

山东电力技术

SHANDONG ELECTRIC POWER



山东能源互联网仿真防御实验室

广告

国网山东省电力公司主办

ISSN 1007-9904



2025.1

第52卷
2025年1月

山东电力技术

2025年 第52卷 第1期 (总第326期)

收录情况

中国科技核心期刊
中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊
中国期刊全文数据库（CJFD）收录期刊
中文科技期刊数据库收录期刊
波兰 ICI World of Journals 数据库收录期刊
波兰 ICI Journals Master List 数据库收录期刊
美国《乌利希期刊指南》收录期刊

山东电力技术
SHANDONG DIANLI JISHU
（月刊）

1974 年创刊 2025 年第 1 期
第 52 卷（总第 326 期）
2025 年 1 月 25 日出版

主管单位：国网山东省电力公司
主办单位：国网山东省电力公司
编辑出版：《山东电力技术》编辑部
地 址：济南市市中区望岳路 2000 号
邮政编码：250003
电 话：（0531）67982997
电子信箱：sddljs@sina.com
网 址：sddljs.cbpt.cnki.net
印 刷：济南浪宇印刷有限公司
发 行：公开发行 自办征订
定 价：18.00 元 / 册

《山东电力技术》编辑委员会

顾 问：陈维江 郑建华 侯保荣 雷清泉 王成山
主 任：孙 岗
副 主 任：王伟胜 吴文传 刘玉田 陈志勇 梁作宾
田 健
委 员：（按姓氏笔画为序）

丁 磊 丁 勇 王 波 王建东 孙 波
孙树敏 严志国 苏 洲 吴秋伟 赵艳雷
姜雨泽 郭 锐 彭道刚 董 泽 程新功

青年编委主任委员：姚 伟 李正烁

青年委员：（按姓氏笔画为序）

丁 涛 王士柏 王中冠 王 彬 巨云涛
牛 涛 刘晓明 许 寅 李志刚 李知艺
杨 越 沈欣炜 陈思捷 郑伟业 钟海旺
高 嵩 常馨月 薛屹洵

主 编：吴文传 孟 瑜

执行主编：马 艳

责任编辑：王学厚

编 辑：郑天茹 姜婷婷 张丹丹 车永强

中国标准连续出版物号：

ISSN 1007-9904
CN 37-1258/TM

期刊基本参数：

CN 37-1258/TM*1974*m*A4*96*zh*P* ¥18.00*8000*10*2025-1*n

《山东电力技术》入选 中国科技核心期刊



特约专栏主编简介



郑伟业，华南理工大学电力学院副教授、博士生导师，主要研究电力系统系统调度、综合能源优化和低碳运行等方向。IEEE 高级会员，中国电工技术学会主动配电网及分布式电源专委会委员，中国电机工程学会分布式发电及智能配电专委会专题工作组组员，IEEE PES 智慧楼宇负荷及用户系统技术委员会秘书。Applied Energy、IEEE Systems Journal、《山东电力技术》等多本国内外高水平期刊编委 / 青年编委。主持国家自然科学基金、国家重大科技专项子课题等项目十余项。获高等学校科学研究优秀成果（科学技术）自然科学一等奖（第7）、中国计算机学会 - 腾讯犀牛鸟基金卓创奖、广东电力科学技术奖优秀青年科技人才奖、爱思唯尔全球前 2% 顶尖科学家等荣誉。



仇梦林，中国地质大学（武汉）自动化学院特任教授、博士生导师，湖北省“楚天学者计划”入选者。现任 Applied Energy 青年编委，IET Renewable Power Generation 副编辑及技术委员会成员。主要研究方向包括多能源系统的能量管理、配电市场与配电网弹性运行、多智能体分布式优化等。已发表 SCI/EI 论文 70 余篇，包括 Cell 子刊 1 篇，其中 1 篇入选 ESI 高被引论文；出版英文专著 2 部；参与编写团体标准 1 项。主持国家自然科学基金青年项目、湖北省重点实验室基金项目各 1 项，参与中丹政府间国际科技合作重点专项 1 项，并担任 Work Package Leader，主持和参与多项校企合作项目。



蒯晨晖，清华大学电机系助理研究员，主要从事新能源电力系统调控、主动配电网、电力人工智能等方向的研究工作。入选中国科协青年人才托举工程，曾获北京市科技进步一等奖（2/15）、中国电力企业联合会电力科技创新大奖（特等奖、3/15）。主持智能电网国家重大专项课题、国家自然科学基金等多项科技项目，担任 IEEE 能源互联网协调委员会技术程序主席、IEEE 综合能源系统建模与规划工作组联合召集人、中国电工技术学会主动配电网及分布式电源专委会委员，国际期刊《IET Renewable Power Generation》《Elsevier's e-Prime》《Technology Review for Carbon Neutrality》《中国电力》等期刊编委。

特约主编寄语

在“双碳”目标和新型电力系统构建背景下，新能源在电力系统中的渗透率持续攀升，致使电力系统运行的随机性和波动性日趋严重，对电力系统的供需平衡和稳定性带来了严峻挑战，系统灵活性需求快速增长。我国电力系统灵活性不足的问题已成为制约新能源消纳能力提升的关键因素。因此，提升电力系统的灵活性，已成为我国电力行业亟需解决的重要课题，对实现新能源高效消纳、推动能源结构转型以及保证新型电力系统的安全稳定运行，有着重要的现实意义。本次“新型电力系统灵活性提升关键技术”专栏征稿内容包含新型电力系统灵活性提升的建模技术、配电网阻塞管理技术、无功优化技术、低碳规划与优化调度技术等多个关键技术，对于展示新型电力系统灵活性提升的最新研究进展和发展趋势，解决技术研究和应用中的难题和热点问题有着重要积极意义。衷心希望本专题能够成为相关领域专家学者的交流枢纽，推动技术创新和交流，为我国电力系统灵活性的提升和新能源的高效消纳提供坚实的理论和技術支撑。

目次

面向新型电力系统灵活性提升的建模、规划与运行技术

基于改进边界收缩算法的灵活性资源聚合模型 翁亮涛,王思远,郑伟业,杨 苓,朱继忠(1)

不确定环境下基于动态税和电动汽车时空灵活性的配电网阻塞管理方法
..... 林思瑶,马 晓,贺 坤,王 灿,沈非凡(12)

基于改进遗传算法的交直流混联电网的无功优化方法 雷宇立,周承君,幸爱玲,牛 涛,方斯顿(28)

计及负荷运行风险的电氢热耦合微电网区域零碳优化调度技术
..... 邢家维,程 艳,孙树敏,杨 颂,王玥娇(38)

源网荷储协调互动

基于“分级-协同”思想的分布式光伏柔性参与电网调峰技术研究及应用
..... 张 强,李 娜,蔺晨晖,吴继平,张文栋,刘宏雷(46)

基于深度强化学习的空气源热泵供热系统温度控制策略 刘 伟,高 嵩,宋宗勋,许晓康,刘 萌(54)

考虑火力发电深度调峰的高渗透率新能源电力系统优化调度
..... 刘 科,张利孟,孟令彤,刘恩生,王 太,宋文浩(62)

输变电

邻近变电站终端塔级联接地降阻策略研究 毛惠卿,高 涛,张建伟,张 凯,穆明亮,田海鹏(72)

非晶合金变压器出口短路状态下绕组温度分布特性研究 刘兴华,李 飞,赵彦龙,咸日常,陈 磊(81)

基于回归分析的人体工频电场畸变影响分析预测研究 巩泉泉,杨柳倩,侯 琛,李 奎,张兆波(89)

CONTENTS

•Modelling, Planning and Operational Technology for Enhancing Flexibility of New Power System•

Flexibility Resource Aggregation Model Based on Improved Boundary Shrinkage Algorithm

..... WENG Liangtao, WANG Siyuan, ZHENG Weiye, YANG Ling, ZHU Jizhong(1)

Distribution Networks Congestion Management Based on Dynamic Tariff and Temporal-spatial Flexibility of

Electric Vehicles Under Uncertainty LIN Siyao, MA Xiao, HE Kun, WANG Can, SHEN Feifan(12)

Reactive Power Optimization Method for AC/DC Hybrid Power Grids Based on Improved Genetic Algorithms

..... LEI Yuli, ZHOU Chengjun, XING Ailing, NIU Tao, FANG Sidun(28)

Zero Carbon Optimization Scheduling Technology for Electric Hydrogen Thermal Coupling Microgrid Regions

Considering Load Operation Risks ... XING Jiawei, CHENG Yan, SUN Shumin, YANG Song, WANG Yuejiao(38)

•Source-Grid-Load-storage Coordinated Interaction•

Research and Application of Distributed Photovoltaic Flexible Participation in Power Grid Peak Shaving Technology

Based on the Concept of Grading and Collaboration

..... ZHANG Qiang, LI Na, LIN Chenhui, WU Jiping, ZHANG Wendong, LIU Honglei(46)

Temperature Control Strategy for Air Source Heat Pump Heating System Based on Deep Reinforcement

Learning LIU Wei, GAO Song, SONG Zongxun, XU Xiaokang, LIU Meng(54)

Optimal Scheduling of Power System With New Energy High Penetration and Deep Peak Regulation of Thermal

Power Units..... LIU Ke, ZHANG Limeng, MENG Lingtong, LIU Ensheng, WANG Tai, SONG Wenhao(62)

•Power Transmission and Transformation•

Research on Resistance Reduction Strategy of Terminal Tower-level Connection Ground in Adjacent Substation

..... MAO Huiqing, GAO Tao, ZHANG Jianwei, ZHANG Kai, MU Mingliang, TIAN Haipeng(72)

Research on Temperature Distribution of Outlet Short-circuit Hot Spots in Amorphous Alloy Transformer Winding

..... LIU Xinghua, LI Fei, ZHAO Yanlong, XIAN Richang, CHEN Lei(81)

Research on Analysis and Prediction of Distortion Phenomena of Power Frequency Electric Field Around Human Body

Based on Regression Analysis GONG Quanquan, YANG Liuqian, HOU Chen, LI Xi, ZHANG Zhaobo(89)

SHANDONG ELECTRIC POWER

(Monthly, Started in 1974)

Administration State Grid Shandong Electric Power Company**Sponsor** State Grid Shandong Electric Power Company**Edited by** Editorial Department of Shandong Electric Power**Chief Editor** WU Wenchuan MENG Yu**Address** No.2000, Wangyue Road, Jinan, China 250003

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.001

·新型电力系统灵活性提升关键技术·

基于改进边界收缩算法的灵活性资源聚合模型

翁亮涛^{1,2}, 王思远³, 郑伟业^{1*}, 杨 苓², 朱继忠¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006;

3. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:在需求侧, 调控储能、电动汽车等灵活性资源是提高配电系统灵活性的重要手段。为更准确地刻画灵活性资源集群的聚合灵活性, 提出基于改进边界收缩算法的灵活性聚合方法。首先将灵活性资源刻画为等效储能模型, 随后采用基于高维多面体的边界收缩算法来求解聚合等效模型的参数; 在此基础上, 通过调节等效储能模型的自放电系数来调节聚合等效模型外接多面体多个超平面的斜率, 从而改变收缩后内近似投影多面体的形状; 接着采用蒙特卡洛模拟法对原始聚合可行域进行采样, 并计算聚合等效模型可行轨迹的样本覆盖率, 将其作为方法近似效果的评估指标; 最后, 基于粒子群算法寻找模型具有最大内近似投影多面体时的自放电系数, 从而获得等效储能的最优参数。算例结果表明, 相比原方法, 改进后的边界收缩算法能覆盖到更大的可行域空间, 近似精度提高了13.54%, 结果具有更低的保守性。

关键词:灵活性资源; 灵活性聚合; 等效储能; 改进边界收缩算法

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)01-0001-11

Flexibility Resource Aggregation Model Based on Improved Boundary Shrinkage Algorithm

WENG Liangtao^{1,2}, WANG Siyuan³, ZHENG Weiye^{1*}, YANG Ling², ZHU Jizhong¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: On the demand side, regulation of energy storage, electric vehicles and other types of flexibility resources is an important regulator for improving the flexibility of the distribution system. In order to more accurately portray the aggregation flexibility of flexibility resource clusters, a flexibility aggregation method based on an improved boundary contraction algorithm is proposed. The flexibility resources are first inscribed into a equivalent energy storage model, followed by a boundary contraction algorithm based on high-dimensional polyhedral to solve the parameters of the aggregate equivalent model. On this basis, by adjusting the self-discharge coefficient of the equivalent energy storage model, the slopes of several hyperplanes of the external polyhedron of the polymerized equivalent model are made adjustable, thus changing the shape of the contracted internally connected polyhedron. Monte Carlo simulation is then used to sample the original aggregated feasible domains and calculate the sample coverage of the feasible trajectories of the aggregated equivalent model, which is used as an assessment of the effectiveness of the approximation. Finally, particle swarm optimization algorithm is used to find the self-discharge coefficients when the model has a maximum internally connected polyhedron, thus obtaining the optimal parameters for the equivalent energy storage. Example results show that the improved boundary contraction algorithm coverages to a larger space of feasible domains and improves the approximation accuracy by 13.54% compared to the original method, and the results have a lower conservatism.

Keywords: flexibility resources; flexibility aggregation; equivalent energy storage; improved boundary shrinkage algorithm

基金项目:国家自然科学基金(52107094); 新型电力系统运行与控制国家重点实验室开放基金课题(SKLD24KM04)。

National Natural Science Foundation of China (52107094); Open Fund of State Key Laboratory of Power System Operation and Control (SKLD24KM04).

0 引言

随着新能源的大规模并网,我国电力系统灵活性需求快速增加,存在新能源消纳难题^[1]。在需求侧,电动汽车、储能装置、温控负荷、暖通空调等灵活性资源作为新型电力系统的重要灵活性来源,可以给用户和电网带来经济收益^[2]。因此,需求侧灵活性已成为近年来的研究热点^[3-4]。

灵活性资源可行域聚合的本质为闵可夫斯基求和,其计算复杂度随资源设备数量增加呈指数型增长^[5]。为降低其计算复杂度,大多数文献采用了近似的方法。目前对可行域近似处理的聚合方法主要有两类:单个可行域近似线性求和方法^[6-7];整体可行域近似求解方法,如等效发电机模型和等效储能模型^[8-9]。后者适用于资源分布发散、类型较多、容量较大的场景。其中等效储能模型通常被用于聚合储能装置或柔性负荷等灵活性资源^[10-13]。等效储能模型是使用理想电池的功率和能量约束来描述灵活性资源的聚合灵活性区域。由于等效储能近似属于内近似聚合方法,而内近似方法可以确保分解的可行性,但会牺牲不同程度的灵活性^[14]。因此基于等效储能模型的整体近似求解方法的关键在于对模型进行精细参数化,以在确保分解可行性的同时刻画出尽可能大的灵活性区域。

目前已有学者提出了不同的方法来确定等效储能参数^[15-24]。文献[15]建立了聚合虚拟电池模型来处理暖通空调的异构性,并使用参数叠加法通过一定的规则对暖通空调的参数进行叠加从而获取虚拟电池的参数。文献[16]将温控负荷集群的总体灵活性建模为具有耗散的虚拟电池,并根据温控负荷的参数和环境温度等随机外生变量来表征该电池模型的功率限制和能量容量,利用固定分解比法来确定电池参数。文献[17]使用虚拟电池模型对配电网中的分布式灵活性资源进行聚合,同时基于闵可夫斯基和约束空间叠加法来获取可调节聚合功率域。文献[18]通过一个通用虚拟电池模型对温控负荷进行建模,使聚合可行域可按一定规则线性求和得到,并利用闵可夫斯基法计算集群的聚合灵活性。文献[19]提出一种增强的充分电池模型用于改进温控负

荷集群的总体灵活性的内部近似,并开发了一种二分搜索算法来计算电池模型的参数。文献[20]假设电动汽车集群的效率参数相同,采用极端能量场景方法建立通用虚拟电池模型用于刻画电动汽车集群的灵活性。但对于效率参数不同的电动汽车集群,该文献基于虚拟电池模型的优化问题求解结果存在误差,具有局限性^[21]。文献[22]不考虑等效储能能量随时间变化的损失,提出一种基于高维多面体的边界收缩算法来求解等效储能模型的参数。但其收缩过程是在保持近似多面体超平面斜率不变的情况下逐步向内收缩的,而理想等效储能模型对应的外接多面体的形状与真实投影多面体可能差别较大,这将使得收缩后的内近似投影多面体偏小,造成聚合可行域空间的损失。

上述文献中的等效储能模型没有完全优化,这可能会大大低估总体灵活性。对此,文献[23]基于优化的算法,使用相对于原型集的同调的最大内部近似和最小外部近似来近似恒温控制负载集群的总体灵活性,并选择原型集作为虚拟电池模型,通过等效线性规划问题有效地求解相应的最优近似,从而获得更多的灵活性。文献[24]对虚拟电池的功率和能量参数进行优化,以扩大其灵活性区域,通过具有决策相关不确定性的鲁棒优化问题来确定最佳虚拟电池,并提出一种基于 Benders 分解的算法来解该优化问题。但是该虚拟电池模型没有考虑自放电系数,忽视了虚拟电池能量随时间变化的损失,使得聚合模型较为理想。

针对上述问题,以储能装置和电动汽车充电桩这两种典型的灵活性资源为例,对其可行域聚合问题进行研究,提出了一种基于改进边界收缩算法的灵活性聚合方法,主要贡献如下:1)将灵活性资源的总体功率可行域聚合为等效储能的形式,并采用文献[22]的边界收缩算法求解等效储能模型的参数。2)通过调节等效储能的自放电系数来改变近似多面体的体积,从而灵活调整近似精度,并对系统灵活性可行域进行采样后计算聚合等效模型可行轨迹的样本覆盖率,将其作为近似效果的评估指标。3)为进一步释放灵活性资源的潜在灵活性、扩大总体可行区域,根据自放电系数与样本覆盖率间的关系,使用

粒子群算法整定了最优自放电系数,使模型具有最佳的近似效果,由此获得等效储能的最优参数。该聚合优化方法可推广至其他类多能灵活性资源,如气网、热网等,具有很高的适配性。

1 灵活性资源聚合模型

1.1 灵活性资源模型

给定离散时间范围 $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, T\}$, 本文考虑两种典型的灵活性资源: 储能装置、电动汽车充电桩。相关的灵活性资源运行模型建立如下。

1.1.1 储能装置

储能装置的数学模型为:

$$p_{i,t}^{\text{es}} \leq p_{i,t}^{\text{es}} \leq \bar{p}_{i,t}^{\text{es}} \quad (1)$$

$$E_{i,t}^{\text{es}} = \kappa_i \cdot E_{i,t-1}^{\text{es}} - \Delta t \cdot p_{i,t}^{\text{es}} \quad (2)$$

$$\underline{E}_i^{\text{es}} \leq E_{i,t}^{\text{es}} \leq \bar{E}_i^{\text{es}}, E_{i,T}^{\text{es}} = E_{i,0}^{\text{es}} \quad (3)$$

式中: $p_{i,t}^{\text{es}}$ 为 t 时刻第 i 台储能装置的输出有功功率, 定义放电功率为正, 充电功率为负; $E_{i,t}^{\text{es}}$ 为 t 时刻第 i 台储能装置的能量; $\kappa_i \in (0, 1]$ 为第 i 台储能装置的自放电系数, 模拟其能量随时间变化的损失; $\bar{p}_{i,t}^{\text{es}}, \underline{p}_{i,t}^{\text{es}}$ 分别为 t 时刻第 i 台储能装置输出有功功率的上限和下限; $\bar{E}_i^{\text{es}}, \underline{E}_i^{\text{es}}$ 分别为 t 时刻第 i 台储能装置能量的上限和下限; $E_{i,0}^{\text{es}}, E_{i,T}^{\text{es}}$ 分别为初始时刻和调度最后时刻 T 第 i 台储能装置的能量; Δt 为时间间隔。为了平衡模型精度和计算效率, 在构建储能模型式(1)一式(3)时将储能的充放电效率近似为 100%。

1.1.2 电动汽车充电桩

电动汽车充电桩的模型可被建模为一个可延迟负荷模型^[25], 即为:

$$p_{i,t}^{\text{ev}} \leq p_{i,t}^{\text{ev}} \leq \bar{p}_{i,t}^{\text{ev}} \quad (4)$$

$$\underline{E}_i^{\text{ev}} \leq \sum_t (p_{i,t}^{\text{ev}} \cdot \Delta t) \leq \bar{E}_i^{\text{ev}} \quad (5)$$

式中: $p_{i,t}^{\text{ev}}$ 为 t 时刻第 i 个电动汽车的充电功率; $\bar{p}_{i,t}^{\text{ev}}, \underline{p}_{i,t}^{\text{ev}}$ 分别为 t 时刻第 i 个电动汽车的充电功率上限和下限; $\bar{E}_i^{\text{ev}}, \underline{E}_i^{\text{ev}}$ 分别为第 i 个电动汽车的最大和最小充电需求电量。

1.2 灵活性聚合模型

对一个包含储能装置和电动汽车充电桩的灵活

性资源集群进行聚合, 其有功功率为

$$p_t^{\text{B}} = \mathbf{E}_t^{\text{B}} \mathbf{x}_t^{\text{B}} + \mathbf{e}_t^{\text{B}} \quad (6)$$

式中: p_t^{B} 为 t 时刻的聚合有功功率; $\mathbf{x}_t^{\text{B}}$ 为 t 时刻分布式能源的有功功率向量; $\mathbf{E}_t^{\text{B}}$ 为 t 时刻系统参数向量; $\mathbf{e}_t^{\text{B}}$ 为 t 时刻系统参数。

式(1)一式(6)表示了系统中大量灵活性资源的灵活性可行域, 可写为如下紧凑的矩阵形式。

$$\Omega_1^{\text{B}} = \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{x}^{\text{B}} \\ \mathbf{p}^{\text{B}} \end{bmatrix} \middle| \begin{matrix} \mathbf{D}^{\text{B}} \mathbf{x}^{\text{B}} \leq \mathbf{d}^{\text{B}}, \\ \mathbf{p}^{\text{B}} = \mathbf{E}^{\text{B}} \mathbf{x}^{\text{B}} + \mathbf{e}^{\text{B}} \end{matrix} \right\} \quad (7)$$

式中: Ω_1^{B} 为系统中灵活性资源的灵活性可行域; $\mathbf{x}^{\text{B}}$ 为分布式能源的有功功率矩阵; $\mathbf{p}^{\text{B}}$ 为聚合有功功率向量; $\mathbf{D}^{\text{B}}$ 和 $\mathbf{d}^{\text{B}}$ 均为参数矩阵, 表示全体灵活性资源运行可行域, 可由式(1)一式(5)整理得到; $\mathbf{E}^{\text{B}}$ 和 $\mathbf{e}^{\text{B}}$ 均为参数矩阵, 可由式(6)得到。

从约束条件的几何意义来看, 式(7)所表述的大量灵活性资源的灵活性可行域可以表示为一个高维多面体的形式。需要计算的聚合结果是由公共耦合点处各时刻的有功功率所构成的较低维度的灵活性可行域, 记作 Ω_2^{B} 。灵活性资源的聚合可以看成是原始高维多面体 Ω_1^{B} 投影至公共耦合点处各时刻的有功功率所张成的较低维空间, 形成投影多面体 Ω_2^{B} 的过程, 如图 1 所示。投影多面体 Ω_2^{B} 的表达式为

$$\Omega_2^{\text{B}} = \{ \mathbf{p}^{\text{B}} \mid \mathbf{C}^{\text{B}*} \mathbf{p}^{\text{B}} \leq \mathbf{c}^{\text{B}*} \} \quad (8)$$

式中: 矩阵 $\mathbf{C}^{\text{B}*}$ 和向量 $\mathbf{c}^{\text{B}*}$ 均为投影多面体 Ω_2^{B} 的参数。

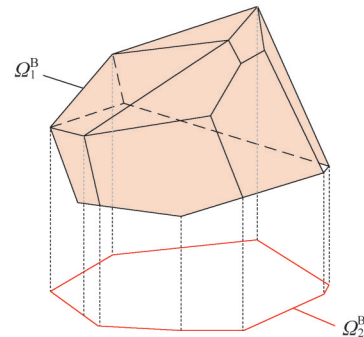


图1 高维多面体投影示意图

Fig.1 Schematic of the high dimensional polyhedral projection

然而, 由于投影多面体所在的空间由公共耦合

点处各时刻的有功功率所张成,该投影多面体仍具有较高的维数。计算精确的高维多面体投影问题的复杂度超越指数级,难以求解 $\mathbf{C}^{B*}$ 和 $\mathbf{c}^{B*}$ 的精确值。由于储能设备和电动汽车充电桩的技术约束条件均由功率约束、时间耦合能量约束条件所构成,因此在聚合后仍然体现相似的性质。因此,可以采用等效储能的表达式作为形状模板来近似投影多面体的形状。

上述灵活性资源聚合的集群仍然具有储能特性,因此等效储能的功率可行区域可以通过每个时间段的能量上限和下限 ($\bar{E}_t^B$ 和 $\underline{E}_t^B$) 与功率上限和下限 ($\bar{p}_t^B$ 和 $\underline{p}_t^B$) 参数来描述,如式(9)所示。

$$\Omega^B = \left\{ \mathbf{p}^B \left| \begin{array}{l} \underline{p}_t^B \leq p_t^B \leq \bar{p}_t^B \\ \underline{E}_t^B \leq \sum_{\tau=1}^t (\mu^{t-\tau} \cdot p_\tau^B \cdot \Delta t) \leq \bar{E}_t^B \end{array} \right. \forall t \in \mathcal{T} \right\} \quad (9)$$

式中: $\mu^{t-\tau}$ 为 $t-\tau$ 时刻等效储能的自放电系数,取值范围为 $(0, 1]$, 用于模拟等效储能的能量随时间变化的损失,其具体值可以利用后续 3.2 小节的方法进行计算。

式(9)中的 Ω^B 表达式可以整理为紧凑形式,即为

$$\Omega^B = \{ \mathbf{p}^B \mid \mathbf{C}^B \mathbf{p}^B \leq \mathbf{c}^B \} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{C}^B$ 为常数矩阵,如(11)所示; $\mathbf{c}^B$ 为由式(13)中的关键参数组成的向量,其精确值可以利用第2节的多面体边界收缩算法进行计算。

$$\mathbf{C}^B = [\mathbf{I}_T - \mathbf{I}_T \mathbf{V}^T - \mathbf{V}^T]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{V} = \Delta t \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \mu & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \mu^2 & \mu & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu^{T-1} & \mu^{T-2} & \mu^{T-3} & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{T \times T} \quad (12)$$

$$\mathbf{c}^B = \left[(\bar{\mathbf{p}}^B)^T \quad -(\underline{\mathbf{p}}^B)^T \quad (\bar{\mathbf{E}}^B)^T \quad -(\underline{\mathbf{E}}^B)^T \right]^T \quad (13)$$

