳达峰碳中和“1+N”政策体系构建完成并持续落地。“1”是指中共中央、国务院印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》<sup>[1]</sup>和国务院出台的《2030年前碳达峰行动方案》<sup>[2]</sup>;“N”则包括能源、工业、

交通运输等分领域分行业碳达峰实施方案,以及科技支撑、能源保障、碳汇能力等保障方案。实现碳达峰、碳中和是中国的重大战略决策,旨在解决资源环境约束问题,实现可持续发展,并作为构建人类命运共同体的承诺<sup>[3]</sup>。电机种类众多,广泛应用于能源、工业、交通运输、国防科技、医疗卫生、日常生活等各个领域,是实现碳达峰碳中和双碳目标中不可或缺的设备之一。如何将双碳目标融入电机前沿技术课程教学中,是值得研究的一个课题。

电机前沿技术课程是面向电气工程专业研究生的一门技术专题课,在课程教学过程中助力将学生培养成为德智体美劳全面发展的高级人才,将思想政治教育的内容和方法融入教学过程中,使学生在增长专业知识和技能的同时,达到立德树人的教育目标。2020年教育部在《高等学校课程思政建设指导纲要》中指出:“把思想政治教育贯穿人才培养体系,全面推进高校课程思政建设,发挥好每门课程的育人作用,提高高校人才培养质量。”“落实立德树人根本任务,必须将价值塑造、知识传授和能力培养三者融为一体、不可割裂。”<sup>[4]</sup>考虑到研究生群体年龄较大,绝大多数学生的世界观、人生观和价值观已经基本形成,其读研的目的更加多样化,对于思想政治教育的积极性和主动性相对缺乏<sup>[5]</sup>,那么如何在培养研究生的过程中,既提高了研究生的专业知识储备和创新创造能力,又使其逐步树立起共产主义远大理想和中国特色社会主义共同理想,形成其社会主义核心价值观?融入课程思政的高质量的课程教学,是增强研究生的中国特色社会主义道路自信、理论自信、制度自信、文化自信,立志肩负起民族复兴的时代重任<sup>[6]</sup>,实现研究生价值塑造、知识传授和能力培养三位一体培养目标的一个重要途径。

本文在电机前沿技术课程的教学过程中,将双碳目标、教学内容和思想政治教育理念融为一体,贯穿于课程教学的各个环节中。并制定了与双碳理念与课程思政相适应的教学目标、设计了教学内容、改进了教学方法、提出了课程评价体系。在提升研究生专业素养的同时,提高研究生的政治思想水平,实现立德树人、价值塑造、知识传授和能力培养的育人目标。

## 1. 融合了双碳和课程思政的教学目标

将双碳和思政理念融入到电机前沿技术课程教学中,将知识技能的传授与思想政治教育有效融合,培养学生的绿色发展理念和社会责任意识。实现价值塑造、知识传授和能力培养的教学目标。

### 1.1 价值塑造

将电机前沿技术课程中融入双碳理念和思政教育。在教学过程中,注重培养研究生的守正创新、科技强国意识,激发研究生的理想信念、民族自豪感、社会责任感和国家使命感,提升研究生的综合素质,使他们能够在未来从事相关工作时,积极贡献自己的力量。

结合电机前沿技术的发展历史和重大创新成果,激发研究生的理想信念、民族自豪感和使命感;通过电机前沿技术在能源、交通、日常生活等方面应用的典型案例,引导研究生理解和践行低碳生活和节能减排的双碳目标,形成推动绿色低碳发展的行为习惯,培养研究生对可持续发展和环境保护的价值观,倡导节约资源和保护环境的生活方式,强化研究生的社会责任意识,助力研究生树立正确的世界观、人生观和价值观;通过项目驱动、团队合作和成果展示,帮助研究生理解国家双碳目标的战略意义、重要性和紧迫性以及对国家发展和国际形象的影响,培养研究生诚信、敬业、团结协作的优秀品质和人格魅力,激发研究生的守正创新、科技强国意识,将学生培养成具有较高的思想政治水平和综合能力的复合型高级专业人才。

### 1.2 知识传授

电机种类众多,广泛应用于能源、交通、国防科技、工业制造、日程生活等各个方面,对双碳目标的顺利实现具有重要的支撑作用。结合电机在上述各个领域的应用,传授电机中的先进设计理念、新技术新方法的应用、创新性的研究成果、交叉学科的特点、有待解决的问题等内容。在有限的学时内,通过丰富的教学方法和手段,拓宽教学内容的广度与深度,将最新的电机前沿动态传递给学生,

使学生及时了解电机前沿技术的最新研究进展和研究成果、理解学科的发展动态和发展趋势。

### 1.3 能力培养

通过电机技术的最新研究成果和工程应用案例,培养学生能够应用电机的基础理论和现代控制思想实现高效节能电机的设计和应用目标。将电机的基础知识与人工智能相结合实现电机及其系统的智能控制、状态监测、故障预警与寿命预测,提高电机及其系统的寿命及运维水平,减少碳排放,达到碳中和的目标。通过查找文献、项目驱动、论文写作等方法使学生对双碳概念、目标、策略和实践有全面的理解,培养学生独立思考、理论分析、工程应用的科研能力和综合素质,提高学生的创新能力、批判性思维和解决实际问题的能力。