式中: $\mathbf{I}_T$ 为 T 维单位矩阵; $\mathbf{V}^T$ 为代换变量矩阵 $\mathbf{V}$ 的转置矩阵。

2 边界收缩算法求取模型参数

由于外近似可能包含不可行点,为在保证分解可行性的同时获得最大的聚合范围,1.2 节中的等

效储能应对应一个内接于原始投影区域的多面体,即有 $\Omega^B \subseteq \Omega_2^B$ 。这样对于任一个聚合有功功率调度指令 $\mathbf{p}^{B*}$, 都能满足 $\mathbf{p}^{B*} \subseteq \Omega_1^B$, 即在原始多面体 Ω_1^B 中都能找到与之对应的决策变量的可行解,从而实现调度指令的解聚合。本文利用文献[22]所提出的高维多面体投影及边界收缩算法来计算内近似投影多面体参数,实现对灵活性聚合模型的求解。该方法先计算一个外接于投影多面体 Ω_2^B 的多面体,然后在迭代的过程中保持超平面 $\mathbf{C}^B$ 的斜率不变而不断调整截距 $\mathbf{c}^B$, 使该多面体的边界不断收缩并最终内接于投影多面体 Ω_2^B 。在这一过程中,保持约束类型不变,但调整参数以保证对调度指令解聚合的可行性。

边界收缩过程和算法的流程分别如图2和图3所示。其中,步骤1)为求第一阶段最坏轨迹 $\mathbf{p}_{(0)}^B$, 其

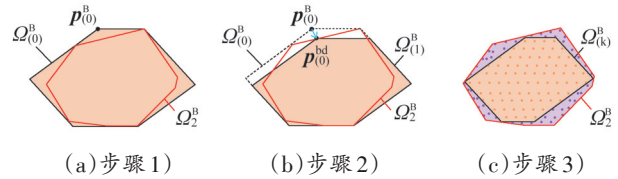


图2 边界收缩过程

Fig.2 The boundary contraction process

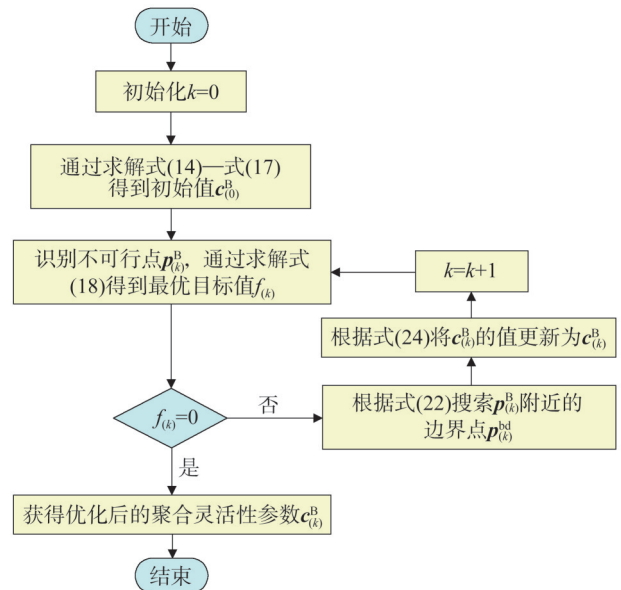


图3 边界收缩算法流程

Fig.3 Flowchart of the boundary shrinkage algorithm

对应多面体的极值点 $\Omega_{(0)}^B$;步骤2)为找到最近的边界点 $p_{(0)}^{bd}$ 并缩小边界得到 $\Omega_{(1)}^B$;步骤3)为经 k 次收缩后最终得到内接于投影多面体 Ω_2^B 的多面体 $\Omega_{(k)}^B$ 。具体收缩过程如2.1—2.3节所示。

2.1 获取外接多面体

首先,分别求解式(14)一式(17)即每个调度时段的线性最大或最小优化问题以获得等效储能参数初始值 $c_{(0)}^B$,从而得到外接于式(8)的多面体 $\Omega_{(0)}^B$ 。

$$\bar{p}_{t,(0)}^B = \left\{ \max p_t^B \mid (\mathbf{x}^B, \mathbf{p}^B) \in \Omega_1^B \right\} \quad (14)$$

$$\underline{p}_{t,(0)}^B = \left\{ \min p_t^B \mid (\mathbf{x}^B, \mathbf{p}^B) \in \Omega_1^B \right\} \quad (15)$$

$$\bar{E}_{t,(0)}^B = \left\{ \max \sum_{\tau=1}^t (\mu^{t-\tau} \cdot p_{\tau}^B \cdot \Delta t) \mid (\mathbf{x}^B, \mathbf{p}^B) \in \Omega_1^B \right\} \quad (16)$$

$$\underline{E}_{t,(0)}^B = \left\{ \min \sum_{\tau=1}^t (\mu^{t-\tau} \cdot p_{\tau}^B \cdot \Delta t) \mid (\mathbf{x}^B, \mathbf{p}^B) \in \Omega_1^B \right\} \quad (17)$$

2.2 搜索不可行点

随后,需要寻找一个位于式(10)区域内但不在式(8)区域内的不可行点 $\mathbf{p}_{(k)}^B$ 。其可通过求解下述优化问题找到,当近似的投影可行域 $\Omega_{(k)}^B$ 中存在一个无法通过调整 $\mathbf{x}^B$ 来解聚合的运行点 $\mathbf{p}_{(k)}^B$ 时,该优化问题第二阶段最大化问题不可行,最优值为 $-\infty$,需要继续执行后续步骤对近似多面体进行边界收缩;反之,最优值为0,表示近似的投影多面体已经完全位于真实投影多面体的内部,输出当前迭代的计算结果作为最终计算结果。

$$f_{(k)}(\mathbf{c}_{(k)}^B) = \min_{\mathbf{p}^B} \max_{\mathbf{x}^B} 0 \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{C}^B \mathbf{p}^B \leq \mathbf{c}_{(k)}^B \quad (19)$$

$$\mathbf{D}^B \mathbf{x}^B \leq \mathbf{d}^B \quad (20)$$

$$\mathbf{p}^B = \mathbf{E}^B \mathbf{x}^B + \mathbf{e}^B \quad (21)$$

式中: k 为迭代次数。

式(18)一式(21)为 min-max 问题,使用对偶方法,可以将该问题转化为一个双线性规划问题,即为:

$$\min_{\mathbf{p}^B, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\varphi}} \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{d}^B - \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{e}^B + \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{p}^B \quad (22)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{C}^B \mathbf{p}^B \leq \mathbf{c}_{(k)}^B \quad (23)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{D}^B + \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{E}^B = \mathbf{Z}_e \quad (24)$$

$$\boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{Z}_e \quad (25)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}$ 和 $\boldsymbol{\varphi}$ 分别是约束条件式(20)、式(21)所对应

的对偶变量向量; $\mathbf{Z}_e$ 为全零矩阵。

由于式(22)中双线性项 $\boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{p}^B$ 的存在导致模型求解过程复杂,可以利用卡罗需-库恩-塔克条件(Karush-Kuhn-Tucker conditions, KKT)将其转化为等效的优化模型,同时将互补松弛条件转换为混合整数线性规划模型,具体形式为:

$$\min_{\mathbf{p}^B, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\varphi}, \omega, s} \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{d}^B - \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{e}^B - \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{c}_{(k)}^B \quad (26)$$

$$\text{s.t. } \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{C}^B + \boldsymbol{\varphi}^T = \mathbf{Z}_e \quad (27)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{D}^B + \boldsymbol{\varphi}^T \mathbf{E}^B = \mathbf{Z}_e \quad (28)$$

$$\boldsymbol{\lambda} \geq \mathbf{Z}_e \quad (29)$$

$$\mathbf{Z}_e \leq \mathbf{c}_{(k)}^B - \mathbf{C}^B \mathbf{p}^B \leq M(\mathbf{g}_n - \mathbf{s}) \quad (30)$$

$$\mathbf{Z}_e \leq \boldsymbol{\omega} \leq M\mathbf{s} \quad (31)$$

$$\mathbf{W}\mathbf{s} \leq \mathbf{g}_n \quad (32)$$

$$\mathbf{g}_n^T \mathbf{s} \geq T \quad (33)$$

$$\mathbf{s} \in \{0, 1\}^n \quad (34)$$

式中: n 为 $\mathbf{c}^B$ 的长度; $\boldsymbol{\omega}$ 为式(23)的对偶变量向量; M 为一个足够大的常数; $\mathbf{s}$ 为元素数值为0或1的 n 维列向量; $\mathbf{W}$ 为参数向量,如式(35)所示; $\mathbf{g}_n$ 为元素数值均为1的 n 维列向量。由物理意义可知,式(32)和式(33)为切面以加速模型的求解。当 $s=1$ 时,约束式(19)的第 i 列是起作用的。式(32)保证了式(19)的上下限约束不可能同时起作用。式(33)确保极值点位于 T 维多面体中至少 T 个超平面的交点处。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_T & \mathbf{I}_T & \mathbf{Z}_e & \mathbf{Z}_e \\ \mathbf{Z}_e & \mathbf{Z}_e & \mathbf{I}_{T-1} & \mathbf{I}_{T-1} \end{bmatrix} \quad (35)$$

2.3 修改参数

通过计算优化问题式(26)一式(34),可以找到一个解聚合不可行的最坏轨迹 $\mathbf{p}_{(k)}^B$,其对应于多面体 $\Omega_{(k)}^B$ 的一个极值点。修改参数 $\mathbf{c}_{(k)}^B$ 以收缩多面体 $\Omega_{(k)}^B$ 的边界并排除不可行的点 $\mathbf{p}_{(k)}^B$,如图2(b)所示。首先,通过求解式(36)一式(37)的优化问题,找到 Ω_2^B 边界上离点 $\mathbf{p}_{(k)}^B$ 最近的点 $\mathbf{p}_{(k)}^{bd}$ 。

$$\mathbf{p}_{(k)}^{bd} = \underset{\mathbf{p}^B}{\operatorname{argmin}} \left\| \mathbf{p}_{(k)}^B - \mathbf{p}^B \right\| \quad (36)$$

$$\text{s.t. } (\mathbf{x}^B, \mathbf{p}^B) \in \Omega_1^B \quad (37)$$

接着,寻找极点 $\mathbf{p}_{(k)}^B$ 的所有起作用约束,并将其行索引的集合 $\mathcal{I}_{(k)}^B$ 表示为

$$\mathcal{I}_{(k)}^B = \left\{ j \in \mathbb{Z} \mid s_j = 1, 1 \leq j \leq n \right\} \quad (38)$$

式中: s_j 为式(34)中变量 s 的第 j 个元素的最优值; $\mathcal{Z}$ 为满足 $1 \leq j \leq n$ 且 s_j 为 1 时由 j 的取值组成的集合。

最后,通过求解式(39)一式(42)调整 $(c_{(k)}^B)_j$ 使 $p_{(k)}^{\text{bd}}$ 成为多面体 $\Omega_{(k+1)}^B$ 的新极值点为:

$$c_{(k+1)}^B = \underset{c^B}{\operatorname{argmax}} g_n^T c^B \quad (39)$$

$$\text{s.t.} \quad c^B \leq c_{(k)}^B \quad (40)$$

$$(C^B)_j p_{(k)}^{\text{bd}} \geq (c^B)_j - M(1 - z_j), \forall i \in \mathcal{I}_{(k)}^B \quad (41)$$

$$h_j^T z \geq T, z \in \{0, 1\}^J \quad (42)$$

式中: J 为集合 $\mathcal{I}_{(k)}^B$ 中元素的个数; h_j 为元素数值均为 1 的 J 维列向量。式(40)的作用是保证 $\Omega_{(k+1)}^B \subseteq \Omega_{(k)}^B$ 恒成立,即每一次迭代过程中多面体的边界都被收缩。式(41)和式(42)表示 $p_{(k)}^{\text{bd}}$ 至少位于 $\Omega_{(k+1)}^B$ 的 T 个超平面的交点上,从而保证其为 $\Omega_{(k+1)}^B$ 的极值点。在获得 $c_{(k+1)}^B$ 后,返回 2.2 小节,进入第 $(k+1)$ 次迭代。

3 改进的边界收缩算法

第 2 节所展示的高维多面体边界收缩算法的核心思路是保持近似的投影多面体可行域各个超平面斜率恒定,将各面逐步向内收缩。然而,这种收缩方式可能导致最终形成的内近似投影多面体体积并非最优的结果,原因在于收缩过程中近似多面体各个超平面的斜率是固定的。为了进一步提升近似精度,可以在收缩之前调整外接多面体的形状,具体做法是通过有效改变外接多面体多个超平面的斜率,使得收缩后的内近似投影多面体尽可能大,从而减少灵活性的损失。

由式(10)可知,等效储能的灵活性多面体的超平面斜率对应为 C^B , C^B 由等效储能的功率和能量系数矩阵组成,其中能量系数矩阵对应为与等效储能的自放电系数相关的矩阵,自放电系数是用于模拟等效储能的能量随时间变化的损失,并且具有解聚合可行性。文献[22]的等效储能模型中未考虑等效储能的能量随时间变化的损失,即把自放电系数取为 1 来建模,所以外接多面体各个超平面的斜率是固定的。实际上,通过引入等效储能的自放电系数,可以使模型更加贴近灵活性设备的特性。此外,通过调节自放电系数,可以改变等效储能模型的外接

多面体多个超平面的斜率,从而最大化内近似投影多面体的体积,获得更大的聚合灵活性可行域。

基于上述思路,提出一种改进的边界收缩算法。这一算法的关键在于通过调节等效储能的自放电系数来调整外接多面体多个超平面的斜率。收缩过程使用了第 2 节所描述的多面体边界收缩算法。此外,使用基于蒙特卡洛模拟的样本覆盖率法来检验方法的近似精度,最后利用自放电系数与近似精度两者间的关系,基于粒子群算法整定最优的自放电系数,从而使得等效储能模型能得到更精确的结果。

3.1 计算样本覆盖率

为探究不同等效储能自放电系数下近似效果的差异,可采用比较聚合高维多面体体积的方式进行分析。然而,高维多面体的体积往往难以进行直接计算。因此,使用基于蒙特卡罗模拟的样本覆盖率来检验方法的近似精度。

通过蒙特卡洛模拟在系统的功率可调节范围均匀抽样,生成 1 000 000 个能由灵活性资源设备成功解聚合的随机功率轨迹,这些轨迹与原始可行域内的所有样本点一一对应,构成了评估系统灵活性的基础数据集,如图 2(c)所示。由于灵活性的评价结果是通过内近似得到的,因此有一些样本位于内近似投影多面体之外,对应的轨迹被认为解聚合不可行。通过测试可行轨迹的样本覆盖率,可以分析不同等效储能的自放电系数下模型的聚合效果以及方法的保守性。

图 4 给出了采用最优自放电系数时的边界收缩过程。对比图 2(c)与图 4(c)可知,通过合理调整自放电系数,可以有效扩大内近似投影多面体的体积,从而覆盖更多可能的功率轨迹场景。

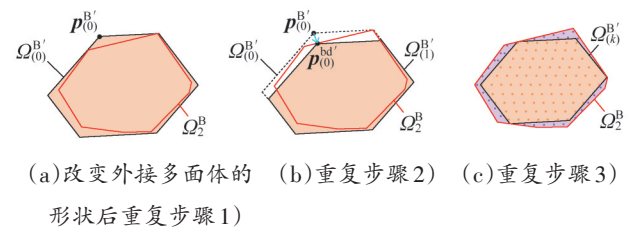


图 4 采用最优自放电系数时的边界收缩过程

Fig.4 The boundary contraction process when using the optimal self-discharge coefficient

3.2 设计最优等效储能参数

由前文分析可知,在不同自放电系数下,聚合等效储能模型具有不同的近似精度即不同的样本覆盖率,因此通过寻找最优自放电系数,可以获得最高样本覆盖率,使得聚合等效模型能刻画出更精确的灵活性区域。

本节的研究目的是基于粒子群算法设计在达到最高样本覆盖率时的自放电系数,因此,以样本覆盖率关于自放电系数的表达式为适应度值函数 $g(\mu)$,适应度值越大说明该参数的适应度越高,样本覆盖率越高。但在由自放电系数计算样本覆盖率的过程中,需要在求解边界收缩算法中的多个优化问题及检验方法近似精度时判断随机功率轨迹是否可行的问题,这使得样本覆盖率与自放电系数之间的函数关系较为复杂,难以直接给出具体的表达式。因此本文在此简单介绍由自放电系数计算样本覆盖率的过程:先利用参数 μ 通过求解式(13)一式(17)得到初始值 $c_{(0)}^b$,接着利用边界收缩算法获取等效储能参数,再通过蒙特卡洛模拟计算样本覆盖率。具体过程见 2.1—3.1 节。

基于粒子群算法整定最优自放电系数的流程如图 5 所示,具体步骤如下。

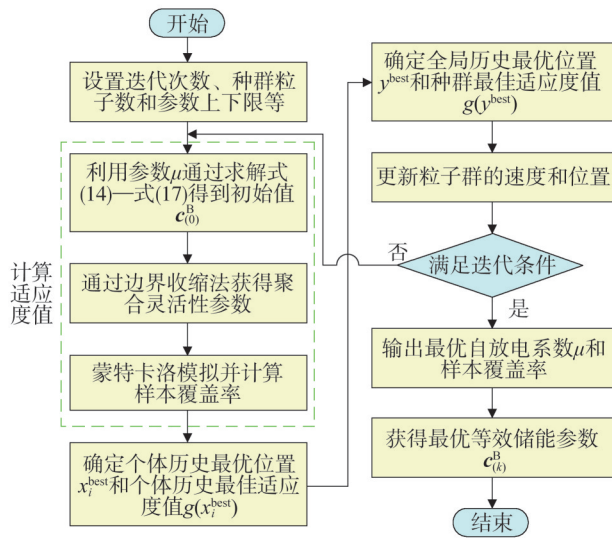


图5 粒子群算法流程

Fig.5 Particle swarm optimization algorithm flowchart

步骤 1) 给定初始化条件。设置粒子群个数、速

度惯性权重 w 、迭代次数、各个粒子的位置边界范围与速度边界范围,并随机产生各个粒子的初始位置和初始速度;

步骤 2) 由适应度值函数 $g(\mu)$ 计算粒子的适应度,确定第 m 个粒子的个体历史最优位置 x_m^{best} 、个体历史最佳适应度值 $g(x_m^{best})$ 、全局历史最优位置 y^{best} 、种群历史最佳适应度值 $g(y^{best})$;

步骤 3) 利用速度更新式(43)和位置更新式(44)分别对粒子群的速度和位置进行更新;

$$v_m(q+1) = w \cdot v_m(q) + c_1 r_1 [x_m^{best} - x_i(q)] + c_2 r_2 [y^{best} - x_m(q)] \quad (43)$$

$$x_m(q+1) = x_m(q) + v_m(q+1) \quad (44)$$

式中: $v_m(q)$ 、 $v_m(q+1)$ 分别为第 m 个粒子在第 q 次和第 $q+1$ 次迭代时的速度; $x_m(q)$ 、 $x_m(q+1)$ 分别为第 m 个粒子在第 q 次和第 $q+1$ 次迭代时的位置; c_1 、 c_2 分别为个体学习因子和社会学习因子,两者共同作用,使得粒子能够借鉴个体自身和群体的搜索经验不断向最优取值靠近,体现了粒子群算法较好的寻优能力; r_1 、 r_2 为两个位于 $[0,1]$ 范围内的随机数。

步骤 4) 根据 $g(\mu)$ 计算更新后种群粒子的适应度值,并根据适应度值的大小更新 x_m^{best} 和 $g(x_m^{best})$ 、 y^{best} 和 $g(y^{best})$;

步骤 5) 重复步骤 3) 和步骤 4), 当迭代次数符合设定要求时,跳出循环,输出最优自放电系数和对应的样本覆盖率,从而获得最优等效储能模型参数。

4 算例分析

通过算例测试以验证所提出模型和算法的有效性。算例采用的灵活性资源包括一台储能设备和一个电动汽车充电桩,储能装置的最大、最小充电功率分别为 0.018 MW、-0.018 MW,容量为 0.08 MWh,最大、最小荷电状态分别为 0.9、0.2,初始荷电状态为 0.5,自放电系数为 0.98。设定电动汽车集群到达时刻为早上 05:00,到达后立即充电,且需在中午 12:00 完成充电,最大、最小充电功率设置为 0.02 MW 和 0,要求的最大、最小充电能量分别为 0.12 MWh 和 0.01 MWh。调度周期取为 7 h, Δt

为1 h。3.2 小节的单变量粒子群算法优化问题中,为了平衡算法的收敛速度和搜索效果,本文设定粒子群个数为20,速度惯性权重 w 为0.5,迭代次数为100次。

测试算例是在配备 Windows10 系统, Intel Core i7-1065G7 CPU 处理器和 8 GB 的 RAM 的笔记本电脑上进行的,使用带有 YALMIP 工具箱和 gurobi 求解器的 MATLAB R2021a 数学软件来求解优化问题。

基于粒子群算法寻找等效储能最优自放电系数的结果如图6所示。由图6可知,此时最优自放电系数 $\mu=0.914$,所对应的样本覆盖率为71.74%。同时给出算法未改进前即自放电系数 $\mu=1$ 时模型的样本覆盖率来进行对比,如表1所示。

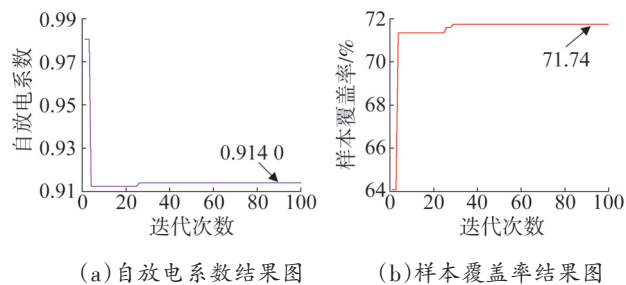


图6 基于粒子群算法整定最优自放电系数结果

Fig.6 Tuning results of optimal self-discharge coefficient based on particle swarm optimization algorithm

表1 方法改进前后聚合效果对比

Table 1 Comparison of polymerization effects between the pre-improved and post-improved methods

方法	自放电系数	样本覆盖率/%	总灵活性指标/MWh
改进前算法	1.000	58.20	0.301 7
改进后算法	0.914	71.74	0.332 9

由表1可知,相比于改进前算法的固定自放电系数 $\mu=1$ 时58.20%的样本覆盖率,改进后算法的最优自放电系数所对应的样本覆盖率提高了13.54个百分点,具有更好的近似效果。对应图4(a)—图4(c)的过程,通过有效调节外接多面体的形状,能够

使得内近似投影多面体包含更多的样本点,从而获得更大的灵活性可行域,使结果具有更低的保守性。所提求解方法在最优自放电系数作用下拥有更高的样本覆盖率,说明基于粒子群算法整定最优自放电系数的有效性。

算例中储能设备的自放电系数为0.98,而电动汽车可当作特殊的储能设备,其自放电系数为1,因此若采用文献[22]的方法,即不考虑等效储能的能量随时间变化的损失,将不能很好地等效设备的运行特性,从而影响灵活性聚合的精确程度。通过考虑等效储能的自放电系数,能够更好地刻画灵活性资源的特性,并通过调节外接多面体的形状,使得收缩后的内近似投影多面体具有更大的体积,即聚合等效模型能够探索到更大的灵活性可行域。因此,本章提出的方法可以获得比原方法更高的样本覆盖率。

对等效储能采用改进前和改进后的方法,灵活性资源聚合后的功率上限和下限如图7所示。功率上限和下限是聚合模型能够利用的输出有功功率最大范围,即总灵活性可用上下轨迹之间的面积来表示。参考文献[26],定义总灵活性指标为 $E_{af} = \sum_{t \in T} (\bar{p}_t^b - \underline{p}_t^b) \cdot \Delta t$ 。经计算可得,改进前后所得的总灵活性指标分别为0.301 7 MWh和0.332 9 MWh,即优化后的聚合模型方法可以多提取出0.031 2 MWh的灵活性功率,能够利用的输出有功功率范围更大,具有更大的灵活性可调节域。

等效储能具有的时间耦合能量限制如图8所示,对应式(13)中的参数 $\bar{E}_t^b, \underline{E}_t^b$ 。由图8可知,优化后的聚合模型方法具有的能量限制范围更小,这是因为在固定自放电系数 $\mu=1$ 时,等效储能的能量不会随时间变化而有所损失,处于理想状态;而考虑了自放电系数后,等效储能的能量会随时间变化有一定的损失,从而使得优化后的聚合模型方法具有的能量限制范围要小些,符合实际情况。因此,系统的输出功率曲线应在上限和下限内,同时能量也应在对应的范围内。

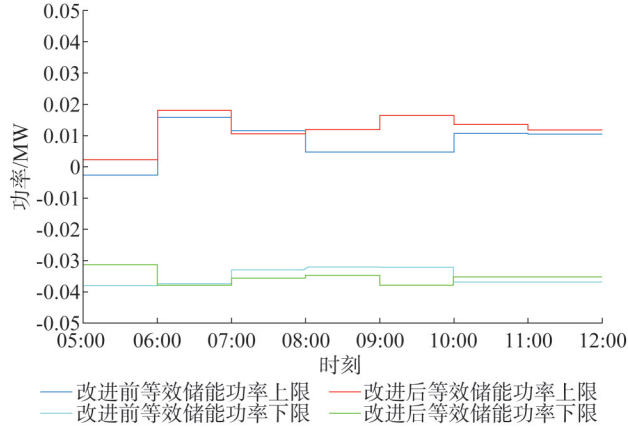


图7 方法改进前后等效储能的功率上限和下限

Fig.7 Upper and lower power limits of equivalent energy storage under pre-improved and post-improved methods

由于仅能绘制小于等于三维的多面体。为了比较改进前后方法的守恒水平,本文将高维投影空间中的投影多面体的近似结果投影到二维平面上进行可视化比较。图9展示了两个相邻时间点的功率所构成的灵活性可行域。

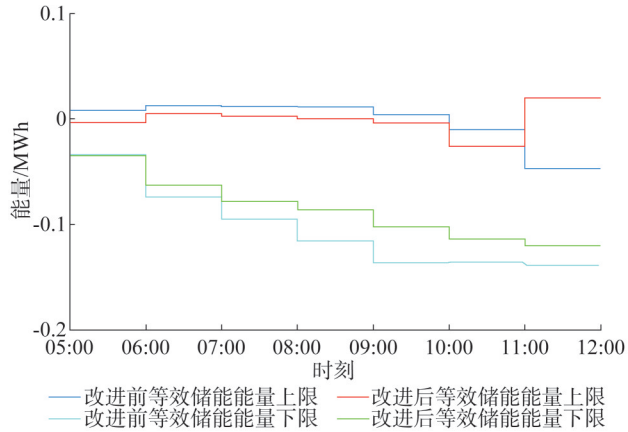


图8 方法改进前后等效储能的能量上限和下限

Fig.8 Upper and lower energy limits of equivalent energy storage under pre-improved and post-improved methods

由图9可知,相比改进前的方法,改进后的边界收缩算法总体上能够覆盖更大的灵活性区域,因此具有更低的保守性。这是因为本方法有效调整了近似多面体的超平面斜率,使得最终的灵活性多面体 Ω^B 的体积更大,具有更好的近似效果。

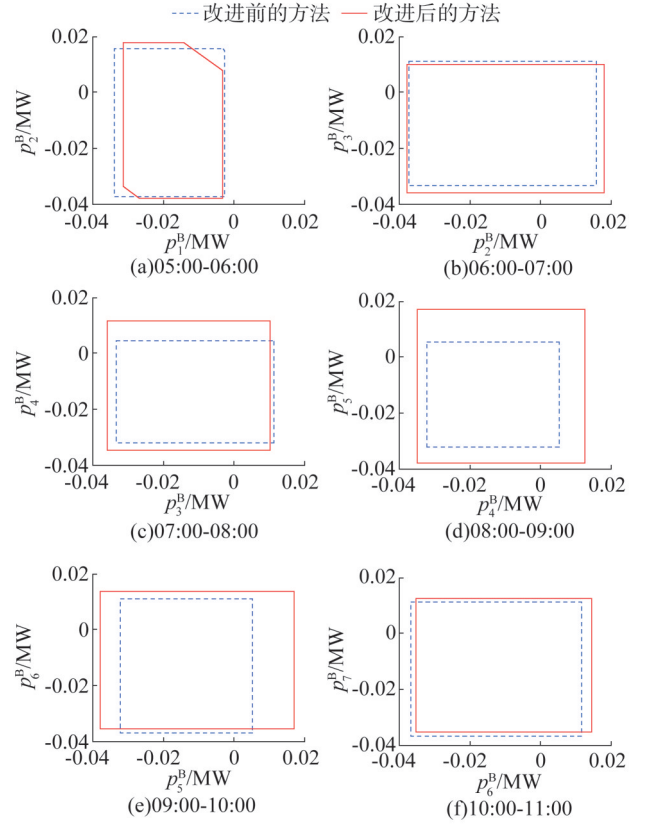


图9 方法改进前后所获得的灵活性区域近似值

Fig.9 Flexibility region approximations obtained under pre-improved and post-improved methods

5 结束语

提出了一种基于最优聚合等效储能模型的灵活性聚合方法,利用粒子群算法整定了等效储能的最优自放电系数,构建了具有更优性能的高维多面体灵活性可行域作为聚合等效模型,最大化了等效储能的功率容量,有效提高聚合等效模型的近似精度。论文的算例测试结果表明,与现有方法相比,本文所提出的聚合等效储能模型可以获得更大功率灵活性可行域,从而降低了灵活性聚合的保守性。

未来的研究可以在模型中进一步考虑配电网的潮流和网络模型,还可以将本文的储能类灵活性资源聚合方法进一步应用于热网等类多能灵活性资源的聚合,从而为电网提供多种来源的灵活性。

参考文献

- [1] 赵佩尧,李正烁,高晗,等.电-气-热综合能源系统协同调度优化研究综述[J].山东电力技术,2024,51(4):1-11.
ZHAO Peiyao, LI Zhengshuo, GAO Han, et al. Review on collaborative scheduling optimization of electricity-gas-heat integrated energy system[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(4):1-11.
- [2] HANIF S, MASSIER T, GOOI H B, et al. Cost optimal integration of flexible buildings in congested distribution grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2254-2266.
- [3] 许高秀,邓晖,房乐,等.考虑需求侧灵活性资源参与的国内外电力辅助服务市场机制研究综述[J].浙江电力,2022,41(9):1-13.
XU Gaoxiu, DENG Hui, FANG Le, et al. A review of ancillary service market mechanism study at home and abroad considering flexible resources on demand side [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(9):1-13.
- [4] 冯昊,徐海栋,孙飞飞,等.计及需求侧响应能力的受端电网储能优化配置方法[J].浙江电力,2023,42(12):107-116.
FENG Hao, XU Haidong, SUN Feifei, et al. An optimal allocation method of receiving-end power grid energy storage considering demand-side response capability [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(12):107-116.
- [5] NAZIR M S, HISKENS I A, BERNSTEIN A, et al. Inner approximation of minkowski sums: a union-based approach and applications to aggregated energy resources [C] // 2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC). IEEE, 2018: 5708-5715.
- [6] YI Z K, XU Y L, GU W, et al. Aggregate operation model for numerous small-capacity distributed energy resources considering uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4208-4224.
- [7] YI Z K, XU Y L, GU W, et al. A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1332-1346.
- [8] 栗子豪,李铁,吴文传,等.基于Minkowski Sum的热泵负荷调度灵活性聚合方法[J].电力系统自动化,2019,43(5):14-21.
LI Zihao, LI Tie, WU Wenchuan, et al. Minkowski sum based flexibility aggregating method of load dispatching for heat pumps [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5):14-21.
- [9] ZHAO H T, WANG B, WANG X Y, et al. Active dynamic aggregation model for distributed integrated energy system as virtual power plant[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 831-840.
- [10] HAO H, WU D, LIAN J M, et al. Optimal coordination of building loads and energy storage for power grid and end user services [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4335-4345.
- [11] MADJIDIAN D, ROOZBEHANI M, DAHLEH M A. Energy storage from aggregate deferrable demand: fundamental trade-offs and scheduling policies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3573-3586.
- [12] XU Z W, DENG T H, HU Z C, et al. Data-driven pricing strategy for demand-side resource aggregators [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 57-66.
- [13] XU Z W, HU Z C, SONG Y H, et al. Risk-averse optimal bidding strategy for demand-side resource aggregators in day-ahead electricity markets under uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 96-105.
- [14] CHEN X, DALL' ANESE E, ZHAO C H, et al. Aggregate power flexibility in unbalanced distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 258-269.
- [15] SONG M, GAO C W, YAN H G, et al. Thermal battery modeling of inverter air conditioning for demand response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5522-5534.
- [16] HAO H, SANANDAJI B M, POOLLA K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 189-198.
- [17] 边晓燕,孙明琦,董璐,等.计及灵活性聚合功率的源-荷分布式协调调度[J].电力系统自动化,2021,45(17):89-98.
BIAN Xiaoyan, SUN Mingqi, DONG Lu, et al. Distributed source-load coordinated dispatching considering flexible aggregated power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 89-98.
- [18] 童宇轩,胡俊杰,杜昊明,等.基于虚拟电池模型的外逼近闵可夫斯基热泵负荷调节可行域聚合方法[J].电网技术(2023-11-15)[2024-06-04]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1580.
TONG Yuxuan, HU Junjie, DU Haoming, et al. Feasible region aggregation method for load regulation of Minkowski heat pump based on external approximation of VB model [J]. Power System Technology (2023-11-15)[2024-06-04]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1580.
- [19] WANG G R, LI Z S, WANG F. Enhanced sufficient battery model for aggregate flexibility of thermostatically controlled loads considering coupling constraints [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2493-2496.
- [20] 吴界辰,艾欣,胡俊杰.需求侧资源灵活性刻画及其在日前优化调度中的应用[J].电工技术学报,2020,35(9):1973-1984.
WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie. Methods for characterizing flexibilities from demand-side resources and their applications in the day-ahead optimal scheduling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1973-1984.

- [21] 吴界辰,艾欣,胡俊杰,等.计及不确定因素的需求侧灵活性资源优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(14):73-80.
WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Optimal dispatch of flexible resource on demand side considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 73-80.
- [22] WANG S Y, WU W C. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.
- [23] ZHAO L, ZHANG W, HAO H, et al. A geometric approach to aggregate flexibility modeling of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4721-4731.
- [24] TAN Z F, YU A, ZHONG H W, et al. Optimal virtual battery model for aggregating storage-like resources with network constraints[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2024, 10(4): 1843-1847.
- [25] SHI W B, LI N, XIE X R, et al. Optimal Residential Demand Response in Distribution Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(7): 1441-1450.
- [26] CHEN X, LI N. Leveraging two-stage adaptive robust optimization for power flexibility aggregation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 3954-3965.
-
- 收稿日期:2024-06-04
修回日期:2024-10-24
作者简介:
翁亮涛(2001),男,硕士在读,主要研究方向为电-热综合能源系统灵活性建模;
王思远(1997),男,博士研究生,主要研究方向为分布式灵活性资源聚合与综合能源系统灵活性等值、物理信息引导的人工智能算法在系统参数辨识中的应用;
郑伟业(1990),通信作者(wzheng@scut.edu.cn),男,博士,副教授,主要研究方向为数学优化理论及人工智能在能源系统中的应用;
杨 苓(1992),女,博士,副教授,主要研究方向为可再生能源发电及其电能质量控制技术、并网变换器建模与稳定性分析方面;
朱继忠(1966),男,博士,教授,IEEE Fellow,主要研究方向为电力系统运行、综合智慧能源等。
- (责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.002

不确定环境下基于动态税和电动汽车时空灵活性的 配电网阻塞管理方法

林思瑶¹, 马 晓², 贺 坤², 王 灿², 沈非凡^{1*}

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410007; 2. 长高电新科技股份有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 电动汽车是减少交通领域能源消耗和减少碳排放的重要手段,但其大规模无序充电可能会造成配电网线路的阻塞现象。不同于常规负荷,电动汽车负荷具有时间和空间上的可平移性,通过价格等激励信号对电动汽车的时空分布进行引导,可优化配电网的负荷分布,实现有效的阻塞管理,保证配电网的安全稳定运行。同时,配电网中分布式能源以及负荷的随机性、波动性使得配电网的阻塞管理问题变得更为复杂,从而影响配电网的安全稳定运行。针对不确定环境下的含电动汽车配电网的阻塞问题,采用了鲁棒优化理论建立基于动态税的考虑电动汽车时空灵活性的配电网阻塞管理鲁棒优化模型,在配电网不确定因素波动的情况下,通过动态税引导电动汽车的时空分布,充分发挥电动汽车的时空灵活性,优化配电网的负荷情况,从而实现配电网的阻塞管理。通过对一组网络的仿真验证了模型在不确定因素波动存在的情况下,利用动态税实现不确定环境下考虑电动汽车时空灵活性的配电网阻塞管理方法的有效性。

关键词: 电动汽车;阻塞管理;鲁棒优化;动态税

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)01-0012-16

Distribution Networks Congestion Management Based on Dynamic Tariff and Temporal-spatial Flexibility of Electric Vehicles Under Uncertainty

LIN Siyao¹, MA Xiao², HE Kun², WANG Can², SHEN Feifan^{1*}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410007, China;

2. Changgao Electric Group Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: Electric vehicles (EVs) are an important means of reducing energy consumption and carbon emissions in the transportation sector, but their large-scale disorderly charging may cause congestion in distribution networks. Unlike conventional loads, EV loads have temporal and spatial translatability. By guiding the temporal-spatial distribution of EVs through incentive signals such as prices, the load distribution of the distribution network can be optimized, effective congestion management can be achieved, and the safe and stable operation of the distribution network can be ensured. At the same time, the randomness and fluctuation of the distributed energy resources and loads in distribution networks make the congestion management of the distribution network more complex, thereby affecting the safe and stable operation of the distribution network. In response to the congestion problem of distribution networks containing electric vehicles in uncertain environments, a robust optimization theory is adopted to establish a distribution network congestion management robust optimization model that considers the temporal-spatial coordination of electric vehicles. In the case of fluctuations in uncertain factors in the distribution network, the dynamic tariff is used to guide the temporal-spatial distribution of electric vehicles, fully tapping into the spatiotemporal flexibility of electric vehicles, optimizing the load of the distribution network, and achieving congestion management of the distribution network. The effectiveness of using dynamic tariffs to achieve distribution network congestion management considering the temporal-spatial flexibility of electric vehicles in uncertain environments was verified through the simulation of a set of networks.

Keywords: electric vehicles; congestion management; robust optimization; dynamic tariff

基金项目: 湖南省制造业关键产品“揭榜挂帅”项目(2022GXGG019); 湖南省自然科学基金(2023JJ40152)。

The Key Products of Hunan Province's Manufacturing Industry (2022GXGG019); Hunan Province Natural Science Foundation (2023JJ40152).

0 引言

电动汽车(electric vehicle, EV)的蓬勃发展使得交通网和配电网紧密耦合在了一起^[1-2],其规模化发展给配电网的安全稳定运行带来了新的机遇和挑战:一方面, EV 的移动储能特性可帮助减轻电网中可再生能源波动带来的压力并参与电网的需求响应,从而起到促进新能源消纳、维持配电网节点电压水平、实现电网安全经济运行等作用^[3];另一方面,现行电力市场采用峰谷分时电价运行机制,在一定程度上引导了 EV 用户的充电行为, EV 负荷更倾向于在低电价时段进行充电,导致充电负荷的高度聚集。一旦充电负荷高度聚集,电力输送的要求将可能大于系统的实际物理输送能力,出现部分地区电能供应不足以及当地配电线路发生阻塞等现象^[4]。此外,随着配电网中风电、光伏等分布式能源的快速发展以及灵活性负荷占比的增加,风电、光伏出力的预测误差以及灵活性负荷用电行为的随机性容易使配电网潮流发生改变,增加了配电网阻塞的风险。

阻塞管理是保障电网安全运行的必备手段。常见的阻塞管理方法主要包括直接控制和间接引导两种。在直接控制方面,主要通过网络重构、有功功率控制与无功功率控制等策略直接解决配电网线路阻塞问题^[5-11]。在间接引导方面,可运用价格信号和合同等市场调节机制,如引入日内影子价格、日前阻塞电价以及构建配电网容量市场等措施,间接解决阻塞问题^[12-13]。不同于传统的常规负荷, EV 负荷在时空分布上展现出独特的灵活性。这种灵活性主要源于 EV 用户的充电行为可以根据自身需求、电价信号以及配电网状态进行灵活调整。针对不确定环境下大规模 EV 接入配电网造成的配电网线路阻塞问题,利用电价等激励信号激励用户参与调度的间接阻塞管理方法可以实现有效的阻塞管理。如果电价设置不合理, EV 负荷可能会造成配电网线路的阻塞,危及电网安全运行;另一方面,如果通过合理的价格信号对 EV 负荷的时空分布进行引导,能够充分利用 EV 负荷的时空灵活性,优化配电网的负荷分布,便可以避免配电网线路潮流越限,实现配电网的阻塞管理。因此,可以采取一系列与价格相关的激励措施引导 EV 对实时价格信号等进行自发响应,充分发挥 EV 的时空灵活性,从而在降低负荷尖峰值和避免

电网线路发生阻塞的同时,达到降低车主各自的充电成本以及提高配电网安全性的目的。

对此,国内外学者积极开展相关研究。文献[14-15]采用了零售电价(retail price, RTP)的概念,由配电系统运营商(distribution system operator, DSO)直接制定各快速充电站(fast charging station, FCS)的电价, EV 依据电价制定能源计划,实现 EV 负荷的协调,从而优化配电网的负荷情况,避免配电网发生阻塞现象。文献[16-22]采用了能够反映每个充电站提供每单位增量负荷的边际成本的配电网节点边际电价(distribution locational marginal price, DLMP)的概念,以引导 EV 的充电行为,优化配电网负荷情况,解决大规模 EV 接入配电网造成的配电网阻塞问题,均实现了有效的阻塞管理。动态税(dynamic tariff, DT)的概念由 DLMP 引申而来,能够直观地反映配电网的阻塞情况,并通过提供合理的价格信号来有效缓解阻塞问题。文献[23]对几种电网定价方案进行了对比研究,结果表明 DT 方案在节省成本和改善网络运行状况方面优于其他价格方案。在基于 DT 的配电网阻塞管理方法中, DSO 通过优化得到配电网阻塞时的 DT,导致阻塞时段更高的能源价格,即现货价格加上 DT。根据最终价格,电动汽车聚合商(electric vehicle aggregator, EVA)作为追求利润的一方,会将能源计划从阻塞时段转移到非阻塞时段以降低其能源成本,从而解决网络阻塞。文献[24]建立了一个线性优化模型来获取 DT,并对 EV 充电功率进行了优化。EVA 通过 DT 信号优化内部的 EV 负荷分布,能够实现不违反配电网潮流约束情况下的负荷调度。文献[25]针对文献[24]中可能出现的 EVA 侧优化多解的问题,提出了基于二次规划的 DT 模型,以确保 EVA 优化结果的唯一性。文献[26]提出了一种用于配电网阻塞管理的动态税补贴(dynamic tariff subsidy, DTS)的方法,其中 DTS 可以是正数(税率)或负数(补贴)。文献[27]提出了一种考虑 DT、网络重构和重新配置的综合方案,以更有效地解决 EV 带来的阻塞问题。然而,上述研究中均只考虑到了 EV 负荷固定在充电站处与配电网互动的情况,而未考虑到 EV 的实际出行需求,这与现实情况不符。

此外,配电网内的风电、光伏等分布式能源以及负荷均具有很强的不确定性,可能会导致阻塞管理

效果不佳的问题。对此,文献[28]开发了一个阻塞管理鲁棒优化模型,通过考虑分布式能源功率输出不确定性和价格不确定性的鲁棒优化,平衡了阻塞管理策略的经济性和鲁棒性,但尚未考虑EV等灵活性负荷的协调调度以及利用价格等激励措施的阻塞管理。文献[29]建立了含新能源和EV的主动配电网模型,利用潮流追踪的原理确定阻塞缓解的奖励分担和造成阻塞的惩罚分担,有效解决了高渗透率EV所引起的阻塞问题,但未考虑社会经济效益最优的问题。文献[30]研究了计及源荷不确定性的阻塞管理模型,并建立了适用于阻塞费用分摊的基于合作博弈思想的最公平最小核心模型,但未考虑需求响应等灵活性资源的有效利用。文献[31]研究了考虑风电不确定性的主动配电网阻塞管理方法,基于Copula函数抽样生成表征风电不确定性的典型出力场景,将不确定变量转化为确定性场景进行优化计算,建立主动配电网双层阻塞管理优化模型,实现阻塞管理和社会利益最优。但抽样生成的表征风电不确定性的典型出力场景无法覆盖全部不确定性场景,建立的模型鲁棒性较差。

因此,对不确定环境下基于DT的考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理鲁棒优化方法开展了深入研究,在考虑配电网中风电、光伏出力及负荷的不确定性的前提下,采用鲁棒优化方法,充分发挥EV的时空灵活性,利用DT引导EV负荷的时空分布,实现不确定环境下考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理,确保配电网的安全稳定运行。

1 交通网中EV出行特性的线性建模

传统的静态交通分配(static traffic assignment, STA)模型通常基于如下假设:道路或节点的交通流入量总是等于一定时间后相应的流出量。然而,受到交通拥堵的影响,同时流入的EV可能不会同时流出。此外,行驶时间通常由与道路上EV流量相关的非线性延迟函数表示,这使得优化问题成为一个非线性问题,现有的求解器无法保证其收敛或全局最优。此外,在现有的STA问题中,FCS内EV的充电功率需求等于EV总流量与固定充电水平的乘积,而不考虑EV放电选项,这显然不能完全表征EV与电网之间的相互作用。因此,本文充分考虑EV在交通网中行驶的拥堵情况、充电站内的排队情况以及EV

行驶过程中的充放电行为和荷电状态(state of charge, SOC)变化等,采用文献[32]中的动态交通分配(dynamic traffic assignment, DTA)模型描述交通网中道路和FCS上EV流量的时空演化,建立能够完整表征交通网中EV出行特性的线性模型。

1.1 EV行驶路径的线性建模

交通网可视为由一系列路段和节点组成的图,建模为 $G = \{A, N\}$,其中 $a \in A$ 代表交通网中的各路段, A 表示交通网中路段的集合;节点 $n \in N$ 代表各路段的连接点, N 表示交通网中各路段连接点的集合。假设EVA内部分EV的出行需求为第 i 对起点-终点(origin-destination, O-D),其可以选择不同的出行路径,即一个O-D对 i 可以由多条不同的路径组成(如图1中不同颜色的箭头所示),并且不同的出行路径可以经过同一个路段。

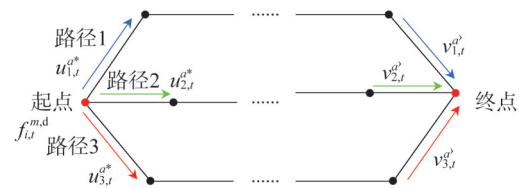


图1 出行需求O-D对 i 的解释说明

Fig.1 Explanation of travel demand O-D pair i

由图1可以看出,EVA中出行需求为O-D对 i 的EV,可以建模为:

$$f_{i,t}^{m,d} = \sum_{j \in P_i} u_{j,t}^{a^*} \forall i, \forall t \quad (1)$$

$$\sum_{i \in T} u_{j,t}^{a^*} = \sum_{i \in T} v_{j,t}^{a^*} \forall j \quad (2)$$

式中: $f_{i,t}^{m,d}$ 为 t 时刻第 m 个EVA中出行需求为O-D对 i 的EV总量; $u_{j,t}^{a^*}$ 和 $v_{j,t}^{a^*}$ 分别为 t 时刻O-D对 i 中第 j 条路径内流入第一个路段的EV数量和 t 时刻从第 j 条路径内最后一个路段流出的EV数量,其中 a^* 表示路径 a 的起始路段, $a^>$ 表示路径 a 的最后一条路段; T 为EV运行时段; P_i 为与O-D对 i 连接的路径集合。式(1)表示 t 时刻O-D对 i 的总出行需求等于在 t 时刻流入每条路径 j 的第一个路段的EV数量之和。式(2)表示从起点出发的任何路径上的EV总数等于该路径上在整个时间段内到达目的地的EV总数。

对于交通网中的单一路段建模如图2所示。

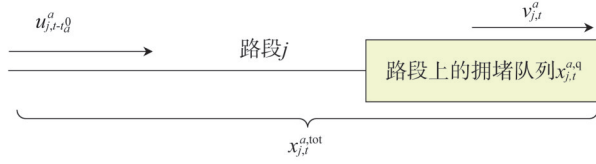


图2 路段上行为的动态建模

Fig.2 Dynamic modeling of behavior on arcs

EV 在路段上的出行行为可以建模为:

$$x_{j,t}^{a,q} - x_{j,t-1}^{a,q} = u_{j,t}^{a,t} - v_{j,t}^a, \forall a, \forall j \in P_a, \forall t \quad (3)$$

$$x_{j,t}^{a,tot} - x_{j,t-1}^{a,tot} = u_{j,t}^a - v_{j,t}^a, \forall a, \forall j \in P_a, \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{j \in P_a} v_{j,t}^a \leq \bar{N}_a^v, \forall a, \forall t \quad (5)$$

式中: $x_{j,t}^{a,tot}$ 和 $x_{j,t}^{a,q}$ 分别为 t 时刻路径 j 的路段 a 上的 EV 总数以及路段 a 上拥堵队列的 EV 总数; $u_{j,t}^a$ 和 $v_{j,t}^a$ 分别为 t 时刻路径 j 中路段 a 流入和流出的 EV 数量; t_a^0 为路段 a 的自由行驶时间; P_a 为与路段 a 相连的路径集合; $\bar{N}_a^v$ 为路段 a 的 EV 数量容量。由式(3)可知, 相邻时段路段 a 拥堵队列上 EV 的数量变化受到拥堵队列流入和流出的影响。式(4)表明相邻时段路段 a 上 EV 总数的变化受到路段 a 上 EV 流入和流出的影响。式(5)表明同时段路段 a 上的 EV 总数应在其容量范围内。

交通网中的节点可分为两种类型, 包括普通节点和 FCS 节点, 可分别进行如下建模:

1) 普通节点。在路径 j 上, 对于由普通节点连接的两个路段而言, t 时刻从上一个路段流出的 EV 总数 $v_{j,t}^{a-}$ 等于下一个路段流入的 EV 总数 $u_{j,t}^{a-}$, 可表示为

$$v_{j,t}^a = u_{j,t}^{a-}, \forall n \in N_j, \forall j, \forall t \quad (6)$$

式中: n 为交通网中的各个节点; N_j 为交通网中所有节点的集合。

2) FCS 节点。EV 可以在 FCS 处进行充电以获得出行所需的电能需求, 或者向配电网输出电能以获取收益, 具体出行行为如图3所示。

途经 FCS 节点的 EV 可以选择在此处进行充放电, 或者直接离开(此时可将 FCS 节点视为普通节点)。对于 EV 在 FCS 节点处的具体行为, 可进行如下建模:

$$v_{j,t}^{a+} = u_{j,t}^{y,fcs} + u_{j,t}^{y,free}, \forall j \in P_y, \forall y, \forall t \quad (7)$$

$$u_{j,t}^{a-} = v_{j,t}^{y,cd} + u_{j,t}^{y,free}, \forall j \in P_y, \forall y, \forall t \quad (8)$$

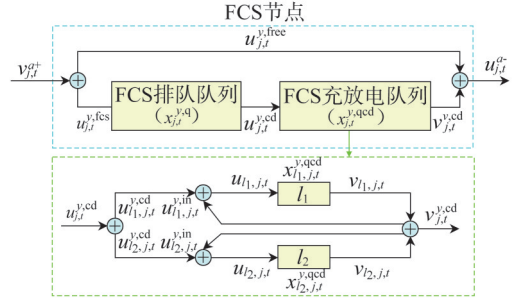


图3 FCS节点上EV行为的动态建模

Fig.3 Dynamic modeling of EV behavior on FCS nodes

$$\sum_{t \in T} u_{j,t}^{y,fcs} = \sum_{t \in T} v_{j,t}^{y,cd}, \forall j \in P_y, \forall y \quad (9)$$

$$x_{j,t}^{y,q} - x_{j,t-1}^{y,q} = u_{j,t}^{y,fcs} - u_{j,t}^{y,cd}, \forall j \in P_y, \forall y, \forall t \quad (10)$$

$$x_{j,t}^{y,qcd} - x_{j,t-1}^{y,qcd} = u_{j,t}^{y,cd} - v_{j,t}^{y,cd}, \forall j \in P_y, \forall y, \forall t \quad (11)$$

式中: $u_{j,t}^{y,fcs}$ 和 $v_{j,t}^{y,cd}$ 分别为在 t 时刻路径 j 内计划进入第 y 个 FCS 进行充放电和充放电后离开第 y 个 FCS 的 EV 数量; $u_{j,t}^{y,free}$ 为 t 时刻路径 j 内经过第 y 个 FCS 但不充电或放电的 EV 数量; $x_{j,t}^{y,q}$ 和 $x_{j,t}^{y,qcd}$ 分别为 t 时刻路径 j 上在第 y 个 FCS 内排队以及 t 时刻正在充电或放电的 EV 数量; $u_{j,t}^{y,cd}$ 为 t 时刻第 j 条路径中第 y 个充电站内进入充放电队列充放电的 EV 数量; $v_{j,t}^{a-}$ 为路径 j 中 FCS 节点的上一路段 a^+ 在 t 时刻的 EV 流出数量; $u_{j,t}^{a-}$ 为路径 j 中 FCS 节点的下一路段 a^- 在 t 时刻的 EV 流入数量; P_y 为与第 y 个 FCS 相关联的路径集合。式(7)表明, 在路径 j 中, t 时刻经过第 y 个 FCS 的 EV 可以选择在此处进行充放电或者直接离开驶入下一个路段。同理, 式(8)表明在路径 j 中, t 时刻离开第 y 个 FCS 的 EV 数量包括在 t 时刻已经完成充放电的 EV 和没有充放电计划直接离开的 EV。式(9)表明, 在整个优化时段内, 路径 j 上进入第 y 个 FCS 进行充放电的 EV 总数等于充放电结束后离开第 y 个 FCS 的 EV 总数。与式(3)和式(4)类似, 式(10)和式(11)描述了 FCS 内 EV 排队队列和充放电队列的动态变化。