## 2. 融合了双碳和课程思政的教学内容

通过教学内容设计和实践过程,挖掘课程中各个章节的思政元素,将知识内化为能力,同时积极构思课程思政体系,通过拓展教学内容深度以及导入双碳案例,使得课程思政教育落地性强,以促进专业课与思政课的协同效应。

电机及其系统是一种涉及了电磁、流体、热、结构、力、电力电子、自动控制等多个学科领域的设备,交叉性强、涉及面广。而数值计算方法、传感技术、数据采集、人工智能等领域的不断发展,也极大地促进了电机学科的发展。在有限的学时内,需要结合电气工程学科的特点以及双碳目标,从理论教学、实践教学、工程应用等方面,精选具有前沿特点的教学内容,并将思政理念贯穿于整个教学过程中。

### 2.1 理论教学

电机前沿技术课程的理论教学分以下几部分:

#### (1) 电机的基础理论和应用领域

若要深入理解电机前沿技术课程中涉及的电机领域的发展趋势和创新性的研究成果,需要具备电机学的基础理论知识,考虑到研究生的不同专业背景和不同本科院校的学术背景,首先回顾电机的基本理论、各类电机的特点和工作特性,然后介绍电机的发展历程以及在清洁能源、低碳交通、国防科技、低碳生活等领域的应用情况。在介绍电机的发展历程以及创新性研究成果时,引入电机领域的杰出人物,弘扬创新精神、奉献精神和家国情怀,培养研究生的社会责任感和国家使命感。

#### (2) 电机及其系统中的新技术

随着计算方法、自动控制、传感器、数据采集和处理、人工智能、超导等新技术和新材料的发

展,促进了电机技术的创新和发展。在此基础上,引入电机技术的前沿技术和最新研究成果,如电机材料、结构、控制技术、健康管理等方面的创新性研究成果。通过科研人员在这些方面付出的辛勤劳动和获得的研究成果,培养学生勇于创新、甘于奉献的思想意识和吃苦耐劳、坚忍不拔的科研精神。

### (3) 电机新技术中尚未解决的问题和发展方向

重点讲授几种新型电机的结构、工作原理以及涉及的新技术,如超导电机、超大容量电机、微特电机、高效永磁电机、换流变压器等。在此基础上,引出目前该类电机的发展动态、尚未解决的问题以及未来的研究方向。在讲授新型电机时,通过介绍电机技术在国家重大工程中的应用,如电机在高铁、舰船、可再生能源、特高压电网等领域的应用,使学生理解电机前沿技术在减少碳排放达到碳中和中的重要作用,增强学生的民族自豪感和国家使命感。

### (4) 人工智能技术及其在电机领域中的应用

介绍人工智能的发展、创新性的研究成果以及在电机及其系统中的应用。近年来,人工智能技术发展迅速,在电机及其系统中也逐渐得到了应用。如将大数据分析、数据处理、深度学习、迁移学习、强化学习等方法应用于新能源汽车、无人驾驶汽车等电机的控制与应用、电机的状态监测、状态评估、故障诊断和预警、寿命预测等领域。引导学生形成数据安全意识,拓展学生的国际视野,培养学生的终身学习能力,以适应未来在电机技术及其环境应用方面的挑战。

### (5) 双碳背景下电机前沿技术的典型应用案例

结合实际工程案例,分析电机前沿技术在绿色能源、环境保护、智能制造、智能交通、国家重大工程等领域的应用情况及发展前景。通过介绍高效电机、核电机组、风力发电机组、水力发电机组等方面的研究成果以及在节能减排和环境保护中的重要作用,培养学生的创新意识、生态文明意识、环境保护意识和社会责任感,助力学生形成社会主义核心价值观。

## 2.2 实践教学和工程应用

围绕与双碳目标相关的教学内容,形成几个案例,然后引导学生查找文献、发现问题和分析问题,鼓励学生运用创新思维来探索和解决问题,讨论可能的解决方案。另外,让学生就自己感兴趣的领域,围绕双碳目标自主选择主题形成一个小项目进行深入研究,鼓励学生自主寻找合作伙伴,与同学一

起组成小团队,分工协作共同完成项目研究。在团队项目和合作研究中,培养学生的沟通能力、团队协作精神和领导能力。通过上述形式,将电机前沿技术的理论知识与工程应用相结合,培养学生应用基础理论解决实际问题的能力,提高学生的批判性思维与创新能力。

## 2.3 课程大纲

完善电机前沿技术的课程教学大纲,将双碳目标和思政元素从教学目标、教学内容、教学方法和手段、教学评价等方面全面融入课程的教学活动中。

## 3. 教学方法

紧紧围绕教学目标与教学内容,采用形式多样的教学方法和手段,旨在培养出既有较高的专业素养,又具有社会主义核心价值观、民族自豪感和国家使命感的高层次复合型人才。

### 3.1 充分利用各种资源,树立双碳理念

利用与课程相关视频、动画、资源链接等多媒体资源和网络教学平台,为学生提供丰富的教学资源,增强学生的学习兴趣、探索和发现的欲望以及理解能力。引导学生利用网络资源和图书馆资源,查找和阅读文献,提高学生课前课后的自主学习能力,培养学生开展科学研究的基本素养。使学生逐步树立双碳理念,深刻理解电气工程领域实现双碳目标的意义,了解国内外在双碳背景下发展的新技术、新方法和新成果。