对于进入充放电队列的 EV, 具体建模为:

$$u_{j,t}^{y,cd} = \sum_{l \in L_y} u_{l,j,t}^{y,cd}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (12)$$

$$\sum_{l \in L_y} u_{l,j,t}^{y,in} = \sum_{l \in L_y} v_{l,j,t}^{y,cd} - v_{j,t}^{y,cd}, \forall l \in L_y, \forall j \in P_y, \forall t \quad (13)$$

$$u_{l,j,t}^{y,cd} = u_{l,j,t}^{y,cd} + u_{l,j,t}^{y,in}, \forall l \in L_y, \forall j \in P_y, \forall t \quad (14)$$

$$\sum_{t=0}^T u_{j,t}^{y,cd} \geq \sum_{t=0}^{T+1} v_{j,t}^{y,cd}, \forall l \in L_y, \forall j \in P_y, \forall t \quad (15)$$

$$x_{l,j,t}^{y,qcd} - x_{l,j,t-1}^{y,qcd} = u_{l,j,t} - v_{l,j,t}, \forall l \in L_y, \forall j \in P_y, \forall t \quad (16)$$

$$\sum_{j \in P_y} \sum_{l \in L_y} x_{l,j,t}^{y,qcd} \leq \bar{N}_y^p, \forall t \quad (17)$$

式中: $u_{l,j,t}^{y,qcd}$ 为 t 时刻第 j 条路径中第 y 个充电站内进入第 l 个虚拟充电桩充放电队列充放电的 EV 数量; $u_{l,j,t}^{y,in}$ 为 t 时刻路径 j 中进入第 y 个 FCS 内的虚拟充电桩 l 进行循环充放电的 EV 数量; $v_{l,i,t}$ 为 t 时刻第 i 个出行需求中从第 l 个虚拟充电桩充放电结束离开的 EV 数量; $u_{l,j,t}$ 为 t 时刻路径 j 中所有进入第 y 个 FCS 内的虚拟充电桩 l 进行循环充放电的 EV 数量(包括上一时刻充放电结束后继续选择充放电的 EV); L_y 为与第 y 个 FCS 相关的充放电部分集合; $x_{l,j,t}^{y,qcd}$ 为 t 时刻路径 j 中在第 y 个 FCS 内的虚拟充电桩 l 进行充放电的 EV 数量; $\bar{N}_y^p$ 为第 y 个 FCS 充放电 EV 数量限制。

如式(12)所示,进入 FCS 充放电队列进行充放电的 EV 可以自由选择进行充电或放电。采用循环 EV 流的概念对充电站中的电动汽车进行建模,即在 t 时刻完成充电或放电的 EV 可以选择直接离开 FCS 或在下一时刻继续充放电,建模为式(13)。这一概念的引入能够充分考虑 EV 用户的灵活性,用户可根据实际情况选择继续/结束充放电行为,能够更准确地捕捉 EV 在充放电队列中复杂的时空充放电行为。因此,在 t 时刻充放电的 EV 总数包括此时从前序排队队列驶入进行充放电的 EV 以及在上一个时段充放电之后决定再次充放电的 EV,可用式(14)表示。式(15)表明进入充放电队列的 EV 必须进行至少一个时段的充放电。与式(11)类似,式(16)描述了充电和放电队列内 EV 数量随时间的动态变化。式(17)表示 FCS 内充电桩的数量限制,即同一时段在第 y 个 FCS 内充电和放电的 EV 数量不能超过其容量限制。

1.2 EV SOC 的动态建模

EV 的 SOC 将随着其在交通网中的行驶而发生变化,直接影响其续航里程和途中的充放电计划,引入变量 e 表示交通网中各个部分 EV 的聚合 SOC 情况。与前文的分析类似,可对交通网路段上 EV 的 SOC 情况建模如下:

$$e_{a,j,t}^{x,q} - e_{a,j,t-1}^{x,q} = e_{a,j,t}^{u} - v_{a,j,t} - c_a^{tra} u_{a,j,t} - t_a^0, \forall j \in P_a, \forall t \quad (18)$$

$$e_{i,t}^{m,d} = \sum_{j \in P_j} e_{a^*,j,t}^{u}, \forall i, \forall t \quad (19)$$

$$\underline{E} u_{a,j,t} \leq e_{a,j,t}^u \leq \bar{E} u_{a,j,t}, \forall j \in P_a, \forall t \quad (20)$$

$$\underline{E} x_{a,j,t}^q \leq e_{a,j,t}^{x,q} \leq \bar{E} x_{a,j,t}^q, \forall j \in P_a, \forall t \quad (21)$$

$$\underline{E} v_{a,j,t} \leq e_{a,j,t}^v \leq \bar{E} v_{a,j,t}, \forall j \in P_a, \forall t \quad (22)$$

式中: $e_{a,j,t}^{x,q}$ 为 t 时刻路径 j 中路段 a 上 EV 聚合 SOC; $e_{a,j,t}^{u} - t_a^0$ 为 $t - t_a^0$ 时刻路径 j 中路段 a 上 EV 流入 SOC; $e_{a,j,t}^v$ 为 t 时刻路径 j 中离开路段 a 上的 EV 聚合 SOC; c_a^{tra} 为路段 a 上 EV 行驶的单位能量消耗; $u_{a,j,t} - t_a^0$ 为路径 j 中 $t - t_a^0$ 时刻进入路段 a 的电动汽车数量; $c_a^{tra} u_{a,j,t} - t_a^0$ 为 $t - t_a^0$ 时刻路径 j 中在路段 a 上的 EV 行驶过程中的能量消耗; $e_{a^*,j,t}^u$ 为 t 时刻路径 j 上的第一条路段的 EV 的聚合 SOC; $e_{i,t}^{m,d}$ 为 t 时刻第 i 个出行需求中第 m 个 EVA 内的 EV 起始聚合 SOC; $\underline{E}$ 为单一电动汽车的 SOC 下限; $\bar{E}$ 为单一电动汽车的 SOC 上限; $u_{a,j,t}$ 为 t 时刻路径 j 中路段 a 上的 EV 数量; $x_{a,j,t}^q$ 为 t 时刻路径 j 中路段 a 上的 EV 数量; $v_{a,j,t}$ 为 t 时刻路径 j 中离开路段 a 的 EV 数量。由式(18)可知, t 时刻路段 a 上 EV 聚合 SOC 的变化同时受到路段 a 上 EV 流入和流出以及行驶过程中的能量消耗的影响;式(19)表示 t 时刻各路径第一个路段上的 SOC 之和等于起点处的总 SOC;式(20)~式(22)表示各处聚合 SOC 的上限和下限。

充电站处 EV SOC 的动态建模对于规划 EV 的行驶路线和充放电策略以及配电网的阻塞管理均具有重要作用,建模如下:

$$e_{j,t}^{a^+,v} = e_{j,t}^{u,fcs} + e_{j,t}^{free}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (23)$$

$$e_{j,t}^{a^-,u} = e_{j,t}^{v,cd} + e_{j,t}^{free}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (24)$$

$$e_{y,j,t}^{x,q} - e_{y,j,t-1}^{x,q} = e_{j,t}^{u,fcs} - e_{j,t}^{u,cd}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (25)$$

$$e_{j,t}^{x,qcd} - e_{j,t-1}^{x,qcd} = e_{j,t}^{u,cd} - e_{j,t}^{v,cd} + \sum_{l \in L_y} p_l \eta \Delta t x_{l,j,t}^{qcd} \quad (26)$$

$$\underline{E} u_{j,t}^{fcs} \leq e_{j,t}^{u,fcs} \leq \bar{E} u_{j,t}^{fcs}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (27)$$

$$\underline{E} x_{j,t}^{y,q} \leq e_{j,t}^{x,y,q} \leq \bar{E} x_{j,t}^{y,q}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (28)$$

$$\underline{E} u_{j,t}^{cd} \leq e_{j,t}^{u,cd} \leq \bar{E} u_{j,t}^{cd}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (29)$$

$$\underline{E} x_{j,t}^{y,qcd} \leq e_{j,t}^{x,y,qcd} \leq \bar{E} x_{j,t}^{y,qcd}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (30)$$

$$\underline{E} v_{j,t}^{cd} \leq e_{j,t}^{v,cd} \leq \bar{E} v_{j,t}^{cd}, \forall j \in P_y, \forall t \quad (31)$$

式中: $e_{j,t}^{a^+,v}$ 为 t 时刻从路径 j 中上一路段 a^+ 离开的 EV 的聚合 SOC; $e_{j,t}^{u,fcs}$ 为 t 时刻路径 j 中进入 FCS 进行充放电的 EV 的聚合 SOC; $e_{j,t}^{free}$ 为 t 时刻路径 j 中路过 FCS 不进行充放电直接离开的 EV 的聚合 SOC; $e_{j,t}^{a^-,u}$ 为 t 时刻进入路径 j 中下一路段 a^- 的 EV 的聚合 SOC; $e_{j,t}^{v,cd}$ 为 t 时刻路径 j 中在 FCS 充放电结束的 EV 的聚合 SOC; $e_{y,j,t}^{x,q}$ 为 t 时刻路径 j 中第 y 个 FCS 上排队的 EV 的聚合 SOC; $e_{j,t}^{u,cd}$ 为 t 时刻路径 j 中 FCS 上排

队结束进行充放电的 EV 的聚合 SOC; $e_{j,t}^{x,qed}$ 为 t 时刻路径 j 中在 FCS 内充放电队列上充放电的 EV 的聚合 SOC; $e_{j,t}^{v,cd}$ 为 t 时刻路径 j 中 FCS 上充放电结束的 EV 的聚合 SOC; p_l 为虚拟充电桩 l 的单位充放电功率; η 为充放电效率; Δt 为单位时间间隔; $x_{l,j,t}^{qed}$ 为 t 时刻路径 j 中在虚拟充电桩 l 处进行充放电的 EV 数量。式(23)表明,与前述对 EV 在 FCS 处出行行为的建模类似,进入充电站的 EV 的聚合 SOC ($e_{j,t}^{a,v}$)可被分为两部分:一部分不停留在此处充放电直接通过 $e_{j,t}^{u,fcs}$,另一部分进入充电站内进行排队等待充放电 $e_{j,t}^{free}$ (离开时同样如此,即式(24))。式(25)表明相邻时段充电站排队队列中的 SOC 变化受到排队队列 EV 流入 $e_{j,t}^{u,fcs}$ 和流出 $e_{j,t}^{u,cd}$ 的影响。式(26)表明,在充电站内充电和放电的 EV 的总 SOC 变化 $e_{j,t}^{x,qed}$ 受到充放电队伍 EV 的流入 $e_{j,t}^{u,cd}$ 和流出 $e_{j,t}^{v,cd}$ 以及其自身充放电行为 ($p_l \eta \Delta t x_{l,j,t}^{qed}$) 的影响。式(27)一式(31)表示各处 EV 的聚合 SOC 上限和下限。

2 不确定环境下考虑电动汽车时空灵活性的配电网阻塞管理模型

2.1 不确定性建模

在对不确定性问题的分析中,首先需要对不确定参数进行分析及建模。假定配电网内的风电、光伏等分布式能源出力 P_r^{WT} 、 P_r^{PV} ,以及常规负荷 P_r^{Con} 均在盒式不确定集合内扰动。盒式不确定集是工程实际中最常用的不确定性集合,能够确保模型可以考虑到各种可能的扰动情况,从而在实际应用中更具有鲁棒性^[33-35]。配电网风电、光伏以及负荷的盒式不确定集可建模如下:

$$P_r^{WT} = \bar{P}_r^{WT} + \Delta P_r^{WT} \quad (32)$$

$$P_r^{PV} = \bar{P}_r^{PV} + \Delta P_r^{PV} \quad (33)$$

$$P_r^{Con} = \bar{P}_r^{Con} + \Delta P_r^{Con} \quad (34)$$

式中: $\bar{P}_r^{WT}$ 、 $\bar{P}_r^{PV}$ 和 $\bar{P}_r^{Con}$ 分别为配电网内第 r 个节点的风电、光伏出力以及常规负荷的期望值; ΔP_r^{WT} 、 ΔP_r^{PV} 和 ΔP_r^{Con} 分别为配电网风电、光伏出力及常规负荷的扰动值,满足:

$$\Delta P_r^{WT} \in [-\xi_r^{WT}, \xi_r^{WT}] \quad (35)$$

$$\Delta P_r^{PV} \in [-\xi_r^{PV}, \xi_r^{PV}] \quad (36)$$

$$\Delta P_r^{Con} \in [-\xi_r^{Con}, \xi_r^{Con}] \quad (37)$$

式中: ξ_r^* (*对应 WT、PV、Con) 分别为配电网中节点 r

处的风电、光伏及负荷的扰动限制(下文所有上标*均表示此含义)。配电网的风电、光伏出力以及负荷波动的不确定参数扰动值在区间 $[-\xi_r^*, \xi_r^*]$ 内波动。引入鲁棒控制参数 $\Gamma_r^* \in [0, 1]$ 调节不确定因素的波动范围,进而控制模型的保守性,满足

$$\left| \frac{P_r^* - \bar{P}_r^*}{\xi_r^*} \right| \leq \Gamma_r^* \quad (38)$$

本文建立的基于 DT 的考虑 EV 时空灵活性的配电网阻塞管理模型采用分散式优化框架,具体步骤为:首先,DSO 通过 EVA 或自身的预测来获得能源需求信息,同时还需要获取配电网信息和进行现货价格预测;其次,DSO 在考虑配电网约束的情况下,进行全局优化,对 EVA 内的 EV 出行行为以及配电网的潮流情况进行优化求解,得到此时 EV 出行行为、最优能源计划以及 DT,并将其发送给所有 EVA; EVA 在收到 DSO 的预测现货价格和 DT 后,根据预测的现货价格和 DT 独立制定自己的最优计划;最后,EVA 提交能源计划至现货市场,实现配电网的阻塞管理。具体模型将在下一小节中详细介绍。

2.2 DSO 侧的阻塞管理鲁棒优化模型

配电网线路上的潮流可通过简化的线性交流潮流模型进行建模^[36],具体如下:

$$\sum_{r \in c(s)} P_{sr}^l + P_r^N - \sum_{k \in c(r)} P_{rk}^l = P_r^D, \forall r \quad (39)$$

$$\sum_{r \in c(s)} Q_{sr}^l + Q_r^N - \sum_{k \in c(r)} Q_{rk}^l = Q_r^D, \forall r \quad (40)$$

$$V_r = V_s - (P_{sr}^l R_{sr}^l + Q_{sr}^l X_{sr}^l) / V_0, \forall l \quad (41)$$

式中: $c(s)$ 为节点 s 的子节点集合; $c(r)$ 为节点 r 的子节点集合; P_{sr}^l 和 Q_{sr}^l 分别为配电网线路 l 上首端节点 s 与末端节点 r 之间的有功潮流、无功潮流; P_r^N 和 Q_r^N 分别为节点 r 的注入功率,包括节点处的风电、光伏等分布式能源; P_r^D 和 Q_r^D 均为节点 r 的功率需求, P_r^D 由 P_r^{Con} 和 P_r^{EV} 两部分组成, P_r^{Con} 为节点 r 上的常规负载, P_r^{EV} 为节点 r 上的 EV 负载; R_{sr}^l 和 X_{sr}^l 分别为线路 l 的电阻和电抗; P_{rk}^l 为节点 r 与 k 间线路 l 上流过的有功功率; Q_{rk}^l 为节点 r 与 k 间线路 l 上流过的无功功率; V_r 为节点 r 的电压幅值; V_s 为节点 s 的电压幅值; V_0 为线路初始点电压幅值。式(39)和式(40)分别表示节点有功平衡方程和无功平衡方程,式(41)为线路 l 上的电压降方程。

考虑配电网中的不确定因素,因此式(39)可具

体表示为

$$\sum_{r \in c(s)} P_{sr}^l + P_r^{\text{WT}} + P_r^{\text{PV}} - \sum_{k \in c(r)} P_{rk}^l = P_r^{\text{Con}} + P_r^{\text{EV}} \quad (42)$$

由于鲁棒优化的思想是即使取最坏的情况,所求得的鲁棒解依然可行。对于配电网中风电出力 P_r^{WT} 、光伏出力 P_r^{PV} 而言,当其出力为其最小值时,配电网节点本地的分布式能源出力不足以提供充足的电能补给而需要通过配电网线路传输电能进行电能补给;对于配电网中的常规负荷 P_r^{Con} ,当其波动至最大的情况时,EV 负荷的增加更倾向于出现“峰上加峰”的现象,给配电网的阻塞管理带来了困难。因此, P_r^{WT} 和 P_r^{PV} 的值越小以及 P_r^{Con} 的值越大,对于配电网阻塞管理的影响越大。为简化表达,本文主要聚焦于配电网中风电、光伏负向波动以及负荷正向波动的情况进行分析。依据上述分析,并引入上文中的鲁棒控制参数,将式(42)进行鲁棒优化转化,结果为

$$\sum_{r \in c(s)} P_{sr}^l + (\bar{P}_r^{\text{WT}} - \Gamma_r^{\text{WT}} \xi_r^{\text{WT}}) + (\bar{P}_r^{\text{PV}} - \Gamma_r^{\text{PV}} \xi_r^{\text{PV}}) - \sum_{k \in c(r)} P_{rk}^l = (\bar{P}_r^{\text{Con}} + \Gamma_r^{\text{Con}} \xi_r^{\text{Con}}) + P_r^{\text{EV}}, \forall r \quad (43)$$

Γ_r^* 在不确定集合 $[0, 1]$ 中任意取值,其值越大表明预测值和实际值之间的差距越大,不确定性越大。当 $\Gamma_r^* = 0$ 时,即 $P_r^* = \bar{P}_r^*$,此时该问题为不考虑配电网风电、光伏出力波动及负荷不确定性的确定性问题。当 $\Gamma_r^* = 1$ 时,对应配电网风电、光伏出力最小、负荷最大的情况,即此时阻塞管理问题最恶劣的情况。因此,可以通过调节 Γ_r^* 在 $[0, 1]$ 之间的取值来控制扰动范围,进而控制解的鲁棒性与最优性。通过合理调整鲁棒控制参数的值,能够得到既能应对一定的不确定性扰动,又能够实现考虑 EV 时空灵活性的阻塞管理的优化结果。

对配电网线路潮流进行建模后,DSO 应确保配电网中的潮流和节点电压不超过各自的限值,因此有如下约束:

$$-f_{sr}^l \leq P_{sr}^l \leq f_{sr}^l, \forall l, (\lambda^-, \lambda^+) \quad (44)$$

$$V_{s \min} \leq V_s \leq V_{s \max}, \forall s, (\gamma^-, \gamma^+) \quad (45)$$

式中: f_{sr}^l 为节点 s 与 r 间线路 l 上的潮流限值; $V_{s \min}$ 和 $V_{s \max}$ 分别为节点 s 处电压的最小值和最大值; λ^+ 、 λ^- 、 γ^+ 和 γ^- 分别为潮流约束和电压约束的对偶变量,可视为相对于潮流约束和电压约束的边际价格。式(44)为配电网潮流的上下限约束;式(45)描述了配

电网中的节点电压上下限约束。

DSO 优化模型的目标函数为最小化 EV 的行驶时间和充放电成本。式(44)和式(45)表示 DSO 在优化过程中,充分考虑配电网的约束条件,以确保所得优化结果中的配电网潮流和节点电压均严格控制在限制范围内,从而避免配电网线路发生阻塞现象,保障配电网的安全稳定运行。因此,DSO 优化模型可建模如下,其目标函数为

$$\min \left(\sum_m (C_m^T + C_m^{\text{C\&D}}) \right), m \in A_m \quad (46)$$

式中: C_m^T 为第 m 个 EVA 内 EV 的总行驶时间成本; $C_m^{\text{C\&D}}$ 为第 m 个 EVA 内 EV 的总充放电成本; A_m 为第 m 个 EVA 内所有 EV 的集合。行驶时间成本可由式(47)计算。

$$C_m^T = w \sum_{i \in i_m} \left(\sum_{j, a, t} x_{j, t}^{a, \text{tol}} + \sum_{j, y, t} (x_{j, t}^{y, q} + x_{j, t}^{y, \text{qed}}) \right) \quad (47)$$

式中: i_m 为第 m 个 EVA 内的第 i 个出行需求; w 为 EV 用户的单位行驶时间成本。同时采用文献[25]中的价格敏感系数 β 来保证优化解的唯一性,因此 EV 的充放电成本为:

$$C_m^{\text{C\&D}} = (c_t + \beta \sum_m p_{m, t}) \sum_m p_{m, t} \quad (48)$$

$$p_{m, t} = p_{y, t}^{m, c} + p_{y, t}^{m, d} \quad (49)$$

$$p_{y, t}^{m, c} = \max \left(\sum_{i \in P_y, l \in L_y} p_l x_{l, i, t}^{\text{qed}}, 0 \right) \quad (50)$$

$$p_{y, t}^{m, d} = \min \left(\sum_{i \in P_y, l \in L_y} p_l x_{l, i, t}^{y, \text{qed}}, 0 \right) \quad (51)$$

式中: c_t 为 t 时刻的电价; $p_{y, t}^{m, c}$ 、 $p_{y, t}^{m, d}$ 分别为 t 时刻第 m 个聚合商第 y 个充电站的充电/放电功率; $p_{m, t}$ 为 t 时刻第 m 个聚合商的总功率。约束为式(40)一式(45)。

最终,通过求解该模型得到在配电网不发生阻塞的前提下 EVA 内 EV 最优的出行行为与能源计划,同时可通过潮流约束与电压约束的对偶变量得到反映线路阻塞程度的 DT,定义如式(52)所示,并将其发送给 EVA。

$$R_t = (\lambda_t^+ - \lambda_t^-) + (\gamma_t^+ - \gamma_t^-) \quad (52)$$

式中: R_t 为 t 时刻的 DT 值大小; λ_t^+ 、 λ_t^- 、 γ_t^+ 、 γ_t^- 为 t 时刻的对偶变量。

2.3 EVA 侧的阻塞管理鲁棒优化模型

EVA 在接收到来自 DSO 侧的 DT 后,根据预测的现货价格和 DT 独立制定自身的最优能源计划,以内部 EV 出行时间最短及充放电成本最低为优化目

标建立优化模型,目标函数为

$$\min(C_m^T + C_m^{C\&D}), \forall m \in A_m \quad (53)$$

其中时间成本 C_m^T 仍由式(47)计算,此时的充放电成本可由式(54)计算。

$$C_m^{C\&D} = (c_t + \beta \cdot p_{m,t} + R_t) \cdot p_{m,t} \quad (54)$$

约束为式(1)一式(31)。

文献[25]证明了引入价格敏感系数后基于二次规划的 DSO 优化与 EVA 优化的收敛性。与 DSO 侧的阻塞管理不同,EVA 在计算内部充放电成本时,将从 DSO 侧获取的 DT 考虑在内,此时的配电网的潮流约束情况反映于 DT 中。可以看出,阻塞时段的 DT 将会导致更高的能源价格。因此,EVA 对内部 EV 的出行与充放电行为进行协调,旨在降低整体成本。通过优化,EVA 实现了内部 EV 负荷在时间和空间上的重新分配,从而优化了配电网的负荷情况,实现有效的阻塞管理,确保了配电网的安全稳定运行。

通过求解此时的鲁棒优化模型得到能够应对最极端的不确定性时的 EV 出行及充放电行为、DT 值以及此时的配电网潮流情况。即便在配电网中风电、光伏出力以及负荷发生剧烈波动的不利情况下,这种优化方法依然能够确保不确定环境下考虑 EV 时空灵活性的有效的阻塞管理,优化结果具有很强的鲁棒性。

3 仿真分析

3.1 拓扑及参数给定

对于配电网中风电、光伏出力及负荷波动至最大的情况进行分析,在建立的鲁棒优化模型中,假设配电网中的风电、光伏以及负荷的波动范围均为其期望值的 $\pm 10\%$,为了验证鲁棒优化方法下所提出的考虑电动汽车时空灵活性的配电网阻塞管理策略的有效性,在 MATLAB 里对如图 4 所示的网络进行了仿真研究。该组网络包括 20 节点的交通网和 17 节点的辐射状配电网,交通网中的充电站 F1—F8 与配电网中的充电站 F1—F8 一一对应。交通网中的 EV 作为交通工具和移动负荷,其出行及充电站处的充放电行为等会影响配电网的负荷分布、负荷大小,进而影响配电网的安全经济运行。同时,交通网内 EV 的出行行为又受到配电网运行状态和潮流分布等信息的影响。

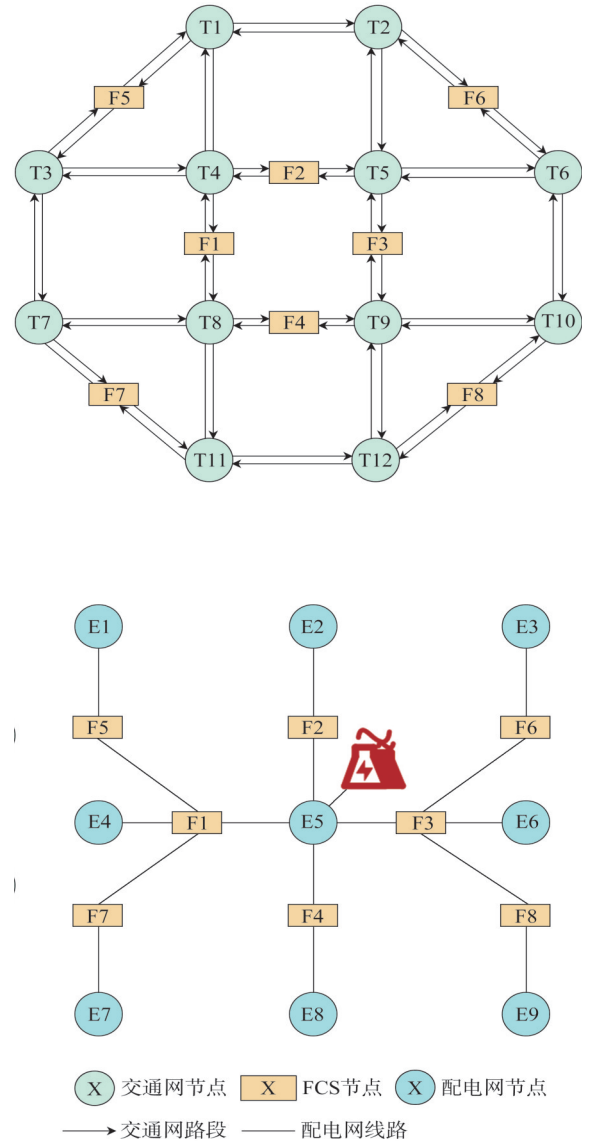


图4 20节点交通网和17节点配电网的拓扑
Fig.4 Topology of 20 node transportation network and 17 node distribution network

本文对交通网中含有两个 EVA 的情况开展研究,第1个 EVA 与 60% 的出行需求为 O-D1 的 EV 以及 40% 出行需求为 O-D2 的 EV 签订能源协议,而第2个 EVA 则与其余 40% 出行需求为 O-D1 的 EV 用户以及 60% 出行需求为 O-D2 的 EV 用户签订协议。设置优化时长为 24 h,即包括 24 个时间步长,每个时间步长为 60 min。表 1 列出了配电网线路潮流限值;表 2 列出了 EV 出行需求和相关的总 SOC;表 3 总结了小型网络中所有路段的相关参数。为防止 EV 过度放电影响电池使用寿命,将单个 EV SOC 的下限和上限分别设置为 0.2 和

1. 假定所有 EV 均在 08:00 由起点出发, 并给定 $\bar{N}_a^v = 2, \bar{N}_y^p = 100, p_l = \pm 0.1 \text{ pu}$ 。

表1 配电网的线路潮流限值

Table 1 Power flow limit of the distribution network 单位: kW

配电网线路	E5—F1(L1)	E5—F2(L2)	E5—F3(L3)	E5—F4(L4)
潮流上限	800	300	750	350

表2 交通网中EV的出行需求参数

Table 2 The travel demand parameters of EVs in the transportation network

起点	终点	$f_{i,t}^{m,d}$	$e_{i,t}^{m,d}$
T9	T1	5 000	2 000
T4	T10	5 000	2 000

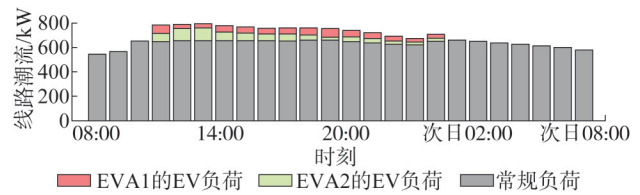
表3 交通网的道路参数

Table 3 Road parameters of transportation network

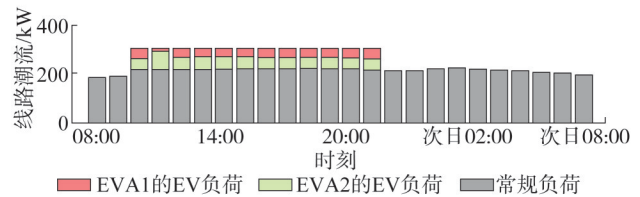
路段	$\bar{N}_a^v$	t_a^0/h	路段	$\bar{N}_a^v$	t_a^0/h
T1—T2	200	5	T1—T4	98	3
T2—T5	79	2	T3—T4	85	3
T5—T6	82	2	T3—T7	190	5
T6—T10	200	4	T7—T8	89	3
T9—T10	91	3	T8—T11	98	3
T9—T12	90	3	T1—F5	180	2
T3—F5	180	1	T2—F6	170	1
T6—F6	170	2	T4—F2	135	2
T5—F2	135	3	T4—F1	140	3
T8—F1	140	3	T8—F4	132	3
T9—F4	132	3	T5—F3	138	3
T9—F3	138	3	T7—F7	175	2
T11—F7	175	1	T12—F8	182	1
T10—F8	182	2	T11—T12	200	5

3.2 确定性阻塞管理策略的优化结果

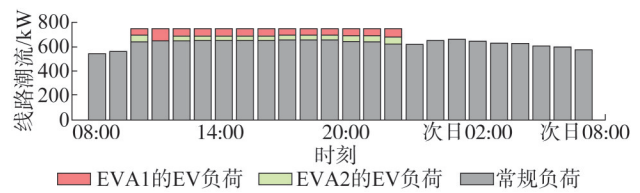
在该网络中, 在确定性阻塞管理策略下, 采用考虑 EV 时空灵活性的配电网阻塞管理方法后, 配电网线路潮流优化结果如图 5 所示。



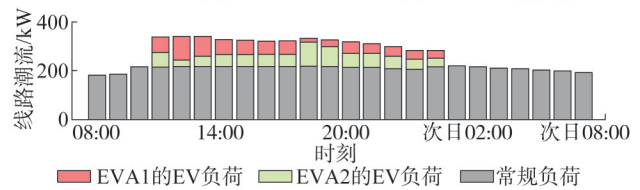
(a) 配电网线路 L1 上的潮流



(b) 配电网线路 L2 上的潮流



(c) 配电网线路 L3 上的潮流

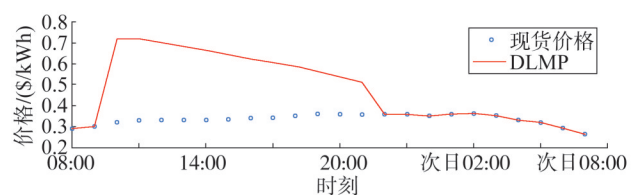


(d) 配电网线路 L4 上的潮流

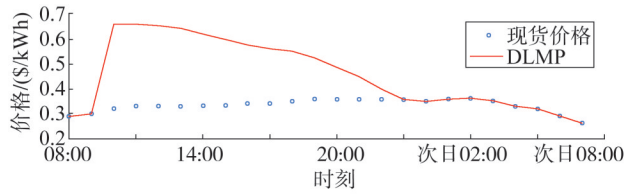
图5 确定性阻塞管理策略下的配电网阻塞管理结果

Fig.5 Results of distribution network congestion management under deterministic congestion management

由图 5 可以看出, 在确定性阻塞管理策略下, 采用考虑电动汽车时空灵活性的配电网阻塞管理方法后, 配电网各个线路的潮流均没有越限, 实现了有效的阻塞管理。获得的 DT 结果如图 6 所示, 具体数值如表 4 所示, 充电站充放电情况及电动汽车出行路径如图 7 及图 8 所示。



(a) 充电站 F2 上的现货价格及 DT



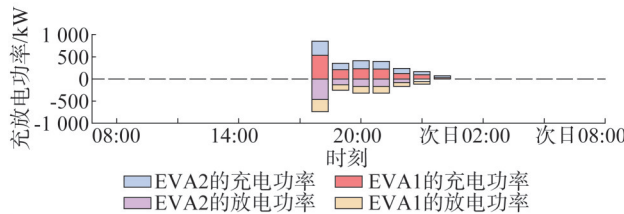
(b)充电站F3上的现货价格及DT

图6 确定性阻塞管理策略下经阻塞管理获得的DT
Fig.6 DT obtained through congestion management under deterministic congestion management

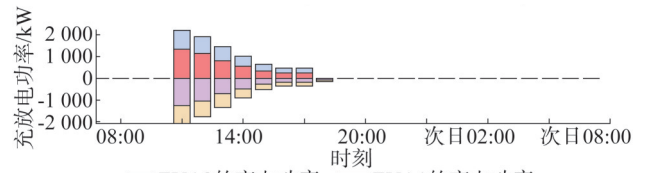
表4 确定性阻塞管理策略下获得的DT值
Table 4 DT values obtained under deterministic congestion management strategy 单位:\$/kWh

时刻	F2	F3	时刻	F2	F3
08:00	0	0	20:00	0.180 7	0.127 7
09:00	0	0	21:00	0.153 5	0.090 7
10:00	0.397 3	0.340 7	22:00	0	0.040 4
11:00	0.386 9	0.330 3	23:00	0	0
12:00	0.371 0	0.323 2	次日 00:00	0	0
13:00	0.354 4	0.312 8	次日 01:00	0	0
14:00	0.332 5	0.289 1	次日 02:00	0	0
15:00	0.309 6	0.265 4	次日 03:00	0	0
16:00	0.282 2	0.236 2	次日 04:00	0	0
17:00	0.263 0	0.220 5	次日 05:00	0	0
18:00	0.237 8	0.202 4	次日 06:00	0	0
19:00	0.207 0	0.167 2	次日 07:00	0	0

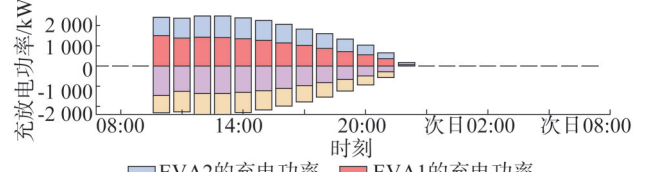
然而,实际上配电网内的风电、光伏等分布式能源及负荷均具有很强的不确定性,实际情况往往难以精确预测。假设配电网风电、光伏及负荷实际值均存在 10% 的预测误差,此时采用配电网阻塞管理方法后的配电网潮流结果如图 9 所示。



(a)充电站F1处的EV充放电功率

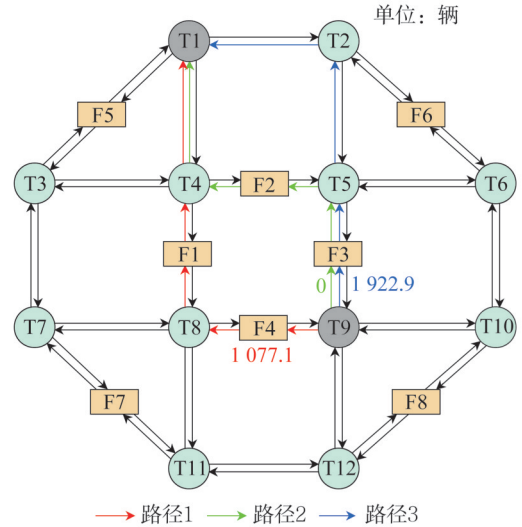


(b)充电站F4处的EV充放电功率

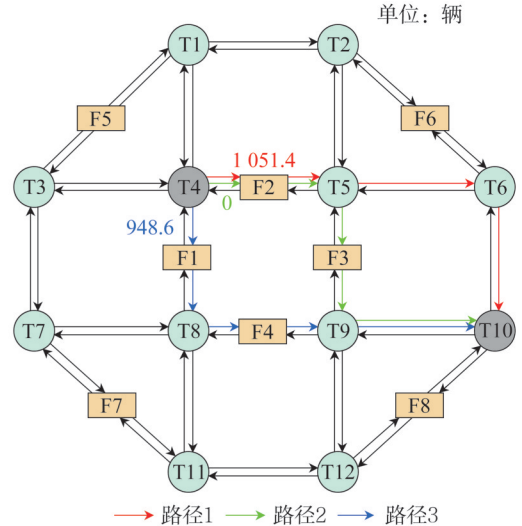


(c)充电站F3处的EV充放电功率

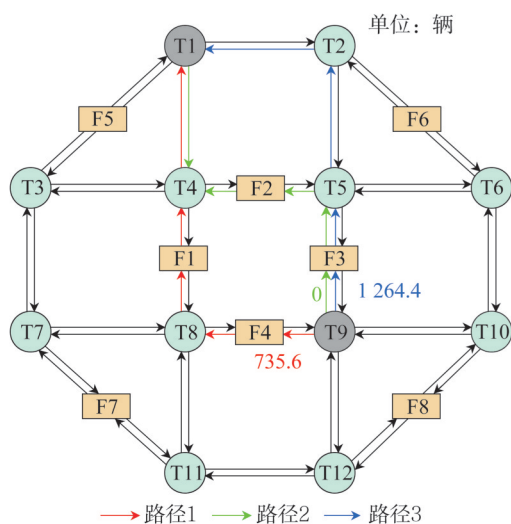
图7 确定性阻塞管理策略下出行需求为O-D1的EV在DT引导下的充放电功率
Fig.7 Charge and discharge power of EV with travel demand of O-D1 under DT guidance under deterministic congestion management



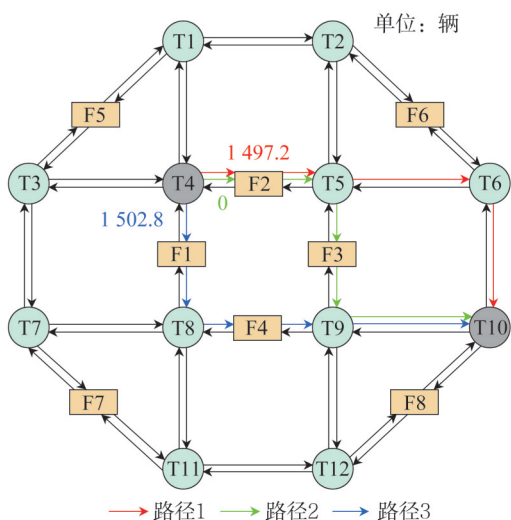
(a)第1个EVA内O-D1的出行需求



(b)第1个EVA内O-D2的出行需求



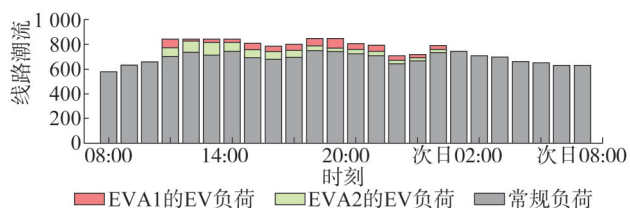
(c) 第2个EVA内O-D1的出行需求



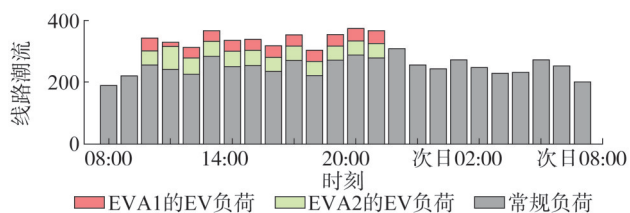
(d) 第2个EVA内O-D2的出行需求

图8 确定性阻塞管理策略下的EV出行行为

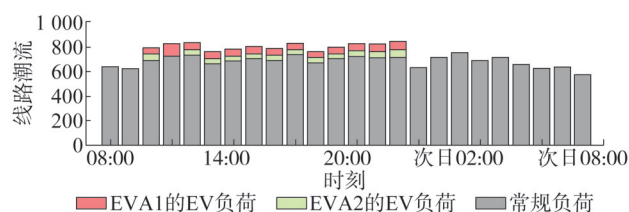
Fig.8 EV travel behavior under deterministic congestion management



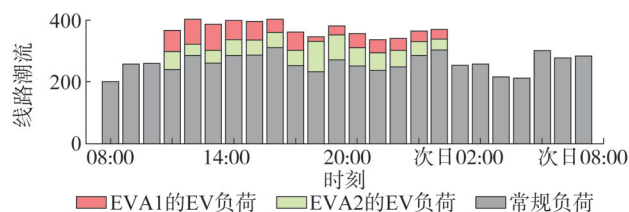
(a) 配电网线路L1上的潮流



(b) 配电网线路L2上的潮流



(c) 配电网线路L3上的潮流



(d) 配电网线路L4上的潮流

图9 确定性阻塞管理策略下实际波动的配电网潮流结果

Fig.9 Actual fluctuation of distribution network power flow results under deterministic blocking management

可以看出,在确定性阻塞管理策略下制定的阻塞管理策略,在实际应用场景中不确定因素波动的情况下,仍然可能存在阻塞管理失败的问题,影响配电网的安全稳定运行。因此进一步对考虑配电网中的风电、光伏以及负荷等不确定性因素下的配电网阻塞管理结果进行进一步分析。

3.3 鲁棒优化方法下的阻塞管理结果

在小型网络中,考虑配电网中的风电、光伏以及负荷等不确定性因素,对不确定参数进行建模,并采用鲁棒优化的方法进行考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理,其阻塞管理结果以及此时的DT分别如图10和图11所示,获得的DT具体数值如表5所示。

图10表明,即便是在配电网风电、光伏以及负荷波动至最极端的情况下,采用鲁棒优化方法下的考虑电动汽车时空灵活性的配电网阻塞管理策略仍然能够有效应对配电网风电、光伏以及常规负荷的波动性,实现考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理。与图5中确定性模型下考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理结果对比可知,考虑到配电网风电、光伏出力以及负荷的波动性,为了实现配电网的阻塞管理,配电网线路上的潮流在时空上进行了重新分布,避免在极端情况下配电网线路发生阻塞。

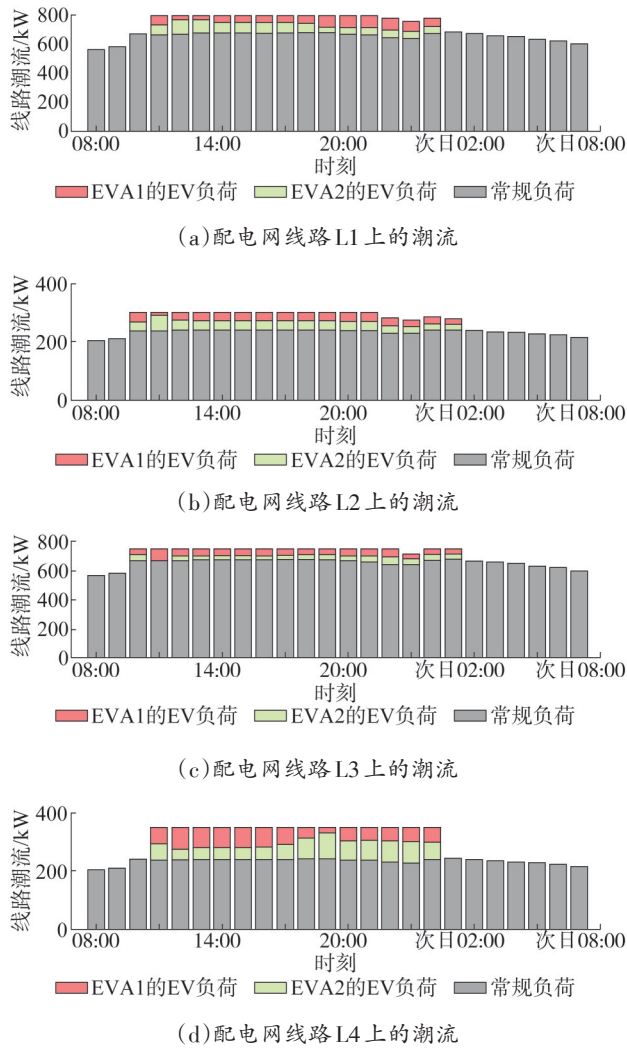


图10 考虑不确定因素时的配电网阻塞管理结果

Fig.10 The results of distribution network congestion management considering uncertain factors

图11进一步展示了不确定环境下小型网络在采用鲁棒优化方法后所获得的DT情况,其具体数值在表5中给出。由于此时配电网中的风电、光伏出力以及负荷均波动至最极端的状态,与图6相比,可以观察到阻塞时段更高的DT,以配电网线路L2的10时为例,确定性阻塞管理策略下获得的DT值为0.3973美元,而考虑不确定波动至最极端的情况时DT值为0.7738美元。更高的DT就会导致EVA内EV负荷将重新规划出行路径及充放电行为,协调配电网负荷,实现图10中不确定因素存在情况下有效的阻塞管理。

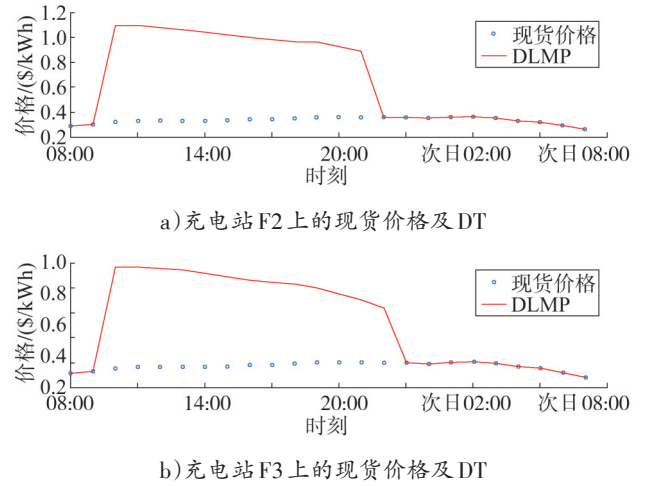


图11 考虑不确定因素时的经阻塞管理获得的DT

Fig.11 DT obtained through blocking management when considering uncertain factors

表5 考虑不确定因素时经阻塞管理获得的DT值

Table 5 DT values obtained through congestion management considering uncertain factors 单位:\$/kWh

时刻	F2	F3	时刻	F2	F3
08:00	0	0	20:00	0.565 8	0.439 0
09:00	0	0	21:00	0.530 1	0.402 1
10:00	0.773 8	0.652 1	22:00	0	0.351 8
11:00	0.763 4	0.641 7	23:00	0	0
12:00	0.747 5	0.634 6	次日 00:00	0	0
13:00	0.731 0	0.624 2	次日 01:00	0	0.002 5
14:00	0.709 0	0.600 5	次日 02:00	0	0
15:00	0.686 1	0.576 7	次日 03:00	0	0
16:00	0.658 8	0.547 6	次日 04:00	0	0
17:00	0.639 5	0.531 9	次日 05:00	0	0
18:00	0.614 3	0.513 7	次日 06:00	0	0
19:00	0.603 5	0.478 5	次日 07:00	0	0

图12为小型网络采用鲁棒优化方法后出行需求为O-D1的EV在DT引导下的充放电功率,通过与图7对比可得,充电站F1、F4上的充放电功率幅值有所增加,而充电站F3上的充放电功率幅值有所降低。这是由于波动至最极端情况时,配电网线路L3将面临更为严重的阻塞问题,促使部分EV改变其出行路径及充放电行为,在F1以及F4进行充放电,实现了配电网负荷在时空上的协调,避免了阻塞现象的发生。

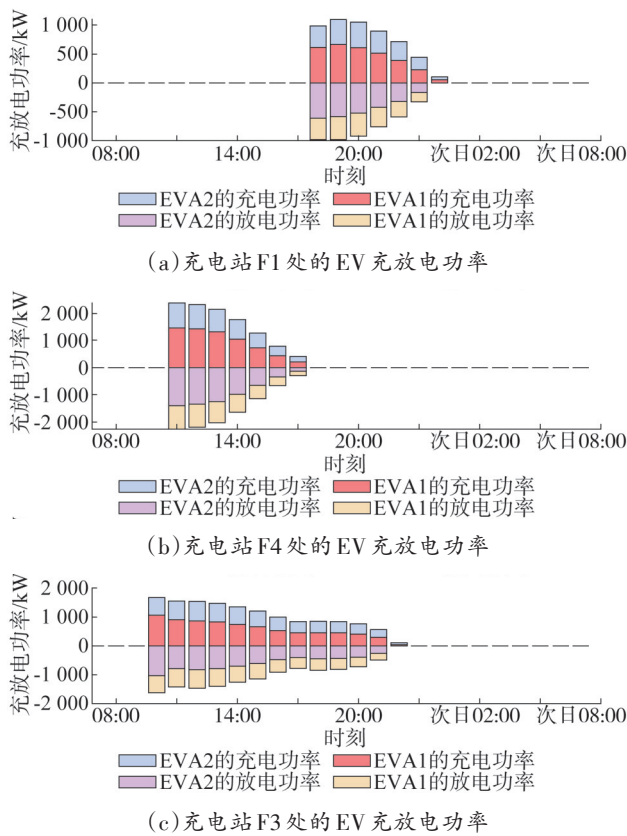
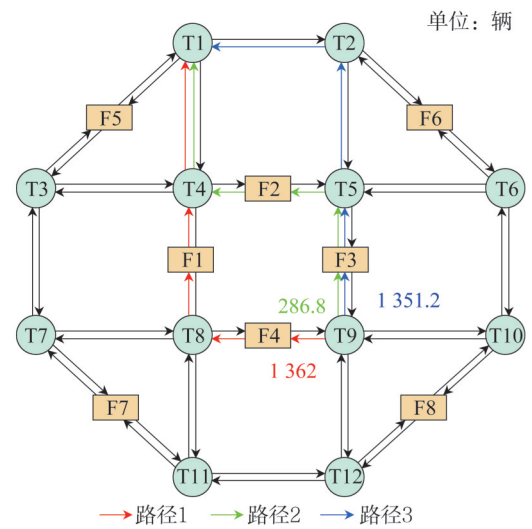


图12 考虑不确定因素时出行需求为O-D1的EV在DT引导下的充放电功率

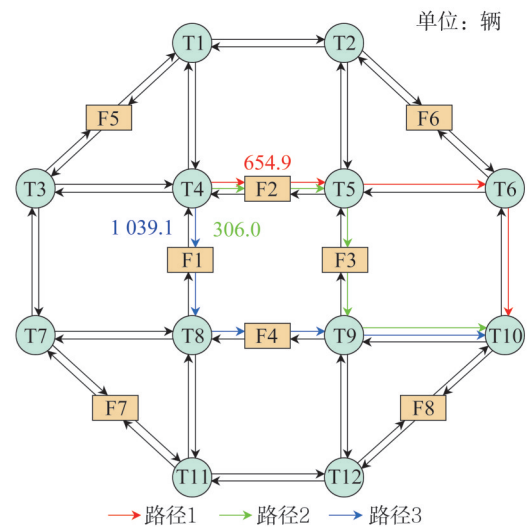
Fig.12 The charging and discharging power of an EV with a travel demand of O-D1 under DT guidance considering uncertain factors

进一步对小型网络采用鲁棒优化方法后的EV路径规划结果进行分析,如图13所示。与图8对比可得,对于第1个EVA内出行需求为O-D1的EV而言,约571.7个单位的EV将其出行路径由路径3更改为路径1及路径2,约396.5个单位的出行需求为O-D2的EV将其出行路径由路径1更改为路径2及路径3;对于第2个EVA内出行需求为O-D1的EV而言,约370.3个单位的出行需求为O-D1的EV将其出行路径由路径3更改为路径1及路径2,约560.3个单位的出行需求为O-D2的EV将其出行路径由路径1更改为路径2及路径3,相比于确定性阻塞管理策略的情况,进一步优化了EV的出行路径及充放电行为,实现了不确定环境下考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理。

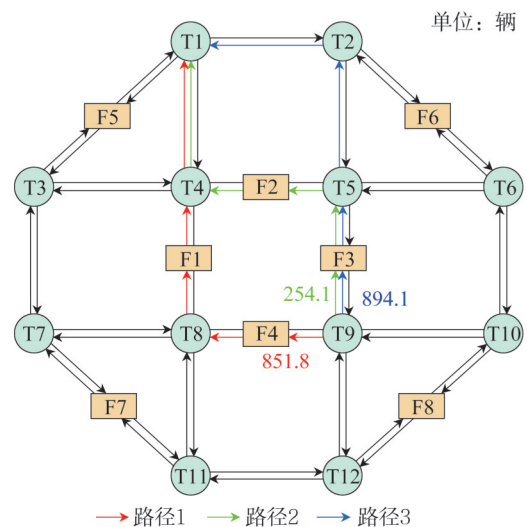
在小型网络中,当配电网中不确定因素的波动范围为其期望值的 $\pm 10\%$ 时,使用鲁棒优化方法下的