### 3.2 提高学生在课堂教学中的参与度

在课堂教学中,摒弃老师讲、学生听的传统教学模式,可以提出问题、引导学生参与讨论提出解决方案;也可以让学生将自行组队完成的项目成果在课堂中展示,展示的方式由学生自行确定,在学生展示研究成果的过程中,鼓励其他同学参与到课题讨论中,如提出质疑等方式。通过学生的积极参与,既活跃了课堂气氛、吸引了学生的注意力,又培养了学生积极思考、勇于展示自我、敢于质疑的意识,提高了学生的批判性思维、团队合作和沟通表达能力。

### 3.3 通过案例教学提高学生的工程创新与应用意识

以双碳为目标,选取典型的电机技术应用案例,如可再生能源发电及控制包括风力发电和抽水蓄能等技术、新能源电动汽车、高效电机、换流变压器等,分析电机前沿技术在实际工程中的应用,指出其存在的问题以及未来的发展趋势。将思政元素融入到案例分析中,使学生深刻理解绿色能源、低碳交通、低碳生活等技术的环保意义,积极推动

节能降碳改造升级、促进绿色低碳技术的创新和应用、提升能源利用效率的战略意义,技术创新的社会价值等,培养学生的社会责任感和家国情怀。

### 3.4 通过项目驱动教学提高学生的创新能力

以双碳为目标,围绕电机前沿技术课程的教学内容,引导学生自主探索、发现问题、形成研究项目,自由结组形成研究团队,依靠团队力量,分析问题、提出解决方案、获得研究成果。在完成项目的过程中提升学生的自主学习、勇于探索和创新、敢于实践以及解决实际问题的能力,培养学生的表达能力、写作能力、批判性思维 and 创新能力。引导学生自觉做绿色低碳技术的创新者和践行者。

### 3.5 开展校企合作开阔学生的学术视野

围绕双碳技术,聘期企业专家到校开展讲座,给学生创造与企业专家面对面的交流机会。企业专家在开展讲座的过程中,通过新技术新方法在实际工程中的应用,使学生深切感受到电机领域的发展以及在国计民生等各个行业中的重要作用,学生可以更好地了解电机行业的前沿技术和发展趋势,增强学生的就业竞争力和民族自豪感。

### 3.6 形成与教学内容相适应的思政资源库

收集和整理双碳背景下电机前沿领域的各种工程案例和思政故事,通过逐步积累,形成与电机前沿技术课程相适应的思政案例库,并将其融入到电机前沿技术的课程教学中,使思政教育更加生动具体,增强课程的思政教育效果。

## 4. 教学评价体系

### 4.1 多元化评价

构建多元化、多维度的评价体系,将过程性评价和终结性评价相结合,既关注学生的学习过程,又注重其学习成果。在平时教学过程中,鼓励学生参与讨论,通过案例分析和实践活动,考核学生的参与度、认识问题和解决实际问题的能力。结课时,让学生围绕教学内容自行确定研究课题、撰写研究论文,评估并提升学生的综合能力。

### 4.2 思政元素评价

将双碳政策和思政目标融入到教学评价体系中,通过问卷调查、课堂讨论、案例分析和项目报告等方式,了解学生对双碳政策和思政元素的理解和认同情况;考察学生的绿色发展理念和社会责任意识等方面的表现。

### 4.3 以评促学以评促教

基于评价结果,反思和改进教学方法,在教学过程中,不断提升学生的四个自信、社会责任感和民族自豪感,培养学生的探索精神、批判性思维和

创新能力,提高学生的综合素养。通过评价体系的优化,切实达到以评促学、以评促教,实现育人和育才的双重效果。

## 5. 结束语

围绕双碳目标和思想政治教育目标,制定了电机前沿技术课程的教学目标、教学内容、教学方法和评价体系,尝试进行了教学改革。通过在教学过程中融入双碳内容和思政元素,不仅提升了学生的专业素养,培养了学生的绿色发展理念和社会责任意识,使学生深入理解和践行双碳目标,形成推动绿色低碳发展的行为习惯。在提高学生批判性思维和创新能力的同时,还培养了学生的思想政治素养和综合素质,为实现“双碳”目标和可持续发展提供人才支持。

**基金项目:** 1.河北省研究生课程思政示范课程、教学名师(团队)项目:电机前沿技术(YKCSZ2022128)

2.华北电力大学“双一流”建设项目、教育教学改革专项:《电机前沿技术》课程思政建设

Project Supported by 1.Hebei Province Graduate Course Ideological and Political Demonstration Course, Teaching Master (Team) Project (YKCSZ2022128); 2. Double First Class Construction Project and Education and Teaching Reform Special Project of North China Electric Power University:

## 参考文献

- [1] 中共中央 国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见. 新华社北京 2021 年 10 月 24 日电, [https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm)
- [2] 国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》. 新华社北京 2021 年 10 月 26 日电, <https://www.mohrss.gov.cn/SYrlzyhshbzb/dongtaixinwen>
- [3] 习近平. 中国将构建起碳达峰、碳中和“1+N”政策体系. [https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/12/content\\_5642050.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-10/12/content_5642050.htm)
- [4] 教育部. 关于印发《高等学校课程思政建设指导纲要》的通知 [EB/OL]. 教高(2020)3号, (2020-06-01). [http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603\\_462437.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603_462437.html)
- [5] 梁德东, 高杉, 刘静远. 立德树人目标下研究生课程思政的实现路径研究 [J]. 吉林师范大学学报(人文社会科学版), 2023, 51(03): 109-116.
- [6] 习近平在全国教育大会上强调: 坚持中国特色社会主义教育发展道路, 培养德智体美劳全面发展的社会主义建设者和接班人 [EB/OL]. (2018-09-11). <http://edu.people.com.cn/n1/2018/0911/c1053-30286253.html>

收稿日期: 2013-07-04.