(a) 第1个EVA内O-D1的出行需求



(b) 第1个EVA内O-D2的出行需求



(c) 第2个EVA内O-D1的出行需求

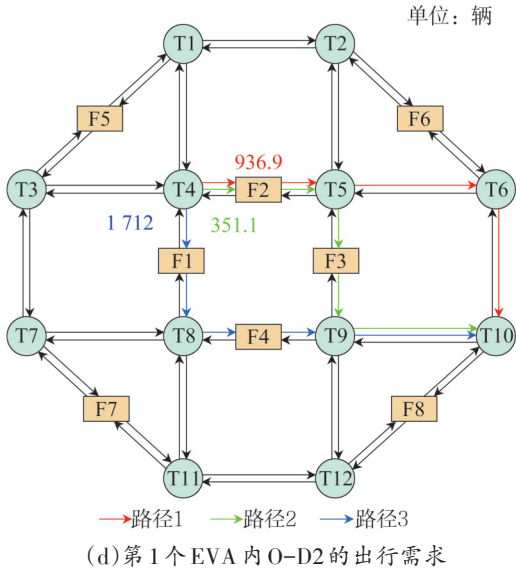


图13 考虑不确定因素时出行EV的出行行为

Fig.13 The travel behavior of EVs when considering uncertain factors

考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理策略后,其EV出行时间及充放电成本为5846.2美元,而未考虑不确定因素时制定的阻塞管理策略下EV出行时间及充放电成本为4537.4美元。这是由于受到图11以及表5中阻塞时段更高的DT值的影响,交通网中的EV充放电成本有所增加,此时EV将会通过更改出行路径及充电站的选择以最小化自身出行成本。尽管此时总成本有所增加,但也提升了阻塞管理结果的可靠性,使其能够应对一定的不确定性波动。

3.4 鲁棒控制参数的影响分析

为了更深入地验证本文所构建的不确定环境下考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理模型的合理性,设定多个不同的鲁棒控制参数,分别取0、0.3、0.5、0.8和1.0。在此基础上,对比分析了不同鲁棒控制参数下模型总成本的变化情况。图14为小型网

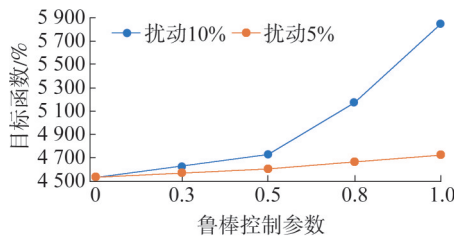


图14 不确定参数取不同鲁棒控制参数下总成本对比

Fig.14 Comparison of total costs under different robust control parameters for uncertain parameters

络中不确定参数扰动范围分别为5%和10%时目标函数随鲁棒控制参数变化的情况。

由图14可以看出,在鲁棒控制参数逐步增大的过程中,系统目标函数也呈现出相应的上升趋势,即EVA内EV的出行及充放电成本越高。当鲁棒控制参数变大,所获得的最优目标函数值也相应增大,这种趋势伴随着模型保守性的逐渐上升和最优性的相应下降,这一结果与实际情况相吻合。正如图11所示,在不确定参数波动至最极端的情况下,鲁棒优化方法下得到的DT比确定性阻塞管理策略下的更高,这就导致了出行时间及充放电成本的增加,此时优化结果的保守性上升而最优性下降。同时,在保持相同的鲁棒控制参数下,随着扰动范围的扩大,模型所面临的情景也愈发恶劣,导致其目标函数的值也随之增大,进一步验证了本文所构建模型的有效性。

4 结束语

针对不确定环境下基于DT的考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理鲁棒优化方法进行分析,在对配电网上的潮流及交通网侧出行行为进行建模的基础上,首先分析了配电网中存在的不确定因素,选定不确定参数(配电网风电、光伏出力以及负荷大小),对含不确定参数的约束条件进行转化,并引入鲁棒控制参数,采用相对鲁棒优化方法将含不确定参数的考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理模型转化为确定性模型,利用DT协调配电网中的EV负荷分布,有效实现了配电网的阻塞管理。通过一组网络仿真验证了所提出的鲁棒优化方法对于不确定环境下考虑EV时空灵活性的配电网阻塞管理的有效性,结果表明,所提出的方法在配电网中风电、光伏及负荷不确定波动的情况下,仍然能够充分发挥EV的时空灵活性,通过DT协调EV的出行及充放电行为,改变EV负荷的时空分布,优化配电网的负荷情况,有效避免配电网线路发生阻塞。此外,分析了鲁棒控制参数对优化结果的影响,结果表明,模型的鲁棒性随着鲁棒控制参数的增加而增加,而最优性随着鲁棒控制参数的增加而减小。在相同的鲁棒控制参数下,不确定参数的扰动范围越大,模型所面临的情景也愈发恶劣,模型鲁棒性上升而最优性下降。

参考文献

- [1] ABDULAAL A, CINTUGLU M H, ASFOUR S, et al. Solving the multivariant EV routing problem incorporating V2G and G2V options [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(1): 238–248.
- [2] 张帅, 刘一欣, 张宇轩, 等. 电动汽车接入对配电网运行特性影响的综合评估方法[J]. 浙江电力, 2022, 41(3): 1–10.
ZHANG Shuai, LIU Yixin, ZHANG Yuxuan, et al. A comprehensive assessment method for operational characteristics of distribution networks with the access of electric vehicles [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(3): 1–10.
- [3] MOGHADDAM Z, AHMAD I, HABIBI D, et al. Smart charging strategy for electric vehicle charging stations [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 76–88.
- [4] HU J J, SI C Y, LIND M, et al. Preventing distribution grid congestion by integrating indirect control in a hierarchical electric vehicles' management system [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(3): 290–299.
- [5] ABUR A. A modified linear programming method for distribution system reconfiguration [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1996, 18(7): 469–474.
- [6] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401–1407.
- [7] ENACHEANU B, RAISON B, CAIRE R, et al. Radial network reconfiguration using genetic algorithm based on the matroid theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(1): 186–195.
- [8] SHARIATKHAH M H, HAGHIFAM M R. Using feeder reconfiguration for congestion management of smart distribution network with high DG penetration [C]//CIRED 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid. IET, 2012: 1–4.
- [9] 张培深. 基于智能配电软开关和市场机制的有源配电网阻塞管理方法[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [10] MALEKPOUR A R, SEIFI A R. An optimal load shedding approach for distribution networks with DGs considering capacity deficiency modelling of bulked power supply [J]. Modern Applied Science, 2009, 3(5).
- [11] 周宇, 马汝祥, 卫志农, 等. 基于技术型虚拟电厂的配电网阻塞管理[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 302–308.
ZHOU Yu, MA Ruxiang, WEI Zhinong, et al. Research on congestion management of technological virtual power plant [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 302–308.
- [12] 虞悦. 电动汽车参与配电网阻塞管理的充电策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [13] 李丹阳. 主动配电网的阻塞管理[D]. 太原: 山西大学, 2020.
- [14] ALIZADEH M, WAI H T, GOLDSMITH A, et al. Retail and wholesale electricity pricing considering electric vehicle mobility [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2019, 6(1): 249–260.
- [15] CUI Y, HU Z C, DUAN X Y. Optimal pricing of public electric vehicle charging stations considering operations of coupled transportation and power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3278–3288.
- [16] ALIZADEH M, WAI H T, CHOWDHURY M, et al. Optimal pricing to manage electric vehicles in coupled power and transportation networks [J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 4(4): 863–875.
- [17] WEI W, WU L, WANG J H, et al. Network equilibrium of coupled transportation and power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6764–6779.
- [18] MANSHADI S D, KHODAYAR M E, ABDELGHANY K, et al. Wireless charging of electric vehicles in electricity and transportation networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4503–4512.
- [19] MENG F J, CHOWDHURY B H. Distribution LMP-based economic operation for future Smart Grid [C]//2011 IEEE Power and Energy Conference at Illinois. IEEE, 2011: 1–5.
- [20] HEYDT G T, CHOWDHURY B H, CROW M L, et al. Pricing and control in the next generation power distribution system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 907–914.
- [21] SHALOUDEGI K, MADINEHI N, HOSSEINIAN S H, et al. A novel policy for locational marginal price calculation in distribution systems based on loss reduction allocation using game theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 811–820.
- [22] XIE S W, WU Q W, HATZIARGYRIOU N D, et al. Collaborative pricing in a power-transportation coupled network: a variational inequality approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 783–795.
- [23] HUANG S J, WU Q W, NIELSEN A H, et al. Long term incentives for residential customers using dynamic tariff [C]//2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). IEEE, 2015: 1–5.
- [24] O'CONNELL N, WU Q W, ØSTERGAARD J, et al. Day-ahead tariffs for the alleviation of distribution grid congestion from electric vehicles [J]. Electric Power Systems Research, 2012, 92: 106–114.
- [25] HUANG S J, WU Q W, OREN S S, et al. Distribution locational marginal pricing through quadratic programming for congestion management in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2170–2178.
- [26] HUANG S J, WU Q W. Dynamic tariff-subsidy method for PV and V2G congestion management in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5851–5860.

- [27] SHEN F F, HUANG S J, WU Q W, et al. Comprehensive congestion management for distribution networks based on dynamic tariff, reconfiguration, and re-profiling product[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4795–4805.
- [28] NI L N, WEN F S, LIU W J, et al. Congestion management with demand response considering uncertainties of distributed generation outputs and market prices[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 66–78.
- [29] 孙辉, 沈钟浩, 周玮, 等. 电动汽车群响应的主动配电网阻塞调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5549–5559.
- SUN Hui, SHEN Zhonghao, ZHOU Wei, et al. Congestion dispatch research of active distribution network with electric vehicle group response[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5549–5559.
- [30] 苗曦云. 计及高比例新能源接入的受端电网阻塞管理研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [31] 梁凯迪, 李凤婷, 张高航. 考虑风电不确定性的主动配电网阻塞管理策略[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(24): 10345–10354.
- LIANG Kaidi, LI Fengting, ZHANG Gaohang. Active distribution network congestion management strategy considering wind power uncertainty [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(24): 10345–10354.
- [32] WANG H R, YE Y J, WANG Q, et al. An efficient LP-based approach for spatial-temporal coordination of electric vehicles in electricity-transportation nexus [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2914–2925.
- [33] 王艳丽. 不确定环境下电动汽车城市配送充换电站 LRP 鲁棒优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [34] 于丹文, 杨明, 翟鹤峰, 等. 鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 134–143.
- YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, et al. An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision-making [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 134–143.
- [35] 向加佳, 刘顺成, 周灿. 采用盒式鲁棒优化的并网光伏电站极限容量计算[J]. 湖南电力, 2019, 39(4): 27–30.
- XIANG Jiajia, LIU Shuncheng, ZHOU Can. Capacity limit calculation of grid-connected photovoltaic power station based on cassette robust optimization [J]. Hunan Electric Power, 2019, 39(4): 27–30.
- [36] 丘文千. 基于交流潮流模型的电网供电能力评价算法[J]. 浙江电力, 2007, 26(2): 1–4.
- QIU Wenqian. Algorithm for evaluating power supply capability of power system based on AC power flow model [J]. Zhejiang Electric Power, 2007, 26(2): 1–4.
- 收稿日期: 2024-06-11
修回日期: 2024-11-22
作者简介:
林思瑶(2000), 女, 硕士, 主要研究方向为配电网阻塞管理;
马 晓(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网优化运行;
贺 坤(1985), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网优化运行;
王 灿(1969), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电网优化运行;
沈非凡(1992), 通信作者(shenfeifan@hnu.edu.cn), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为主动配电网优化运行。
- (责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.003

基于改进遗传算法的交直流混联电网的无功优化方法

雷宇立,周承君,幸爱玲,牛涛*,方斯顿

(重庆大学电气工程学院,重庆 400044)

摘要:随着中国经济的持续增长,对能源的需求也在不断上升。然而,由于一次能源与负荷中心的逆向分布,采用新能源进行大规模远距离输电已成为行业内的迫切需求。在众多输电技术中,基于换相换流器的高压直流输电技术(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)具有无功消耗特性,可能加剧电网的电压波动与无功平衡的问题。针对这一挑战,重点研究交直流混联电网,并构建了一个旨在优化无功功率的数学模型。为克服遗传算法在初始种群选取困难和易早熟的问题,对传统遗传算法进行了创新性改进。在改进后的IEEE 14节点系统和IEEE 39节点系统上进行系列实验验证,所提改进遗传算法展现出显著的实用性和有效性。该算法能够有效优化电网的无功功率,显著提升电网运行的稳定性和效率,为电网无功优化提供了一种新的解决方案。

关键词:高压直流输电;遗传算法;交直流电网;无功优化

中图分类号:TM744;TM721.1

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)01-0028-10

Reactive Power Optimization Method for AC/DC Hybrid Power Grids Based on Improved Genetic Algorithms

LEI Yuli, ZHOU Chengjun, XING Ailing, NIU Tao*, FANG Sidun

(School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: With the continuous growth of China's economy, the demand for energy is also rising steadily. However, due to the inverse distribution of primary energy sources and load centers, the need for large-scale, long-distance transmission of new energy has become an urgent requirement industry requirement. Among the many transmission technologies, line commutated converters for high voltage direct current (LCC-HVDC) may aggravate the problem of voltage fluctuation and reactive power balance in the power grid due to their reactive power consumption characteristics. In response to this challenge, this paper focuses on the study of hybrid AC/DC power grids and constructs a mathematical model aimed at optimizing reactive power. To overcome the problems of initial population selection and premature convergence in genetic algorithms, this paper introduces innovative improvements to the traditional genetic algorithm. Through a series of experimental validations conducted on the improved IEEE 14-node and IEEE 39-node systems, the improved genetic algorithm proposed in this paper demonstrates its significant practicality and effectiveness. The algorithm can effectively optimize the reactive power in the power grid, significantly enhancing the stability and efficiency of the power grid's operation, and it provides a new solution for reactive power optimization in power grids.

Keywords: high-voltage direct current transmission; genetic algorithm; AC/DC power grid; reactive power optimization

0 引言

随着世界经济的发展,对于能源的需求不断提高,但在化石能源逐渐枯竭以及环境保护呼声日益高涨的背景下,全球对能源供应提出了新需求^[1-3]。我国清洁能源资源和负荷中心逆向分布,新能源主

要集中在西部和北部地区,而主要的负荷中心在我国东部地区和东南沿海地区。高压直流(high voltage direct current, HVDC)大规模、远距离输电成本低,占地面积少,无同步稳定性问题。目前,我国已建成多条高压直流输电通道,缓解了东部地区电力能源紧张的局面,促进了东部地区经济发展,同时也将西部地区的资源优势转换为经济优势,促进了当地的经济^[4-5]。未来,“西电东送”将形成北、

基金项目:国家自然科学基金项目(52377075)。
National Natural Science Foundation of China(52377075)。

中、南三路送电线路,并规划到2025年西电东送能力达到3.6亿kW以上。随着越来越多的直流投运,“弱交强直”的格局也愈发明显。目前,无功不足引发的电压安全问题导致电网频繁发生换相失败故障,甚至有可能诱发大规模连锁故障^[6-7]。

当前电力系统的一个重要研究方向为无功优化,将电网的电压安全稳定作为约束,同时考虑系统网损以及越限等因素,兼顾了系统的安全性与经济性^[8]。当前求解电力系统无功优化的方法主要有两大类,一类是经典优化算法,另一类则是现在兴起的各种人工智能算法。经典算法主要有线性规划、整数规划、非线性规划、动态规划以及随机规划等^[9-14]。人工智能算法主要包括遗传算法、粒子群算法、蚁群算法等^[15-19]。文献[19]对启发式动态规划(action dependent heuristic dynamic programming, ADHDP)方法进行了仿真,并与执行网络、评价网络均采用反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)设计的经典ADHDP控制方法的控制效果进行了对比,验证了基于ADHDP的SVC电压优化控制方法的可行性和有效性。文献[20]针对含高比例风电馈入系统的动态无功备用优化问题,提出一种计及暂态电压安全约束的广义主从分裂优化算法,实现主从系统的协同优化,同时保证计算的精度和收敛性。

经典算法的优点在于其可解释性强、灵活性高、系统性强,并且确保所找到的解都是可行的,可以满足实际的需求。但是其在实际求解时,模型的复杂度可能很大,尤其是问题规模较大时,而且经典算法对数据要求高,建模难度也较大,在求解时很可能会陷入局优解。

本文主要针对交直流混联电网进行研究,建立交直流电网的无功优化模型,将遗传算法与优化模型结合起来,并针对遗传算法初始种群选取困难、易出现早熟现象等问题对基本遗传算法进行改进,并在改进IEEE 14节点系统和改进IEEE 39节点系统中进行测试,验证了所提方法的可行性。

1 交直流电网无功优化数学模型

基于电流换流器的高压直流输电(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)具有输电功率大、电压等级高、成本低以及无同步稳定运行问题等优势,目前已成为全球直流输

电的重要方式。交直流混联系统的无功优化是一个多约束、非线性的优化问题。本节主要介绍直流输电核心——换流站模型以及系统内可调控的无功资源模型,提出了无功优化模型^[21]。

1.1 换流站模型

如图1所示,LCC-HVDC系统的主要组成部分有换流站、直流线路以及控制系统。其中,换流站用于实现交直流之间的能量转换,是交直流混联系统的核心组成部分。换流站主要由整流器、逆变器、滤波器以及换流变压器等多个部件组成。由整流/逆变器对电能进行交直流变换,另外还需要在直流侧加装滤波装置消除谐波和噪声,以保证传输的电能质量^[22-23]。

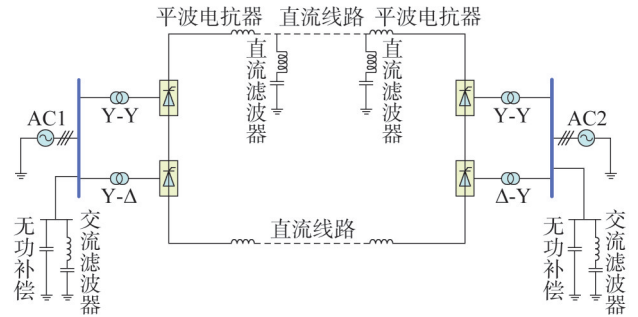


图1 LCC-HVDC示意图

Fig.1 LCC-HVDC schematic diagram

采用稳态模型,将换流器看成一个整体,忽略其内部换流阀的详细动作过程,重点关注换流的外部输入/输出特性^[24]。式(1)一式(4)为换流站的稳态方程。

$$\begin{cases} U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{acr} T_r \cos\alpha - \frac{3}{\pi} X_{cr} I_d \\ U_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{acr} T_r \cos\varphi_r \\ P_{dr} = U_{dr} I_d \\ Q_{dr} = P_{dr} \tan\varphi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{aci} T_i \cos\alpha - \frac{3}{\pi} X_{ci} I_d \\ U_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_{aci} T_i \cos\varphi_i \\ P_{di} = U_{di} I_d \\ Q_{di} = P_{di} \tan\varphi_i \end{cases} \quad (2)$$

$$I_d = I_d^{\text{ref}}, \gamma = \gamma^{\text{ref}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \alpha = \pi - \beta_r \\ \cos \beta_i + \cos \gamma = 2 \cos \varphi_i \end{cases} \quad (4)$$

式中:下标 r 表示整流侧;下标 i 表示逆变侧; U_d 为直流电压; U_{ac} 为交流电压; T 为换流变压器变比; X_c 为换流站的等效电抗; I_d 为直流电流; α 为触发角; I_d^{ref} 为直流电流参考值; β 为触发超前角; γ 为逆变侧熄弧角; γ^{ref} 为逆变侧熄弧角参考值; φ 为功率因数角; P_d 、 Q_d 分别为直流有功功率和无功功率。

图2为换流器控制稳态特性,系统稳态时,整流器采用恒电流控制(constant current control, CC),维持恒定电流,在图中表示为 AB 段;逆变侧则采用定熄弧角控制(constant extinction angle control, CEA)以维持足够的换相裕度,在图中表示为 GF 段,当前运行点为 E。当系统出现故障或无功不足等情况时,整流器会降压运行,此时的控制模式为定触发角控制(constant ignition angle control, CIA),此时的逆变器运行于定电流控制模式^[25-26],运行点为 H。当系统降压运行于 H 点时,会导致逆变侧的输出功率减少,进而导致逆变侧的电压波动大,影响整个系统的稳定性和可靠性,故足够的无功支撑能力是必要的。

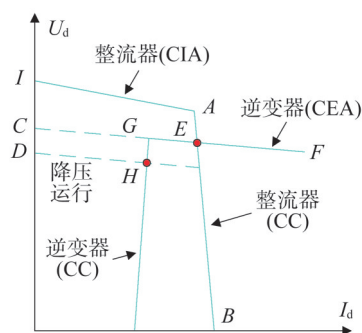


图2 换流器控制稳态特性

Fig.2 Converter controls steady-state characteristics

1.2 无功设备

1.2.1 电容器组

电容器组作为一种无源装置,可以通过吸收或发出无功功率的方式来平衡交直流系统中的无功功率。通常将电容器组安装在无功功率消耗较大或者电压较薄弱的位置,比如新能源场站的出口处、直流换流站附近、配电枢纽等。电容器在电力系统的出力为

$$Q_c = U_c^2 \omega_c C \quad (5)$$

式中: Q_c 为电容器组的无功出力; U_c 为电容器接入点的电压; ω_c 为电容器的角频率; C 为电容器的电容量。

由式(5)可以看出,电容器的无功出力只能通过调控自身的电容量来调节,电网中会设置电容器组,通过调节电容器组的档位来调节无功出力。

1.2.2 有载可调变压器

有载可调变压器(on load tap changer, OLTC)可以通过自动调节变压的匝数,使电力系统中的电压保持在安全范围内。虽然其无法直接为系统提供无功功率,但是它的调节能力可以对系统的无功功率产生影响。电网中的无功功率主要是由于存在电容电感以及各种电力电子器件而产生的,OLTC 的输出电压与电网电压之间存在差异时,同样会导致电感负载和电容负载的无功功率发生变化。当变压器的输出电压下降时,负载端的电流就会增加,从而增加电感性负载的无功功率,同时减少电容性负载的无功功率。但是 OLTC 的使用本身也是会消耗无功功率的,如果系统本身就缺少无功功率,使用 OLTC 调节升高电压则会进一步扩大无功不足,严重时可能使系统崩溃。由于 OLTC 的调压速度较快,可以在系统调节瞬间对无功功率进行有效调节。因此,利用 OLTC 可以实现一定程度的无功补偿,以实现系统的电能品质提高和无功平衡。

1.2.3 发电机组

发电机组是电力系统中的重要组成部分,其不仅是系统中唯一的有功源,还是重要的无功源。发电机可以通过调节其机端输出电压来调节无功功率,无功功率随着机端电压的增大而增大。但是发电机的有功功率和无功功率受到一定的限制,必须要保证发电机的出力在合理范围内,否则也会导致系统的不稳定。

在电力系统中仅靠单种无功设备来支撑系统是不够的,电容器是静态无功设备,OLTC 和发电机是动态无功设备,只有各种无功设备相互配合,才能经济性和安全性得以兼顾,保障电网的安全稳定运行。

静态无功设备如电容器可以提供稳定的无功补偿,但其输出能力固定,无法快速响应系统电网的波动。相比之下,动态无功设备如 OLTC 和发电机具有更灵活的调节特性,可以在短时间内响应电网的波动,调节其输出的无功功率,从而维持系统的无功

功率平衡和电压稳定性。因此,为保障电网的安全稳定运行,需要将各种无功设备进行合理的组合,实现各种无功设备的优势互补,以满足系统对无功功率平衡和电压稳定性的要求。

1.3 无功优化模型

为优化电力系统中的无功功率,统筹协调各种无功设备使系统达到最优的运行状态,优化问题的一般形式表示为

$$\begin{cases} \min F(x, u) \\ G(u, x) = 0 \\ H(u, x) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F(x, u)$ 为目标函数; x 为状态变量; u 为控制变量; $G(u, x)$ 和 $H(u, x)$ 分别为模型中的等式约束和不等式约束。

一般来说,电力系统无功优化的目标为经济成本最低、损耗最小、电压稳定性最高等,在本文中则以网络损耗最小为无功优化的目标。

1.3.1 目标函数

该优化以系统有功功率网络损耗最小为目标函数,同时将各个节点电压以及发电机无功出力的越限情况纳入考虑,并将其作为惩罚函数加入目标函数中。

目标函数的优化可以通过调整电力系统中各个电容器组的投切、OLTC的变比以及发电机的无功出力来实现。

惩罚函数则是基于电力系统中各个节点的电压和发电机的无功出力来实现的。当电压或无功出力超过一定范围时,惩罚函数会对目标函数产生影响,从而对电力系统的优化进行限制。通过引入目标函数和惩罚函数,本文在电力系统优化中实现了对网络损耗、电压稳定性和无功功率控制等多方面因素的综合考虑,从而提高电力系统的经济性和稳定性。这种优化方法在电力系统领域已经得到广泛应用,并取得了显著的优化效果。其目标函数为

$$\min F = P_{\text{loss}} + \lambda \sum_{i=1}^{N_{\text{bus}}} \Delta U_i^2 + \mu \sum_{k=1}^{N_{\text{gen}}} \Delta Q_{g,k}^2 \quad (7)$$

式中: P_{loss} 为系统的有功功率网络损耗; ΔU_i 为节点 i 处的电压越限量; $\Delta Q_{g,k}$ 为发电机 k 的无功出力越限量; N_{bus} 为系统的节点数; N_{gen} 为系统的发电机数量; λ 和 μ

为越限的惩罚系数,在本文中分别取 1.032 和 1.025。

系统有功网损可表示为

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{loss}}^{\text{ac}} + P_{\text{loss}}^{\text{dc}} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{loss}}^{\text{ac}}$ 为交流系统侧有功网损; $P_{\text{loss}}^{\text{dc}}$ 为直流侧有功网损。

$$P_{\text{loss}}^{\text{ac}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{bran,ac}}} G_{ij} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij}) \quad (9)$$

$$P_{\text{loss}}^{\text{dc}} = \sum_{h=1}^{N_{\text{bran,dc}}} I_{d,h}^2 R_{d,h} \quad (10)$$

式中: U_i 、 U_j 分别为节点 i 、节点 j 处的节点电压; G_{ij} 和 θ_{ij} 分别为 ij 之间的电导和相角差; $N_{\text{bran,ac}}$ 和 $N_{\text{bran,dc}}$ 分别为交流线路和直流线路的数量; $I_{d,h}$ 和 $R_{d,h}$ 分别为第 h 条直流线路的电流和等效电阻。

节点电压越限量 ΔU_i 和发电机无功出力越限量 $\Delta Q_{g,k}$ 可表示为

$$\begin{cases} \Delta U_i = \frac{U_i - U_i^{\text{lim}}}{U_i^{\text{max}} - U_i^{\text{min}}} \\ \Delta Q_{g,k} = \frac{Q_{g,k} - Q_{g,k}^{\text{lim}}}{Q_{g,k}^{\text{max}} - Q_{g,k}^{\text{min}}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_i^{lim} 、 $Q_{g,k}^{\text{lim}}$ 分别为节点 i 电压和发电机 k 无功出力的运行参考范围,从图3可以看出其取值范围; U_i^{max} 、 U_i^{min} 分别为节点 i 电压的最大值、最小值; $Q_{g,k}^{\text{max}}$ 、 $Q_{g,k}^{\text{min}}$ 分别为发电机 k 无功出力的最大值、最小值。