作者简介:

李俊卿(1967-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电机及其系统分析, 新能源电力系统分析与控制  
E-mail: junqing03@163.com.



李俊卿



文章编号: 1000-3673 (2014) 01-0001-07 中图分类号: TM 72 文献标志码: A 学科代码: 470 4054

# 虚拟同步发电机转动惯量、阻尼系数和虚拟电感协同自适应控制策略

杨巧玲<sup>1</sup>, 满建樟<sup>1</sup>, 陈凯<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃, 兰州)

## Cooperative adaptive control strategy of virtual synchronous generator moment of inertia, damping coefficient, and virtual inductance

Qiaoling Yang<sup>1</sup>, Jianzhang Man<sup>1</sup>, Kai Chen<sup>1</sup>

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou City, China)

**ABSTRACT:** The Virtual Synchronous Generator (VSG) technique improves the immunity to interference at the VSG system frequency by introducing a moment of inertia and damping. However, it degrades the system's dynamic regulation performance. Based on this, a virtual synchronous generator moment of inertia, damping coefficient, and virtual inductance cooperative adaptive control strategy is proposed. The strategy adjusts the values of the moment of inertia, damping coefficient, and virtual inductance according to the change in angular frequency deviation. It introduces the power deviation and the change of angular frequency deviation into the control function of the moment of inertia, damping coefficient, and virtual inductance to realize the effective regulation of output power and frequency. To verify the effectiveness of the strategy, the sudden change of the given active power is simulated and compared with other single or two-parameter virtual synchronous generator adaptive control strategies, the results show that the virtual synchronous generator moment of inertia, damping coefficient, and virtual inductance synergistically adaptive control strategy further reduces the overshooting amount of the active power and frequency of the VSGs, improves the dynamic characteristics of the system, and takes advantage of the flexible adjustability of the inverter parameters. advantage of flexible and adjustable inverter parameters.

**KEY WORDS:** Virtual synchronous generator; Moment of inertia; Damping coefficient; Virtual inductance; Adaptive control

**摘要:** 虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)技术通过引入转动惯量和阻尼,改善了VSG系统频率的抗干扰能力,但是会使得系统的动态调节性能降低。基于此,提出一种虚拟同步发电机转动惯量、阻尼系数和虚拟电感协

同自适应控制策略。该策略根据角频率偏差的变化调节转动惯量、阻尼系数和虚拟电感大小,将角频率偏差和功率偏差引入到转动惯量、阻尼系数和虚拟电感的控制函数中,来实现对输出有功功率和频率的有效调节。为了验证该策略的有效性,模拟给定有功功率的突变,与其他单个或两个参数的虚拟同步发电机自适应控制策略进行对比试验;结果表明,虚拟同步发电机转动惯量、阻尼系数和虚拟电感协同自适应控制策略,能进一步降低了VSG的有功功率和频率的超调量,改善系统动态特性,发挥出逆变器参数灵活可调的优势。

**关键词:** 虚拟同步发电机;转动惯量;阻尼系数;虚拟电感;自适应控制

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.01

## 0 引言

随着国家双碳计划的提出,我国能源结构由煤炭、石油等化石能源向着风光等新能源转型,加快降低碳排放步伐,引导绿色技术创新,增大新能源的消纳成为当下研究的热点<sup>[1]</sup>。越来越多的具有波动性和不确定性的新能源通过逆变器接入电网,降低了系统的惯量水平,给系统的安全运行带来了新问题<sup>[2]</sup>。因此,钟庆昌教授提出了虚拟同步发电机(Virtual synchronous generator, VSG)技术,模拟了同步发电机(Synchronous Generator, SG)的外特性,增强了系统频率的抗干扰能力<sup>[3]</sup>。当微电网系统发生扰动时,传统的VSG由于其转动惯量和阻尼系数固定<sup>[4]</sup>,对系统功率和频率的调节存在一定的局限性,为此,众多学者对转动惯量和阻尼系数的自适应变化进行了研究。同时为了解决功率耦合问题,可以通过引入虚拟阻抗,使系统等效输出阻抗可以调整,从而提高参数选择上的自由度<sup>[5]</sup>。文献<sup>[6]</sup>



提出了一种转动惯量自适应控制策略,可实现转动惯量的自适应变化,但没有考虑阻尼对系统的影响。文献[7]设计了基于模糊原理的转动惯量的变化规则,虽然抑制了暂态过程中的频率波动,但是没有具体分析调节补偿系数和输出量化因子对系统的影响和选取原则。文献[8]提出了转动惯量和阻尼系数的协同自适应控制策略,虽然抑制了频率的波动性,但是没有分析加入虚拟阻抗的影响。

基于以上研究提出虚拟同步发电机转动惯量、阻尼系数和虚拟电感协同自适应控制策略。首先,通过 VSG 的有功功率、虚拟转子角频率和虚拟转子角频率变化率的变化曲线,讨论其三个参数在 VSG 系统暂态阶段的变化规律;其次,根据上述规律建立 VSG 的转动惯量、阻尼系数和虚拟电感的自适应函数;最后,建立 VSG 仿真模型,设置不同的控制策略,在给定有功功率突变的条件下对比系统有功功率和频率的变化情况,仿真试验结果证明了该策略的有效性。

## 1 VSG 的基本原理

VSG 并网逆变器的基本控制结构如图 1 所示。

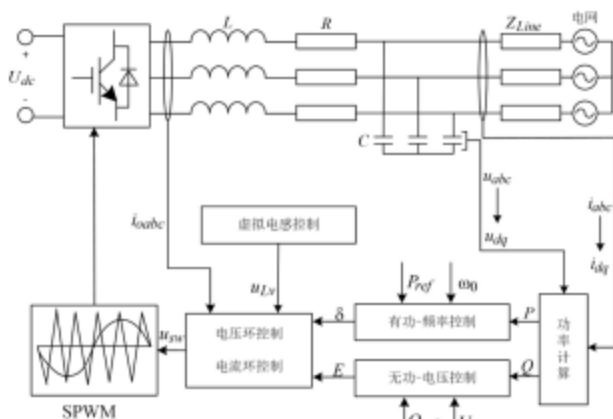


图1 VSG 并网逆变器基本控制框图

**Fig. 1 Basic control block diagram of VSG-based grid-connected inverter**

由于不考虑能量转换, 用直流电压源  $U_d$  代替分布式电源,  $L$  为滤波电感,  $R$  为滤波电阻,  $C$  为滤波电容,  $Z_{Line}$  为逆变器线路阻抗,  $i_{abc}$  为逆变器输出电流,  $u_{abc}$  为电容电压,  $i_{abc}$  为并网点输出电流,  $u_{dq}$  和  $i_{dq}$  分别为  $u_{abc}$  和  $i_{abc}$  对应的  $d$ - $q$  轴电流,  $P$  为逆变器输出有功功率,  $P_{ref}$  为给定有功功率,  $Q$  为逆变器输出无功功率,  $Q_{ref}$  为给定无功功率,  $\omega_0$  为 VSG 的额定角频率,  $U_0$  为 VSG 的额定电压,  $\delta$  为功角,  $E$  为 VSG 的虚拟内电势,  $u_{Lr}$  为虚拟阻抗上的电压,  $u_{inv}$  送入 SPWM 环节的电压调制波。

VSG 通过转子运动方程引入转动惯量和阻尼

系数,模拟了同步发电机的特性<sup>[9]</sup>,具体如式(1)、(2)、(3)所示。

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} T_m = \frac{P_m}{\omega} \approx \frac{P_m}{\omega_0} \\ T_\varepsilon = \frac{P_\varepsilon}{\omega} \approx \frac{P_\varepsilon}{\omega_0} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = P_{ref} + K_f(\omega_0 - \omega) \quad (3)$$

其中,  $J$  为转动惯量,  $D$  为阻尼系数,  $T_m$  为虚拟机械转矩,  $T_e$  为虚拟电磁转矩,  $P_m$  为虚拟电磁功率,  $P_e$  为虚拟机械功率,  $\omega$  为实际输出角频率,  $K_f$  为调差系数。

VSG 的无功功率-电压控制方程如式(4)所示。

$$E = k_a \int [k_Q (Q_{ref} - Q) + (U_0 - U)] dt \quad (4)$$

其中,  $k_a$  为无功积分系数,  $k_Q$  为无功电压下垂系数,  $U$  为 VSG 的实际输出电压。

## 2 VSG 参数的可调节性

## 2.1 转动惯量和阻尼系数的可调节性

VSG模拟了SG的特性, SG的转子储存的动能表达式为:

$$E_{KS} = \frac{1}{2} J_I \omega_m^2 \quad (5)$$

其中,  $J_t$  为 SG 的转动惯量,  $E_{KS}$  为 SG 中转  
子动能,  $\omega_m$  为 SG 的转子角频率。

VSG是在系统由一个稳态过渡到另一个新稳态的过程中发挥作用,则类比SG可得,VSG平抑功率偏差所需的动能 $\Delta E_K$ 为:

$$\Delta E_K = \frac{1}{2} J (\omega_2^2 - \omega_1^2) = \frac{1}{2} J \Delta \omega (\Delta \omega + 2\omega_1) \quad (6)$$

其中,  $\omega_1$  为系统稳定运行时的角频率,  $\omega_2$  为系统受到扰动时的角频率,  $\Delta\omega$  为角频率偏差。将式 (1) 变形可得:

$$\frac{T_m - T_e - D\Delta\omega}{J} = \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

当 $(T_m - T_e - D\Delta\omega)$ 一定时,系统角频率变化率与转动惯量成反比,即转动惯量越大,角频率变化率越小;但转动惯量不易过大,过大会降低系统的响应速度。再次将式(1)变形可得:

$$\frac{T_m - T_e - J(d\omega/dt)}{D} = \Delta\omega \quad (8)$$

对于阻尼系数可改变性的分析, 当  $[T_m - T_s - J(d\omega/dt)]$  一定时, 系统角频率变化量与阻尼系数成反比。适当增大阻尼系数, 有利于 VSG

系统的稳定, 阻尼系数决定了系统响应振荡的衰减速率<sup>[10]</sup>。

## 2.2 虚拟电感的可调节性

虚拟阻抗实质上是模拟存在一个与线路阻抗串联的额外阻抗<sup>[11]</sup>, 由于  $\omega L_v \gg R_v$ , 故只需要改变虚拟阻抗中虚拟电感的值即可。将定子电气方程变形可得:

$$\begin{cases} E^* = E + E_v \\ E_v = -I_g Z_v \\ Z_v = R_v + j\omega L_v \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $E^*$  为参考电压,  $E$  为逆变器的实际输出电压,  $Z_v$  为虚拟阻抗,  $I_g$  为逆变器的输出电流。