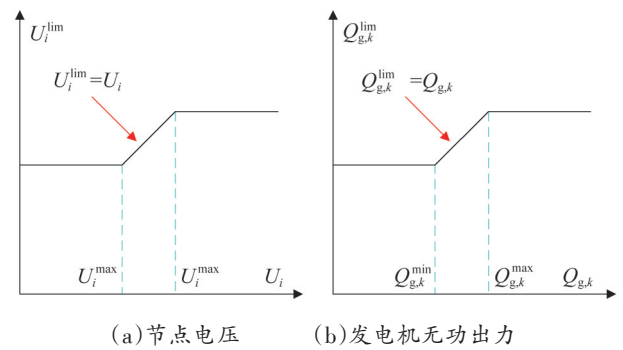


图3 节点电压和发电机无功出力运行范围

Fig.3 Node voltage and generator reactive output operating range

1.3.2 约束条件

1) 等式约束。

$$P_{g,i} - P_{L,i} - P_{D,i} = \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (12)$$

$$Q_{g,i} - Q_{L,i} - Q_{D,i} + Q_{C,i} = U_i \sum_{j=1}^{N_{\text{bus}}} (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (13)$$

式中: $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 的有功负荷和无功负荷; $P_{D,i}$ 、 $Q_{D,i}$ 分别为节点 i 处换流站的有功消耗和无功消耗; $Q_{C,i}$ 为节点 i 处电容器的补偿无功功率; B_{ij} 为 ij 之间的电纳; $P_{g,i}$ 、 $Q_{g,i}$ 分别为节点 i 处发电机的有功输出和无功输出。式(12)、式(13)分别表示直流功率、交流功率的潮流约束。

2) 不等式约束。

本文的不等式约束主要涉及电力系统中的控制变量(电容器组的投切状态、OLTC 的变比、发电机组的机端电压)和状态变量(发电机的无功出力、系统的节点电压)。这些约束用于确保电力系统的安全稳定运行,并通过数学建模和优化技术进行处理。

$$\begin{cases} T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \\ T_i = T_i^{\min} + k_T \Delta T \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} Q_{C,i}^{\min} \leq Q_{C,i} \leq Q_{C,i}^{\max} \\ Q_{C,i} = k_C \Delta Q_{C,i} \end{cases} \quad (15)$$

$$U_{g,i}^{\min} \leq U_{g,i} \leq U_{g,i}^{\max} \quad (16)$$

式中: T_i 为变压器的变比; $T_i^{\max}$ 、 $T_i^{\min}$ 分别为变压器变比的上下限; $U_{g,i}$ 为发电机的机端电压; $Q_{C,i}$ 为电容器组无功出力; $Q_{C,i}^{\max}$ 、 $Q_{C,i}^{\min}$ 分别为电容器组无功出力的上下限; $U_{g,i}$ 为发电机机端电压; $U_{g,i}^{\max}$ 、 $U_{g,i}^{\min}$ 分别为发电机机端电压的上下限; k_T 为变压器调节档位; k_C 为变压器投入运行的电容器组数; ΔT 为变压器可调节的最小档位差; $\Delta Q_{C,i}$ 为电容器组可调节的最小档位差,变压器变比和电容器组的调节是非连续的。

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (17)$$

$$Q_{g,i}^{\min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{\max} \quad (18)$$

式中: $U_i^{\max}$ 、 $U_i^{\min}$ 分别为节点 i 电压的上下限; $Q_{g,i}^{\max}$ 、 $Q_{g,i}^{\min}$ 分别为节点 i 处发电机无功出力的上下限。

2 基于改进遗传算法的交直流混联电网无功优化方法

2.1 改进遗传算法

2.1.1 初始种群选取的改进

在遗传算法中,初值选取对于问题的收敛性和求解效果发挥着重要的影响。通常情况下,初值是随机选取的。然而,如果初值选择得不好,可能会导

致问题的收敛性变差,进而对优化问题的求解产生负面影响。为优化该过程,本文采纳了如下策略:首先,通过随机生成的方式,创造了一批数量是原始种群两倍的个体;随后,精选出适应性较强的个体构建初始种群,并将这批个体引入算法的后续运算中。这项改进旨在提升算法的收敛速度,以便更加高效地应对优化问题。

2.1.2 适应度函数的改进

适应度函数是遗传算法中的关键部分,用于评估个体的优劣。一个种群涵盖的基因库越大,种群的多样性就越多,进化的方向也就更多,有更高的潜力找到全局最优解。然而,算法的迭代会导致优秀个体占主导地位,使种群失去多样性并出现早熟现象。为保持多样性和提升找到全局最优解的可能性,可以改进适应度计算方法,缩小个体之间的适应度差异。这样可以有效防止早熟现象,提高算法的性能。

$$F_{\text{imp}} = \begin{cases} F \cdot e^{F - F_{\text{ave}}} & , t \leq \frac{2T}{3} \\ F \cdot \left(1 + \frac{1}{e^{|F - F_{\text{ave}}|}} \right) & , t > \frac{2T}{3} \end{cases} \quad (19)$$

式中: F_{imp} 为重新计算的适应度值; F 为传统适应度计算方法算出的适应度值; F_{ave} 为传统适应度计算出的平均值; T 为总的迭代次数; t 为当前迭代次数。

在算法初期,适应度函数的改进会导致适应度值较大的个体更加突出,适应度值较小的个体则相对被弱化。这样可以扩大个体之间的适应度差距,有利于筛选和保留具有较好基因的个体。到了算法后期,优秀个体的适应度值更大,同时适应度值较低的个体经过改进后,其适应度值的增加程度也增大。这样的处理策略既提高了优秀个体进入下一代的机会,又能够保持种群的多样性,避免早熟现象的发生,从而更可能找到全局最优解。通过这样的适应度函数改进策略,可以在算法的不同阶段中平衡个体之间的适应度差异,兼顾多样性和优良性,提高遗传算法的全局搜索能力。

2.1.3 交叉、变异操作的改进

遗传算法中的交叉和变异操作都是通过改变个体的基因组合来产生新的后代个体。交叉操作主要用于基因交换,引入新的组合方式;而变异操作则是

在已有基因的基础上进行随机改变,引入新的个体差异。通过这两种操作,可以保持种群的多样性,增加搜索空间,促进优良基因的传递和新的基因组合的产生。

1) 交叉操作。

为解决交叉操作出现局部最优解问题,提出了一种改进方法,即在交叉遗传中引入多个交叉点,然后将这些交叉点之间的编码串进行互换,以增加优良基因的遗传概率。传统遗传算法中的交叉概率 P_c 通常是一个固定值,但无法适用于所有问题。如果选择过大的 P_c 值,会导致新个体生成速度过快,容易破坏上一代的优良基因;而选择过小的 P_c 值,则会导致搜索速度缓慢。针对上述问题,本文提出一种自适应调整的交叉概率计算方法,其表达式为

$$P_c = \begin{cases} P_c^{\max} & , f_1 \leq f_{ave} \\ P_c^{\max} - \frac{(P_c^{\max} - P_c^{\min})(f_1 - f_{ave})}{f_{\max} - f_{ave}} & , f_{ave} < f_1 \leq 2f_{ave} \\ 0 & , f_1 > 2f_{ave} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_c^{\max}$ 、 $P_c^{\min}$ 分别为交叉概率的上下限; $f_{\max}$ 、 f_{ave} 分别为整个种群的最大适应度和平均适应度; f_1 为所选配对的两个个体中适应度较大个体的适应度值。

式(20)表达的含义是在适应度较小时,促进其尽可能多的交叉变异;当适应度高于平均值时,减小交叉概率,尽可能保留优良基因;当适应度已经很高时就不再变异,使得优良个体的基因可以完全保留下来。这样随着种群的不断进化可以动态地调整交叉概率,兼顾了优化求解的速度与全局寻优能力。

2) 变异操作。

变异操作是保证种群多样性的重要手段,变异概率 P_m 的设置对算法求解很重要,如果设置的太大可能会破坏优质基因,使得种群朝着更劣质的方向发展;如果设置的太小会使得进化速度很慢,延长了算法的计算时间。针对上述问题,本文提出一种自适应调整的交叉概率计算方法,其表达式为

$$P_m = \begin{cases} P_m^{\max} & , f_1 \leq f_{ave} \\ P_m^{\max} - \frac{(P_m^{\max} - P_m^{\min})(f_{\max} - f_1)}{f_{\max} - f_{ave}} & , f_{ave} < f_1 < 2f_{ave} \\ 0 & , f_1 \geq 2f_{ave} \end{cases} \quad (21)$$

式中: $P_m^{\max}$ 、 $P_m^{\min}$ 分别为变异概率的上下限。

由式(21)可以看出,当适应度较低时,应当增大变异概率以求寻优良个体;当适应度逐渐上升时,应该逐渐降低变异概率;当个体的适应度已经很高时,应该停止变异以保留其优质基因。这样随着种群的不断进化可以动态地调整变异概率,也可以提高算法求解的收敛速度。

2.2 改进遗传算法求解流程

根据上文对遗传算法在初始种群选取、适应度函数和交叉、变异操作里的改进,本文提出了一种基于改进遗传算法的交直流混联电网无功优化方法,其具体流程如图4所示。

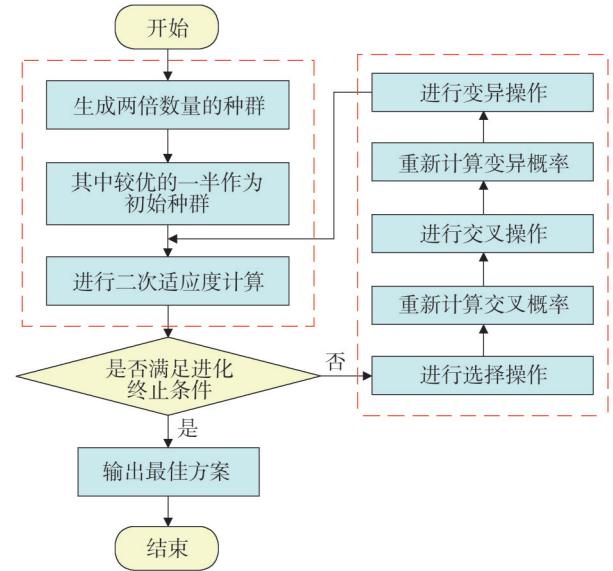


图4 改进遗传算法流程

Fig.4 Improved genetic algorithm flow chart

3 算例分析

3.1 系统介绍

为验证所提方法的有效性,以改进 IEEE 14 节点系统和改进 IEEE 39 节点系统为例,将其中部分线路改装为直流线路,部分发电机改装为风机,其系统结构如图5、图6所示,图中G表示发电机,W表示风机,T1—T4表示变压器。系统的控制变量和状态变量约束如表1—表3所示,表中 U_G 为发电机的电压标么值; Q_C 为电容器的无功输出标么值; Q_G 为发电机的无功输出。

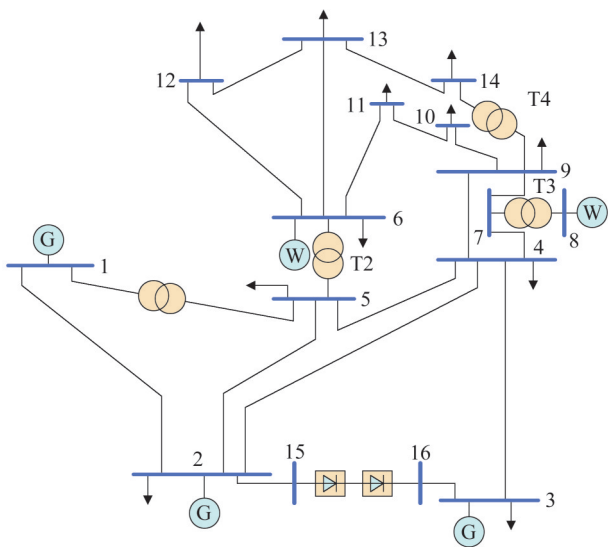


图5 改进IEEE 14节点结构
Fig.5 Improved IEEE 14 node structure diagram

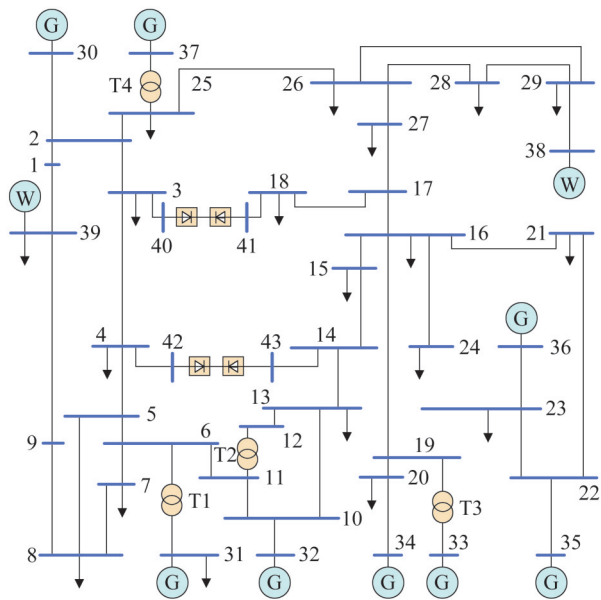


图6 改进IEEE 39节点结构
Fig.6 Improved IEEE 39 node structure diagram

表1 控制变量限值
Table 1 Control variable limits

参数	上限	下限	步长
U_c/pu	1.1	0.9	
T_i	1.1	0.9	0.02
Q_c/pu	0.5	0	0.1

表2 IEEE 14节点系统状态变量限值

Table 2 IEEE 14 node system state variable limits

参数	上限	下限
Q_{G1}/Mvar	10	0
Q_{G2}/Mvar	50	-40
Q_{G3}/Mvar	40	0
U_i/pu	1.1	0.9

表3 IEEE 39节点系统状态变量限值

Table 3 IEEE 39 node system state variable limits

参数	上限	下限
Q_{G30}/Mvar	400	140
Q_{G31}/Mvar	300	-100
Q_{G32}/Mvar	300	150
Q_{G33}/Mvar	250	0
Q_{G34}/Mvar	167	0
Q_{G35}/Mvar	300	-100
Q_{G36}/Mvar	240	0
Q_{G37}/Mvar	250	0
U_i/pu	1.1	0.9

3.2 求解结果

以改进IEEE 14节点系统和改进IEEE 39节点系统为例,利用MATLAB对上述系统进行验证,并进行方案对比,其中包括遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)和改进的遗传算法(improved genetic algorithm, IGA)。

表4和表5分别为改进IEEE 14节点测试系统和改进IEEE 39节点测试系统的优化结果对比,从表中数据可知,改进后的遗传算法能够提高发电机端电压,从而达到更好的经济性。

从图7可以看出,在改进的IEEE 14节点测试系统中,改进的遗传算法展现出比传统遗传算法和粒子群算法更好的收敛性和收敛速度。从图8可以看出,在改进的IEEE 39节点系统中,收敛速度虽有所降低,但整体上全局收敛性优于传统遗传算法。从图9和图10可以看出,在对系统运行状态进行优化后,两

种情况均在保持电压稳定性前提下,达到了更好的经济性。综上所述,改进后的遗传算法效果更好。

表4 改进 IEEE 14 节点测试系统优化结果
Table 4 Improved IEEE 14 node test system
optimization results

参数	初始值	GA	PSO	IGA
U_{G1}/pu	1.03	0.971	1.039	1.087 1
U_{G2}/pu	1.02	0.971	1.022	1.080 6
U_{G3}/pu	1.03	0.971	0.998	1.061 3
T_1	1.00	0.98	0.99	1.02
T_2	1.00	0.92	0.95	1.00
T_3	1.00	0.11	1.00	1.02
T_4	1.00	0.98	0.98	1.00
Q_{c1}/Mvar	0.00	0.5	0.5	0.5
Q_{c2}/Mvar	0.00	0.5	0.5	0.5
目标函数适应度值	2.843 1	2.58	2.576 4	2.561 1

表5 改进 IEEE 39 节点测试系统优化结果
Table 5 Improved IEEE 39 node test system
optimization results

参数	初始值	GA	PSO	IGA
U_{G30}/pu	1.00	1.093 5	1.045 6	1.054 8
U_{G31}/pu	1.00	1.048 4	1.084 5	1.093 5
U_{G32}/pu	1.00	1.093 5	1.084 5	1.093 5
U_{G33}/pu	1.00	1.009 7	1.054 9	1.100 0
U_{G34}/pu	1.00	1.087 1	1.085 4	1.080 6
U_{G35}/pu	1.00	1.080 6	1.052 3	1.061 3
U_{G36}/pu	1.00	1.016 1	1.026 5	1.100 0
U_{G37}/pu	1.00	1.100 0	1.100 0	1.100 0
T_1	1.00	1.08	1.02	1.02
T_2	1.00	1.00	1.01	1.02
T_3	1.00	1.06	1.01	0.98
T_4	1.00	0.98	0.98	1.00
Q_{c1}/Mvar	0.00	0.50	0.50	0.50
Q_{c2}/Mvar	0.00	0.50	0.50	0.50
目标函数适应度值	46.783 9	42.322 1	42.213 5	41.910 0

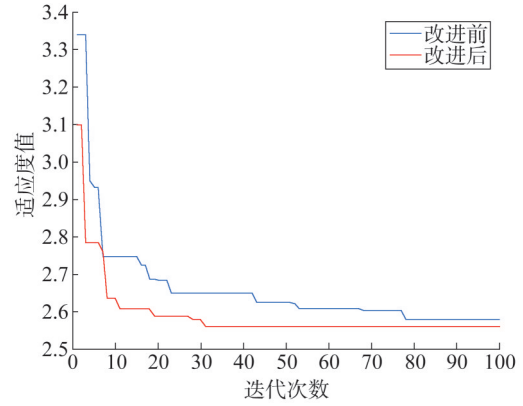


图7 改进 IEEE 14 系统算法收敛曲线对比
Fig.7 Improved convergence curve comparison of
IEEE 14 system algorithm

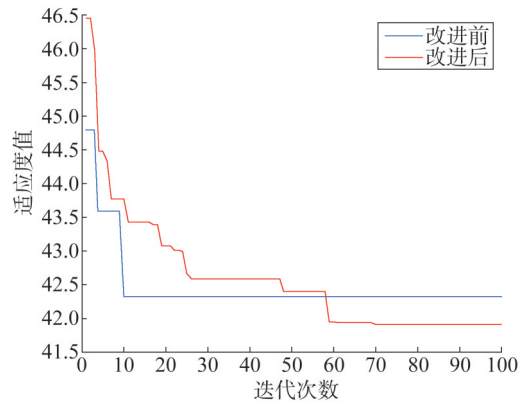


图8 改进 IEEE 39 系统算法收敛曲线对比
Fig.8 Improved convergence curve comparison of
IEEE 39 system algorithm

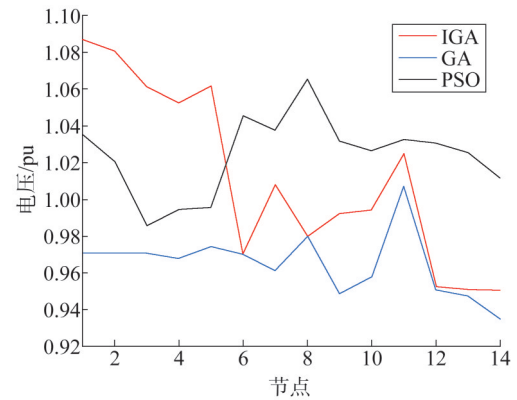


图9 改进 IEEE 14 系统优化算法电压曲线对比
Fig.9 Improved voltage curve comparison of
IEEE 14 system optimization algorithm

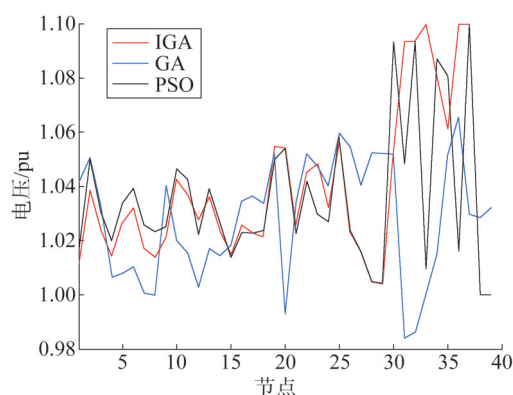


图10 改进IEEE 39系统优化算法电压曲线对比
Fig.10 Improved voltage curve comparison of
IEEE 39 system optimization algorithm

4 结束语

我国能源-负荷的逆向分布使得高压直流输电在我国迅速发展,交直流混联电网的无功问题也日益突出。文中提出了一种交直流电网无功优化的数学模型,结合遗传算法对该优化问题进行求解,并对遗传算法的初始种群选取、适应度以及交叉变异操作进行了改进,使其性能得到提升。并在改进IEEE 14节点系统和改进IEEE 39节点系统进行验证,改进的遗传算法具有更好的收敛性和更快的收敛速度。

改进的遗传算法在实际交直流混联电网的应用中具有显著的潜力,通过引入初始种群的选取、适应度函数的改进和交叉变异操作的优化等机制,能够进一步提高求解效率和精度,使得在大规模、多约束条件下的交直流混联系统优化问题得到更为有效解决。

从实现难度角度看,虽然遗传算法的参数设置和编码方式需要根据具体电网问题进行设计和调整,但随着计算机技术的发展和相关软件工具的成熟,这一过程已经变得相对简便。在成本效益方面,尽管遗传算法可能在计算资源消耗上相较于传统方法有所增加,但在长期运营和优化效果上却能带来显著收益。因此,综合来看,改进的遗传算法在实际交直流混联电网中具有较高的应用价值和良好的经济效益。这项研究对于提高电网稳定性和可靠性具有重要意义,同时对交直流混联电网中的复杂问题具有理论意义和实际应用价值。

参考文献

[1] 马智刚,卫志农,陈胜,等.基于柔性多状态开关的交直流配

网有功-无功优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(6):48-58.

MA Zhigang, WEI Zhinong, CHEN Sheng, et al. Active-reactive power optimal dispatch of AC/DC distribution network based on soft open point[J].Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6):48-58.

[2] 莫静山,颜伟,文旭,等.考虑换流站独立控制约束的交直流系统静态无功优化方法[J].电力系统自动化,2021,45(15):77-84.

MO Jingshan, YAN Wei, WEN Xu, et al. Optimization method for static reactive power of AC/DC system considering independent control constraints of converter station [J].Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15):77-84.

[3] 张旭,么莉,陈晨,等.交直流混合配电网网络重构与无功优化协同的两阶段鲁棒优化模型[J].电网技术,2022,46(3):1149-1162.

ZHANG Xu, YAO Li, CHEN Chen, et al. A novel two-stage robust model for co-optimization of reconfiguration and reactive power in AC/DC hybrid distribution network [J].Power System Technology, 2022, 46(3):1149-1162.

[4] 姜涛,李雪,李国庆,等.含多端柔性直流的交直流电力系统静态电压稳定域构建方法[J].电工技术学报,2022,37(7):1746-1759.

JIANG Tao, LI Xue, LI Guoqing, et al. A predictor-corrector algorithm for forming voltage stability region of hybrid AC/DC power grid with inclusion of VSC-MTDC [J].Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7):1746-1759.

[5] 张哲任,徐政,黄莹,等.藏东南光伏基地全直流汇集送出方案及其控制策略研究[J].浙江电力,2023,42(6):23-32.

ZHANG Zheren, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Research on the full DC collection and transmission scheme for the photovoltaic base in Southeast Tibet and its control strategy [J].Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6):23-32.

[6] 胡丹尔,彭勇刚,韦巍,等.多时间尺度的配电网深度强化学习无功优化策略[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5034-5045.

HU Daner, PENG Yonggang, WEI Wei, et al. Multi-timescale deep reinforcement learning for reactive power optimization of distribution network [J].Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14):5034-5045.

[7] WANG J J, HUANG M H, FU C, et al. A new recovery strategy of HVDC system during AC faults [J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2):486-495.

[8] LI D D, GAO Y, SUN M X. A general self-adaptive DC current control of LCC-HVDC for eliminating subsequent commutation failure [J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(3):2232-2235.

[9] 余娟,颜伟,徐国禹,等.基于预测-校正原对偶内点法的无功优化新模型[J].中国电机工程学报,2005,25(11):146-151.

YU Juan, YAN Wei, XU Guoyu, et al. A new model of reactive

- optimization based on predictor corrector primal dual interior point method[J].Proceedings of the CSEE,2005,25(11):146-151.
- [10] LIU J W, XU Y, DONG Z Y, et al. Retirement-driven dynamic VAR planning for voltage stability enhancement of power systems with high-level wind power [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2282-2291.
- [11] TAHBOUB A M, EL MOURSI M S, WOON W L, et al. Multiobjective dynamic VAR planning strategy with different shunt compensation technologies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2429-2439.
- [12] BISWAS P P, SUGANTHAN P N, AMARATUNGA G A J. Optimal power flow solutions incorporating stochastic wind and solar power [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 148: 1194-1207.
- [13] 赵静波, 卫志农, 刘建坤, 等. 电力系统线性化动态最优潮流模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 86-92.
- ZHAO Jingbo, WEI Zhinong, LIU Jiankun, et al. Linearized dynamic optimal power flow model for power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 86-92.
- [14] 赵昆, 耿光飞. 基于改进遗传算法的配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 57-62.
- ZHAO Kun, GENG Guangfei. Reactive power optimization of distribution network based on improved genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 57-62.
- [15] 曾令全, 罗富宝, 丁金嫚. 禁忌搜索-粒子群算法在无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 129-133.
- ZENG Lingquan, LUO Fubao, DING Jinman. Application of particle swarm optimization algorithm integrated with tabu search in reactive power optimization [J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 129-133.
- [16] MIRJALILI S, SAREMI S, MIRJALILI S M, et al. Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 47: 106-119.
- [17] 李林晏, 韩爽, 乔延辉, 等. 面向高比例新能源并网场景的风光-电动车协同调度方法[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(5): 554-563.
- LI Linyan, HAN Shuang, QIAO Yanhui, et al. A wind-solar-electric vehicles coordination scheduling method for high proportion new energy grid-connected scenarios [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(5): 554-563.
- [18] 赖晓文, 马晓伟, 白杨, 等. 基于混合整数二阶锥规划的动态无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 37-42.
- LAI Xiaowen, MA Xiaowei, BAI Yang, et al. Dynamic reactive power optimization method based on mixed integer second-order cone programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 37-42.
- [19] 周晓华, 罗文广, 刘胜永, 等. 静止无功补偿器自适应动态规划电压控制方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 895-900.
- ZHOU Xiaohua, LUO Wenguang, LIU Shengyong, et al. Voltage control method of static var compensator based on adaptive dynamic programming [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 895-900.
- [20] 薛霖, 牛涛, 方斯顿, 等. 计及高比例风电暂态电压安全的主从协同动态无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 57-66.
- XUE Lin, NIU Tao, FANG Sidun, et al. Master-slave cooperative dynamic reactive power optimization method considering transient voltage security of high proportion of wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 57-66.
- [21] CHEN M, JIE Y F, WANG C, et al. Optimized reactive power control of module power imbalance of cascaded converter [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2021, 3: 2-12.
- [22] LIU J H, CHENG J S. Online voltage security enhancement using voltage sensitivity-based coherent reactive power control in multi-area wind power generation systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2729-2732.
- [23] LEE G S, HWANG P I, MOON S I. Reactive power control of hybrid multi-terminal HVDC systems considering the interaction between the AC network and multiple LCCs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4562-4574.
- [24] CHI Y, XU Y, ZHANG R. Many-objective robust optimization for dynamic VAR planning to enhance voltage stability of a wind-energy power system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 30-42.
- [25] ZHANG H L, WANG C, FAN W H. A new filter collaborative state transition algorithm for two-objective dynamic reactive power optimization [J]. Tsinghua Science and Technology, 2019, 24(1): 30-43.
- [26] HUI Q, TENG Y, ZUO H, et al. Reactive power multi-objective optimization for multi-terminal AC / DC interconnected power systems under wind power fluctuation [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 630-637.