VSG 的输出有功功率方程为:

$$P_g = \frac{E^* U_g}{X} \sin \delta \quad (10)$$

其中,  $U_g$  为逆变器输出电压幅值,  $X$  为逆变器输出电抗。

将式 (9) 代入式 (10) 中可得:

$$P_g = \frac{(E + E_v) U_g}{X} \sin \delta \quad (11)$$

由式 (9) 和式 (11) 可知, 若适当改变虚拟电感的值, 则会改变虚拟阻抗上的电压, 从而改变 VSG 的输出功率  $P_g$ , 进而影响了角频率  $\omega$  的波动。

## 3 转动惯量、阻尼系数和虚拟电感的协同自适应控制策略

### 3.1 暂态过程中的参数自适应规则

当 VSG 系统受到扰动时, 可将其分为四个阶段, 阶段 1:  $t_0 - t_1$ , 阶段 2:  $t_1 - t_2$ , 阶段 3:  $t_2 - t_3$ , 阶段 4:  $t_3 - t_4$ , 该过程中  $P_g$ 、 $\omega$ 、 $d\omega/dt$  的变化曲线如图 2 所示。

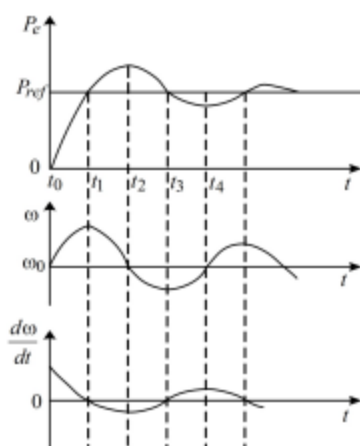


图 2  $P_g$ 、 $\omega$ 、 $d\omega/dt$  的变化曲线

Fig. 2 Change curve of  $P_g$ 、 $\omega$ 、 $d\omega/dt$

(1) 阶段 1:  $t_0 - t_1$ ,  $\Delta P = P_{ref} - P_g > 0$ ,

$d\omega/dt > 0$ , 输出有功功率  $P_g$  逐渐增加, 角频率  $\omega$  逐渐增大, 角频率偏差  $\Delta\omega > 0$ , 此阶段中, 增大转动惯量  $J$  和阻尼系数  $D$ , 角频率变化率  $d\omega/dt$  会减小, 相当于阻碍角频率的快速变化; 适当减小虚拟电感  $L_v$ , 则会加快输出有功功率  $P_g$  的增长速度, 缩短输出有功功率  $P_g$  追踪有功功率给定值  $P_{ref}$  的时间。

(2) 阶段 2:  $t_1 - t_2$ , 从  $t_1$  时刻开始, 由于惯性, 输出有功功率  $P_g$  会继续增加,  $\Delta P = P_{ref} - P_g < 0$ ,  $d\omega/dt < 0$ , 角频率偏差  $\Delta\omega > 0$ , 角频率  $\omega$  开始向稳态值回落, 此阶段中, 减小转动惯量  $J$  和阻尼系数  $D$ , 角频率变化率的绝对值  $|d\omega/dt|$  会增加, 加快角频率  $\omega$  向稳态值的回落速度; 适当增加虚拟电感  $L_v$ , 降低输出有功功率  $P_g$  的增加速度, 会降低系统输出有功功率的超调量。

同理可得阶段 3 与阶段 4 的参数变化情况。

综合以上分析, 转动惯量、阻尼系数和虚拟电感在 VSG 暂态过程中的变化规则如表 1 所示:

表 1 转动惯量、阻尼系数和虚拟电感在暂态中的变化规则  
Table 1 Rules for variation of the moment of inertia, damping coefficient, and virtual inductance in transient state

| 阶段 | $\Delta\omega$ | $d\omega/dt$ | $\Delta P$ | $\Delta P \Delta\omega$ | $J$ | $D$ | $L_v$ |
|----|----------------|--------------|------------|-------------------------|-----|-----|-------|
| 1  | $> 0$          | $> 0$        | $> 0$      | $> 0$                   | 增大  | 增大  | 减小    |
| 2  | $> 0$          | $< 0$        | $< 0$      | $< 0$                   | 减小  | 减小  | 增大    |
| 3  | $< 0$          | $< 0$        | $< 0$      | $> 0$                   | 增大  | 增大  | 增大    |
| 4  | $< 0$          | $> 0$        | $> 0$      | $< 0$                   | 减小  | 减小  | 减小    |

### 3.2 参数自适应函数

由表 1 可知, 角频率变化率  $d\omega/dt$  和功率偏差  $\Delta P$  同号; 故用功率偏差  $\Delta P$  替代角频率变化率  $d\omega/dt$  进行分析, 并基于功率偏差  $\Delta P$  和角频率偏差  $\Delta\omega$  设计转动惯量、阻尼系数和虚拟电感的控制函数, 具体公式为:

$$J = \begin{cases} J_0, & |\Delta\omega| \leq M_1 \\ J_0 + K_1 \Delta P \Delta\omega, & \Delta P \Delta\omega > 0 \text{ 且 } |\Delta\omega| > M_1 \\ J_0, & \Delta P \Delta\omega < 0 \text{ 且 } |\Delta\omega| > M_1 \end{cases} \quad (12)$$

$$D = \begin{cases} D_0, & |\Delta\omega| \leq M_2 \\ D_0 + K_2 |\Delta\omega|, & |\Delta\omega| > M_2 \end{cases} \quad (13)$$

$$L_v = \begin{cases} L_{v0}, & |\Delta\omega| \leq M_3 \\ L_{v0} + \frac{-\Delta P}{|\Delta P|} |\Delta\omega| K_3, & |\Delta\omega| > M_3 \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $J_0$  为转动惯量初始值,  $K_1$  为转动惯量调节系数,  $D_0$  为阻尼系数初始值,  $K_2$  为阻尼调节系数,  $K_3$  为虚拟电感调节系数,  $L_{v0}$  为虚拟电感的初始值,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  分别为转动惯量、阻尼系数和虚拟电感的函数对应角频率偏差的阈值。

当 VSG 系统受到扰动时功率和角频率会发生

变化,此时,如果角频率偏差超过规定的阈值,则转动惯量、阻尼系数和虚拟电感会发生相应的变化,加快VSG系统由稳态-暂态-稳态的恢复过程,以此充分发挥逆变器参数灵活可调的优势。

### 3.3 VSG系统主要参数整定

在VSG系统发生扰动时,可利用调节系数 $K_1$ 限定 $\Delta P$ 的变化,所以 $K_1$ 的表达式为:

$$K_1 = \frac{J_{\max} - J_0}{\Delta \omega \Delta P_{\max}} \quad (15)$$

式中, $J_{\max}$ 为转动惯量的最大值, $\Delta P_{\max}$ 为功率偏差的最大值。

转动惯量 $J$ 应该控制在一定范围之内,同时参考鲁汶大学提出的虚拟同步机方案,为了充分利用逆变器的输出功率能力,转动惯量 $J$ 应该满足以下条件:

$$J \leq \frac{P_{\max}}{\max\{\omega(d\omega/dt)\}} \quad (16)$$

根据控制系统理论,系统工作在欠阻尼状态,当阻尼比 $\zeta < 0.4$ 时,超调量较大;当阻尼比 $\zeta > 0.8$ 时,又会使得系统响应速度迟缓;所以,取 $\zeta = 0.707$ 为“最佳阻尼比”,则初始阻尼系数 $D_0$ 可根据式(17)选取:

$$D_0 = 2\zeta \sqrt{\frac{JE^*U}{\omega_0 X}} - \frac{K_f}{\omega_0} \quad (17)$$

通过角频率变化量阈值 $M$ 的设定,使得VSG中转动惯量、阻尼系数和虚拟电感能够根据系统的需要实时变化,保证了系统的稳定性。由式(1)变形可得:

$$\Delta \omega = \frac{1}{D} \left( \Delta P - J \frac{d\omega}{dt} \right) \quad (18)$$

所以可得到角频率变化量阈值取值范围为:

$$0 \leq M \leq \left| \frac{1}{D} \left( \Delta P - J \frac{d\omega}{dt} \right) \right| \quad (19)$$

## 4 仿真实验及分析

为了验证所提方法的有效性,在给定有功功率突变时,对比分析不同VSG控制方法对功率和频率的影响。系统仿真参数如表2所示:

表2 系统仿真参数

Table 2 Parameters of system simulation

| 参数                   | 数值                 | 参数               | 数值   |
|----------------------|--------------------|------------------|------|
| $U_d / V$            | 700                | $P_{ref} / kW$   | 20   |
| $C / F$              | $3 \times 10^{-5}$ | $Q_{ref} / kvar$ | 10   |
| $R / \Omega$         | 0.1                | $K_f$            | 159  |
| $J_0 / kg \cdot m^2$ | 0.25               | $M1$             | 0.20 |

|                                          |       |      |      |
|------------------------------------------|-------|------|------|
| $D_0 / N \cdot m \cdot s \cdot rad^{-1}$ | 12    | $M2$ | 0.15 |
| $L_d / H$                                | 0.004 | $M3$ | 0.10 |

### 4.1 给定有功功率突变

采用单机VSG并入电网中,设置不同控制策略,策略1:参数固定的VSG控制;策略2: $J$ 自适应的VSG控制;策略3: $J$ 、 $D$ 协同自适应的VSG控制;策略4: $J$ 、 $D$ 、 $L_d$ 协同自适应的VSG控制。设置仿真时长为1.5s,初始时刻VSG的有功功率设定为10kW,0.4s时有功功率突增至20kW,1.0s时有功功率突降至10kW,整个过程中无功功率恒定为10kvar。下图3和图4分别为四种不同控制策略下VSG系统输出有功功率和频率的对比图。

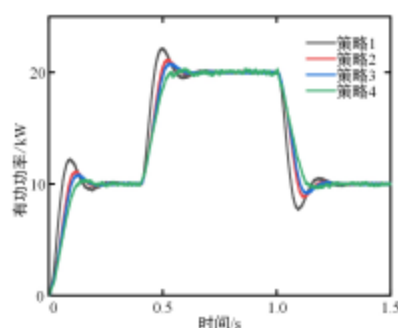


图3 有功功率对比图

Fig. 3 Comparison of active power

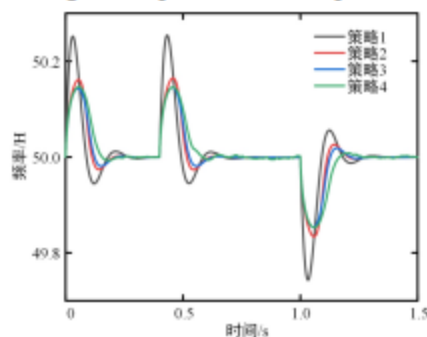


图4 频率对比图

Fig. 4 Comparison of frequency

从图3和图4中可以看出当采用策略1固定参数的VSG控制时,VSG系统输出有功功率和频率会出现大的超调量,不利于系统稳定运行,与策略2相比,自适应控制加入后,输出有功功率和频率的超调量大幅度降低;策略4与其它三种策略对比,超调量最低,且VSG系统有功功率和频率到达稳定范围的时间也有缩短;综合分析,转动惯量、阻尼系数和虚拟电感的协同自适应控制有利于维持系统的稳定性,提升系统的动态响应性能。

### 4.2 转动惯量、阻尼系数和虚拟电感的自适应变化

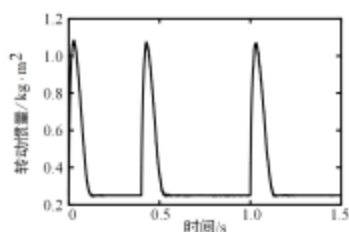


图5 转动惯量自适应变化

Fig. 5 Adaptive change of moment of inertia

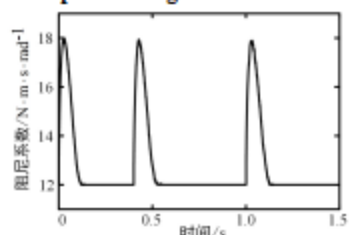


图6 阻尼系数自适应变化

Fig. 6 Adaptive change of damping coefficient

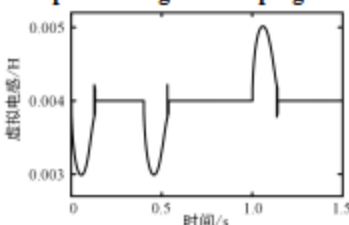


图7 虚拟电感自适应变化

Fig. 7 Adaptive change of virtual inductance

从图5、图6和图7中可以看出,当给定有功功率发生变化时,其转动惯量、阻尼系数和虚拟电感都根据需要发生相应变化,使系统快速恢复稳定,体现出了该策略的灵活性。

## 5 结论

通过对提出的虚拟同步发电机转动惯量、阻尼系数和虚拟电感自适应协同控制策略进行理论分析、仿真验证并与其它控制策略相比较,可得,所提出的控制策略综合考虑了转动惯量、阻尼系数和虚拟电感的变化,充分利用了逆变器参数灵活可调的优势,有效降低了系统输出有功功率和频率的超调量,进一步改善了系统的动态响应性能。

## 参考文献

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6258. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.210050.
- [2] 陈琦,李红伟,周海林.考虑风电消纳的电-热综合能源系统经济运行研究[J].中国测试,2022,48(1):116-121. DOI:10.11857/j.issn.1674-5124.2020090100.
- [3] 钟庆昌.虚拟同步机与自主电力系统[J].中国电机工程学报,2017,37(02):336-349. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.162325.
- [4] 李德胜,李国策,刘博.基于虚拟同步发电机控制技术的V2G系统研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(07):127-133.

DOI:10.19783/j.cnki.pspc.D202009.

- [5] Bo L, Wandi Y, Shihan Z, et al. Power-frequency admittance model of multi-VSGs grid-connected system considering power coupling[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2024, 155(PA). DOI:10.1016/j.ijepes.2023.109513.
- [6] 王印松,金涛,翁鑫.改进转动惯量自适应控制的虚拟同步发电机[J/OL].中国测试,1-6[2024-08-05]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20240325.1223.010.html.
- [7] 周建萍,胡成英,茅大钧.基于模糊控制的自适应虚拟同步发电机控制策略[J].广东电力,2020,33(01):53-60. DOI:10.3969/j.issn.1007-290X.2020.001.007.
- [8] 杨效,曾成强,苗虹.优化虚拟同步发电机惯量和阻尼的自适应控制策略[J].太阳能学报,2023,44(11):495-504. DOI:10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1049.
- [9] 朱作溪,孙树敏,丁月明.基于VSG的低电压穿越控制策略研究[J].太阳能学报,2024,45(02):376-383. DOI:10.19912/j.0254-0096.
- [10] 石荣亮,张兴,刘芳.虚拟同步发电机及其在多能互补微电网中的运行控制策略[J].电工技术学报,2016,31(20):170-180. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2016.20.017.
- [11] 孙久亮,蔡蔚,郭庆波.基于虚拟阻抗优化的VSG暂态功角稳定自适应控制策略[J].电机与控制学报,2024,28(01):35-48. DOI:10.15938/j.emc.2024.01.004.

基金项目:甘肃省自然科学基金(项目编号:23JRRA836)。

Natural Science Foundation of Gansu Province (Project No. 23JRRA836).

收稿日期:2024-08-05。

作者简介:

杨巧玲(1978),女,副教授,硕士生导师,研究方向为电机设计与控制、可再生能源发电与智能电网, E-mail: winds-qiaoer@163.com.

满建辉(1997),男,硕士研究生,研究方向为分布式发电及虚拟同步发电机技术, E-mail:



杨巧玲

manjz1122@163.com.