收稿日期:2024-03-08

修回日期:2024-05-19

作者简介:

雷宇立(2000),男,硕士在读,主要研究方向为电力系统无功规划;

周承君(2000),男,硕士在读,主要研究方向为信息物理系统;

幸爱玲(2001),女,硕士在读,主要研究方向为港口综合能源系统与需求侧管理;

牛涛(1992),通信作者(niuthu@qq.com),男,博士,特聘研究员,主要研究方向为交直流混联大电网分析、安全、控制、运行、优化;

方斯顿(1991),男,博士,教授,主要研究方向为极端工况下的储能系统联合状态评估。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.004

计及负荷运行风险的电氢热耦合微电网区域零碳优化调度技术

邢家维*,程 艳,孙树敏,杨 颂,王玥娇

(国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250003)

摘要:在基于氢储能的零碳微电网系统中,存在电解槽与燃料电池工作发热利用率低,忽视用户主观意向产生负荷变动的问题。针对上述问题,提出一种计及负荷运行风险的电氢热耦合微电网区域零碳优化调度技术。首先,建立零碳微电网模型,包含电解槽、燃料电池、储氢罐和蓄电池模型等;其次,建立负荷运行风险以及经济补偿模型;最后,结合零碳微电网模型以及负荷运行风险模型,构建计及负荷运行风险的电氢热耦合微电网区域零碳优化调度技术模型。仿真结果表明,与不引入供热系统与负荷运行风险的调度技术相比,该方法可以有效降低系统的运行风险,提高系统运行稳定性,同时提高绿色可持续能源的利用率。

关键词:区域零碳;微电网;氢储能;优化调度

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)01-0038-08

Zero Carbon Optimization Scheduling Technology for Electric Hydrogen Thermal Coupling Microgrid Regions Considering Load Operation Risks

XING Jiawei*, CHENG Yan, SUN Shumin, YANG Song, WANG Yuejiao

(State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: In the zero carbon microgrid system based on hydrogen energy storage, there are problems such as low heat utilization efficiency of electrolytic cells and fuel cells, as well as ignoring the subjective intention of users to generate load changes. We propose a zero carbon optimization scheduling technology for an electric hydrogen thermal coupled microgrid region that takes into account load operation risks. Firstly, establishing a zero-carbon microgrid model includes models of electrolytic cells, fuel cells, hydrogen storage tanks, and batteries. Secondly, a load operation risk and economic compensation model should be established. Finally, combining the zero carbon microgrid model and the load operation risk model, a zero carbon optimization Scheduling technology model for the electric hydrogen thermal coupling microgrid region is constructed that takes into account the load operation risk. The simulation results show that compared with scheduling techniques that do not introduce the heating system and load operation risks, this method can effectively reduce system operation risks, improve system operation stability, and improve the utilization rate of green and renewable energy.

Keywords: regional zero carbon; microgrid; hydrogen energy storage; optimize control

0 引言

我国能源结构正在向绿色可持续的能源结构方向发展^[1],尤其是微电网中的能源结构正在从“低碳”^[2-4]向零碳能源结构过渡^[5],旨在完全利用绿色可

基金项目:国网山东省电力公司科技项目“基于绿氢的燃料电池热电联产零碳供能系统优化调控技术与应用”(52062622000U)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Optimization Regulation Technology and Application of Fuel Cell CHP Zero-carbon Energy Supply System Based on Green Hydrogen” (52062622000U)。

持续能源(green and renewable energy, GRE)实现微电网的零碳^[6-10]自给自足与可靠运行^[8,11]。文献[12]为实现从近零碳建筑向零碳建筑的转变,提出了一种成本效益方法,该方法基于长期保持零碳排放的目标,并设定了在实施技术降碳和碳抵消措施时的相关约束条件。文献[13]进行耦合新能源的煤基零碳综合能源中心典型系统的构建及其初步的质量能量平衡计算。文献[14]构建了经济和净零碳排放约束的农村综合能源系统(integrated energy system,

IES)容量配置优化模型,量化了能源需求对容量设计的影响,为实现净零碳农村住宅建筑提供了新的途径。

但 GRE 具有波动性、不可预测性等特点,致使能源利用率较低,能源出现浪费,甚至对微电网的可靠运行产生威胁。氢储能具有较高的功率密度和能量密度,且储能容量灵活、便于运输转移,是实现不同能源转换及互联的良好储能载体^[15]。将氢储能引入系统,以解决 GRE 不确定性带来的负面影响,考虑氢能绿色能源的特性,微电网的零碳效果依然可以满足,氢储能的引入根本上是利用氢储来实现^[16],氢-电耦合能提高 GRE 的能源消纳^[17],并提高微电网整体的供电稳定性,实现微电网的零碳供能^[18]。文献[15]针对绿色能源资源丰富的偏远地区,存在外部供能成本高、柴油发电机作为后备电源费用较大等问题,提出了一种基于氢储能的微电网设计方案,适用于离网型储氢供能场景,该方案通过氢储能系统实现能源的高效存储与调度,减少对传统化石能源的依赖,从而降低能源供应成本,提高供电可靠性。文献[19]基于风能、太阳能和负荷预测精度随着时间尺度缩短逐步提升的特点以及抽蓄机组在日内具备灵活调节能力的特点,提出了一个风光抽蓄零碳电力系统的多时间尺度协调调度模型,该模型旨在优化风能、光能和抽水蓄能电站的协同运行,通过精准的短期和中期预测,提高电力系统的调度效率和供电可靠性,同时确保系统达到零碳排放的目标,模型的多时间尺度特性使得系统能够更灵活地应对不同时间段的负荷变化和可再生能源的波动性,推动可再生能源的高效利用和系统的稳定运行。文献[20]基于碳捕集和电转气技术,建立考虑零碳排放的电-气综合能源系统日前调度模型。文献[21]基于带精英策略的非支配排序遗传算法,在新能源高渗透环境下对电-氢储能进行协同优化配置,建立多目标零碳园区优化模型。

上述文献均将氢能作为储能载体实现了区域“低碳”或者零碳,但其采用的均为单纯的氢-电耦合,没有注重电能与其他能源的耦合联动,在能源利用率上依然有提升空间。

微电网区域零碳运行不确定性研究中,文献[18]考虑风力发电、光伏发电的间歇性和随机性,基于随机规划理论提出一种风电-光伏-电制氢-抽蓄

零碳电力系统短期生产模拟模型;文献[22]提出了一种考虑多能互补灵活性和用户低碳意愿的鲁棒优化方法,以解决区域综合能源系统中由于新能源出力不确定性和多能负荷波动所导致的灵活性不足问题。大多文献考虑 GRE 的出力不确定性,但微电网中用户主观不确定性也是影响微电网稳定可靠运行的因素之一。

综上所述,现有研究缺乏电-氢耦合系统与其他能源系统的融合,导致能源利用率较低,在系统不确定性研究中缺乏对负荷运行风险的考虑导致系统运行稳定性受影响。针对上述问题,提出计及负荷运行风险的电热氢耦合微电网区域零碳优化调度技术,将供热系统引入,以吸收电解槽与燃料电池的工作发热,且引入负荷运行风险与补偿环节,以应对负荷运行风险,为基于氢储的零碳微电网提供稳定高效的调度方案。

1 电-热-氢耦合模型

1.1 氢-电耦合模型

氢储能设备,作为解决 GRE 不确定性风险的设备,主要负责在 GRE 能源富裕且负荷较小时,将冗余电量通过电解水把电能转换为氢能储存。由于系统本身为零碳系统,所有能源均来自 GRE,故必然存在负荷大于 GRE 的时段,需要通过氢燃料电池的形式将氢能转换为电能,为系统供能。故氢储能设备包含两个重要组成部分:电解水制氢与氢燃料电池^[23-25]。

1.2 电解水制氢系统

本文采用技术较为成熟的碱性电解槽工艺,其电制氢过程中电解用电量与产氢速率基本成正比,如式(1)所示。

$$n_{H_2} = \frac{P_{el} \cdot \eta_{el}}{H_{HV}} \quad (1)$$

式中: n_{H_2} 为电解槽产氢速率; P_{el} 为电解功率; η_{el} 为电解槽电解效率,对于碱性电解槽来说,通常取值为60%~75%; H_{HV} 为氢气热值,取39 kWh/kg。

1.3 氢燃料电池供电系统

氢燃料电池的燃烧是高效且绿色的,可以很好地将氢能转换为电能,稳定供给微电网,其消耗氢气发电的关系如式(2)所示。

$$P_{fc} = n_{H_2} \cdot H_{HV} \eta_{fc} \quad (2)$$

式中: P_{fc} 为氢燃料电池输出功率; n_{H_2} 为燃料电池耗氢量; η_{fc} 为燃料电池效率, 取 60%。

1.4 储氢罐

储氢罐为氢储系统的关键, 它将电解槽内生产的氢气进行储藏, 并且将氢气输送给燃料电池以供发电, 当负荷小于 GRE 发电功率时, 储氢罐内输出氢气量大于输入氢气量, 当 GRE 发电大于负荷功率时, 储氢罐输入氢气量大于输出氢气量。本文采用的储氢罐压力方程为

$$p_{sto} = p_0 + z \frac{\Delta n_{H_2} RT_{sto}}{M_{H_2} V_{sto}} \quad (3)$$

式中: p_{sto} , p_0 分别为储氢罐内的现有与初始压强; Δn_{H_2} 为电解槽产氢变化速率; V_{sto} 为储氢罐的总体积; T_{sto} 为储氢罐内的温度; z 为气体压缩系数; R 为气体常数; M_{H_2} 为氢气的摩尔质量。

结合上述压强关系可以得出系统储氢状态 S_H 的方程为

$$S_H = \frac{p_{sto}}{p_N} \quad (4)$$

式中: p_N 为储氢罐的最大容许压强, 即储氢状态为当前罐内压强与储氢罐最大容许压强之比。

1.5 蓄电池

系统中已经具备氢储系统, 但仍可加装蓄电池作为备用电源, 与氢储能共同弥补可再生能源出力不足时的电力缺额, 或消纳冗余可再生能源, 为系统提供高效性、可靠性双重保障。蓄电池荷电状态可以反映蓄电池剩余电量所占额定容量的百分比, 影响其工作效果。在蓄电池进行充放电时, 荷电状态 S_{oc} 表达式为

$$S_{oc} = 1 - \frac{1}{Q} \int_0^t I(t) dt \quad (5)$$

式中: $I(t)$ 为蓄电池充放电电流; Q 为电池容量。

1.6 电热耦合系统

电-氢耦合系统中的电解水制氢与氢燃料电池供电系统在工作时, 均会产生热量, 这些热量从热力学的角度分析均来自 GRE 发电, 如果不加以利用, 则是对于 GRE 的一种能源浪费。对于这部分热能, 可以将其接入微电网系统中的供热系统, 以缓解系统中电供热的压力, 同时提高 GRE 的能源利用率。电解槽、燃料电池的基本热力学方程分别如下:

$$C_{el} \frac{dT_{el}(t)}{dt} = P_{el}(t) - M_{el}(t) - \frac{T_{el}(t) - T_a(t)}{R_{el}} - H_{el}(t) \quad (6)$$

$$C_{fc} \frac{dT_{fc}(t)}{dt} = M_{fc}(t) - P_{fc}(t) - \frac{T_{fc}(t) - T_a(t)}{R_{fc}} - H_{fc}(t) \quad (7)$$

式中: $T_{el}(t)$ 为 t 时段电解槽的工作温度, 即电解质温度, $^{\circ}\text{C}$; C_{el} 为电解槽的热容, $\text{kWh}/^{\circ}\text{C}$; R_{el} 为电解槽的热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$; $M_{el}(t)$ 为 t 时段电解槽的产氢功率; $P_{fc}(t)$ 、 $M_{fc}(t)$ 分别为 t 时段燃料电池的发电功率、耗氢功率; $T_{fc}(t)$ 为 t 时段燃料电池的工作温度, $^{\circ}\text{C}$; C_{fc} 为燃料电池的热容, $\text{kW}\cdot\text{h}/^{\circ}\text{C}$; R_{fc} 为燃料电池的热阻, 单位为 $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$; $T_a(t)$ 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; $H_{el}(t)$ 、 $H_{fc}(t)$ 分别为 t 时段电解槽、燃料电池的热输出功率, kW 。

系统中的电供热由电热炉来提供, 其供热方程为

$$H_E = \omega P_h \quad (8)$$

式中: H_E 为电热炉提供的热能; ω 为电热炉电转热系数; P_h 为电热炉产热耗电。

2 微电网模型

2.1 电-氢-热耦合微电网系统

构建如图 1 所示的电-氢-热耦合微电网系统以氢储为载体, 通过电气转换及热电联供的方式实现能源互联, 完成零碳区域能源自循环。GRE 通过氢储能为载体, 向微电网中的电热负荷供能, 各部分主要包括光伏、风力发电等形式以及蓄电池、碱性电解槽、燃料电池、储氢罐和电热炉等, 能量转换关系如图 2 所示。

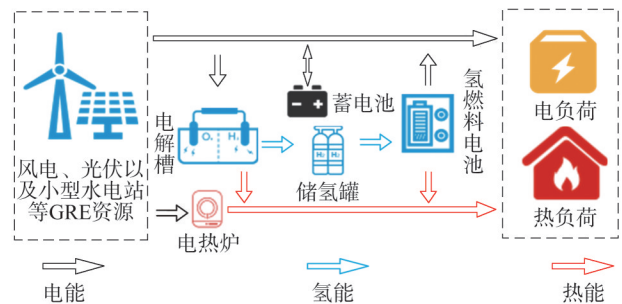


图1 电-氢-热耦合微电网系统拓扑图

Fig.1 Topology diagram of electric-hydrogen-thermal coupled microgrid system

2.2 负荷模型

负荷用户根据主观用电习惯以及历史用电数据,可以将用户的用电计划电量分为两部分:固定负荷与可变负荷。由于用户主观因素,负荷变化不可忽视,所以微电网管理者需要考虑负荷运行风险,对用户用电负荷进行计划。但为保证用户负荷具有一定的灵活性,具有调整能力,所以用户负荷模型应为固定部分加上可移动部分,所以用户负荷模型应为

$$P_{\text{load}}(t) = P'_{\text{load}}(t) + \Delta P_{\text{load}}(t) \quad (9)$$

式中: $P_{\text{load}}(t)$ 为负荷用电,包括可转移部分和不可转移部分; $P'_{\text{load}}(t)$ 为原计划负荷用电量; $\Delta P_{\text{load}}(t)$ 为用户在引导下主观转移的负荷用电量。

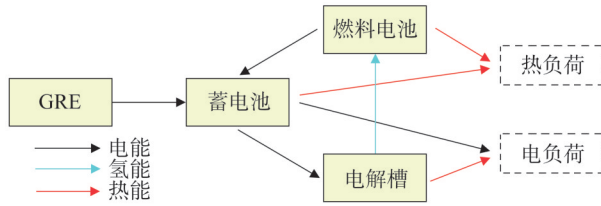


图2 电-氢-热耦合微电网系统能量关系图

Fig.2 Energy relationship diagram of electric-hydrogen-thermal-coupling microgrid system

2.3 运行风险概率模型

微电网运行过程中,当能量供应不足以满足负荷需求时,系统需要削减部分负荷以维持功率平衡,这可能导致用户断电等问题,这种因切负荷而产生的风险被称为切负荷风险。

由于负荷模型中允许负荷变化,引起系统功率不平衡,进而导致系统切负荷或者 GRE 浪费,故考虑由负荷变化引起的 GRE 浪费以及切负荷风险,其风险概率计算如式(10)和式(11)所示。

$$K_{\text{waste},j}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N D_{ij}(t)}{N}, j = 1, 2, 3 \quad (10)$$

$$K_{\text{loss},j}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N d_{ij}(t)}{N}, j = 1, 2, 3 \quad (11)$$

式中: $K_{\text{waste},j}(t)$ 、 $K_{\text{loss},j}(t)$ 为 t 时段微电网发生第 j 级 GRE 浪费风险、切负荷风险的概率; $D_{ij}(t)$ 、 $d_{ij}(t)$ 为 0—1 状态变量,分别代表 t 时段微电网用户 i 是否发生 j 级 GRE 浪费风险、切负荷风险,取 1 为发生该类型及等级风险; N 为用户数。

2.4 用户经济补偿引导模型

根据 2.3 节中给出的 GRE 浪费风险概率和切负荷风险概率,再结合经济补偿系数,可以得到给予用户经济补偿的模型:

$$C_{\text{sub}} = \sum_{t=1}^T C_{\text{sub}}(t) \quad (12)$$

$$C_{\text{sub}}(t) = \theta_x \cdot \left(1 + \sum_{j=1}^3 (K_{n,j}(t) \cdot \alpha_j) \right) \cdot \Delta P_{\text{load}}(t) \quad (13)$$

式中: C_{sub} 是指在一个调度周期内,用户获得的总经济补偿; $C_{\text{sub}}(t)$ 为各时段用户可得的经济补偿; θ_x 为各用电时期对应的电价引导系数,共有 3 个时段, x 分别取 1、2、3,对应峰时段、平时段、谷时段; n 为风险种类,取 waste、loss,分别代表 GRE 浪费风险、切负荷风险; α_j 为两种风险在 j 级风险下的统一补偿系数; x, j 取值越大,其对应风险发生时对系统的危害越大。

3 微电网区域零碳优化调度模型

微电网区域零碳优化调度分为 2 个阶段:第 1 个阶段微电网不引入补偿机制,仅考虑运行约束,以微电网运营商最大利润为目标,求解最优调度方案,并计算出 GRE 浪费风险以及切负荷风险发生的概率;第 2 阶段,将各时段发生各种风险的概率分为可接受与不可接受,将不可接受部分的可变负荷进行调整,并给予相对应的经济补偿。在负荷调整后,求解系统最优调度方案,实现微电网在拥有最高收益的同时,存在较低的负荷运行风险。

3.1 目标函数

设置目标函数如下:

$$\max F_1 = \frac{1}{M} \sum_{a=1}^M (F_{a,\text{sell},E} + F_{a,\text{sell},H} - C_{a,d}) \quad (14)$$

$$\max F_2 = \frac{1}{M} \sum_{a=1}^M (F_{a,\text{sell},E} + F_{a,\text{sell},H} - C_{a,d} - C_{\text{sub}}) \quad (15)$$

其中:

$$F_{a,\text{sell},E} = \sum_{t=1}^T P_{\text{load}}(t) \cdot \gamma_{\text{sell}}(t) \quad (16)$$

$$F_{a,\text{sell},H} = \sum_{t=1}^T [H_{\text{el}}(t) + H_{\text{fc}}(t) + H_{\text{e}}(t)] \gamma_{\text{H},\text{sell}}(t) \quad (17)$$

$$C_d = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^3 (P_{\text{over},j}(t) \cdot \lambda_{\text{waste},j}) + \sum_{j=1}^3 P_{\text{loss},j}(t) \cdot \lambda_{\text{loss},j} \right) \quad (18)$$

式中: F_1 为调度一阶段中 M 种用电计划的平均最大

收益; F_2 为调度二阶段中 M 种用电计划的平均最大收益; $F_{a,\text{sell},E}$ 为第 a 种用电计划下的电网络收益; $F_{a,\text{sell},H}$ 为第 a 种用电计划下的热网络收益; $\gamma_{\text{sell}}(t)$ 为微电网分时售电价; $\gamma_{H,\text{sell}}(t)$ 为热网分时供热价格; $C_{a,d}$ 为第 a 种用电计划下用户电能浪费和用户切负荷补偿费用; $P_{\text{over},j}(t)$ 、 $P_{\text{loss},j}(t)$ 分别为 t 时段 j 级风险的电能浪费量和用户切负能量, $\lambda_{\text{waste},j}$ 、 $\lambda_{\text{loss},j}$ 分别为发生 j 级 GRE 浪费风险和切负负荷风险的惩罚系数。

3.2 约束条件

1) 平衡约束如式(19)和式(20)所示。

$$P_{\text{GRE}} + P_{\text{fc}} + P_{\text{bat}} = P_{\text{load}} + P_{\text{el}} + P_{\text{h}} \quad (19)$$

$$H_{\text{el}}(t) + H_{\text{fc}}(t) + H_{\text{E}}(t) = H_{\text{load}}(t) \quad (20)$$

2) 运行约束如式(21)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{discharge}_N} \leq P_{\text{bat}} \leq P_{\text{charge}_N} \\ P_{\text{el}} \leq \varphi \cdot P_{\text{elN}}; P_{\text{fc}} \leq P_{\text{fc}_N} \\ S_{\text{oc},\min} \leq S_{\text{oc}} \leq S_{\text{oc},\max} \\ S_{\text{H},\min} \leq S_{\text{H}} \leq S_{\text{H},\max} \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_{GRE} 为 GRE 向系统提供的能量; P_{bat} 为蓄电池功率; $H_{\text{E}}(t)$ 、 $H_{\text{load}}(t)$ 分别为 t 时段电采暖功率与热负荷功率; $P_{\text{discharge}_N}$ 、 P_{charge_N} 为蓄电池的放电、充电额定功率; P_{elN} 为电解槽的额定功率; φ 为电解槽过载系数; P_{fc_N} 为燃料电池发电额定功率。 $S_{\text{oc},\min}$ 、 $S_{\text{oc},\max}$ 、 $S_{\text{H},\min}$ 、 $S_{\text{H},\max}$ 分别为蓄电池、储氢罐的储能下限和上限。

3) 爬坡约束如式(22)所示。

$$\begin{cases} |P_{\text{el}}(t+1) - P_{\text{el}}(t)| \leq \Delta P_{\text{el},\max} \\ |P_{\text{fc}}(t+1) - P_{\text{fc}}(t)| \leq \Delta P_{\text{fc},\max} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\Delta P_{\text{el},\max}$ 、 $\Delta P_{\text{fc},\max}$ 分别为电解槽与燃料电池的最大爬坡功率。

4 算例仿真

4.1 案例数据

选取某地区微电网作为案例研究分析,各时段各种风险的惩罚系数与补偿系数如表1所示。谷、平、峰各时段电价、电价引导系数与负荷最大可变比例如表2所示,系统其他运行参数如表3所示。用户负荷计划如图3所示,风机与光伏预测出力如图4所示。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 运行风险

考虑用户负荷变化的情况下,求解最优调度方案,结果如下:

表1 运行风险惩罚系数和补偿系数

Table1 Operational risk penalty coefficients and compensation coefficients

风险类型	弃能源惩罚系数	切负荷惩罚系数	补偿系数
I 级	5	10	1
II 级	8	15	1.5
III 级	12	20	2

表2 负荷引导参数表

Table2 Load guidance parameter table

时段	时间段	电价/(元/kWh)	引导系数	负荷最大可变比例/%
谷时段	00:00—07:00, 23:00—24:00	0.38	0.1	25
平时段	07:00—09:00, 12:00—17:00	0.68	0.15	20
峰时段	09:00—12:00, 17:00—23:00	1.2	0.22	30

表3 系统运行参数

Table3 System operating parameters

参数	数值
电解槽额定功率 P_{elN} /MW	5
法拉第常数 F /(C/mol)	96 845
气体常数 R /(J/(mol·K))	8.314
储氢罐体积 V_{sto} /m ³	7.3
储氢罐最大容许压强 p_N /MPa	45
燃料电池额定功率 P_{fcN} /MW	5
蓄电池额定功率 P_{batN} /MW	6
蓄电池额定电压 P_{bat_N} /kV	6.6
蓄电池容量 Q /Ah	20 000
荷电状态上限 $S_{\text{oc},\max}$ /%	80
荷电状态下限 $S_{\text{oc},\min}$ /%	20
储氢状态上限 $S_{\text{H},\max}$ /%	80
储氢状态下限 $S_{\text{H},\min}$ /%	20

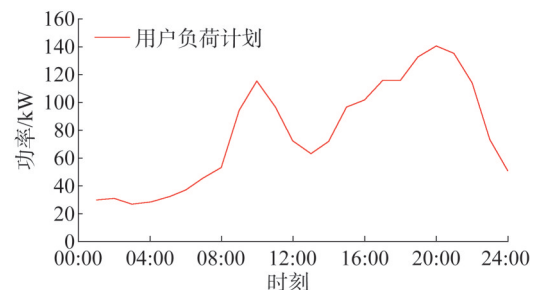


图3 用户负荷计划预测图

Fig.3 User load plan forecast chart

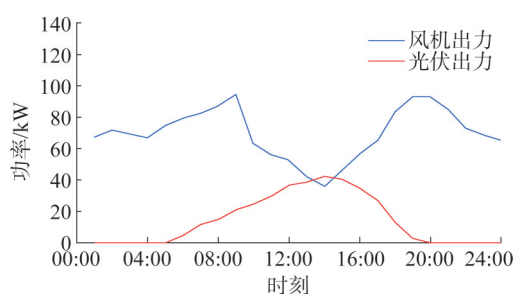


图4 风机、光伏出力预测图

Fig.4 Wind turbine and photovoltaic output prediction chart

各时段的风险概率如图5所示。由图可得风险概率为不可接受的时段有:06:00—07:00时段, GRE浪费Ⅲ级风险的概率高达60%~70%;19:00—21:00时段,切负荷Ⅲ级风险的概率高于35%;19:00—22:00时段切负荷Ⅱ级风险的概率为20%~25%。06:00—07:00时段, GRE浪费Ⅲ级风险高达80%,将严重影响系统的稳定运行,造成GRE的严重浪费,同时切负荷的风险过高也将影响系统的运行稳定性与用户的用电体验。在上述时段可以采用经济补偿的形式,诱导用户进行负荷用电调整,以降低负荷运行风险,提高系统稳定性。

采用本文建立的零碳微电网优化模型后的调度结果如图6所示。由图6可知,在采用经济补偿,诱导用户进行负荷用电调整之后,系统整体风险概率,较于采取补偿以前有明显降低,全时段各风险概率均低于20%,系统稳定性得到提升。这是由于在本文所提策略引导下,用户更愿意将负荷用电分散至其他时段,缓解了用电高峰期微电网压力,进而减小系统因为负荷过大、功率不平衡而产生的切负荷风险。与此同时,更合理的负荷用电,可以降低因负荷过低而导致的DRE浪费风险,为微电网区域零碳运行提供稳定可靠的运行环境。

4.2.2 供热用电变化

为充分利用电解槽与燃料电池的发热,将本部分能量引入微电网系统的供热环节,调整前后系统用于电热炉取暖的用电变化如图7所示,可以发现由于电解槽与燃料电池发热的引入,可以缓解电热炉直接用电取暖的压力,使得系统在同样用电量的情况下获得更多的热能,提高GRE的能源利用率。供热电量的减少,也有助于系统供电的稳定性。

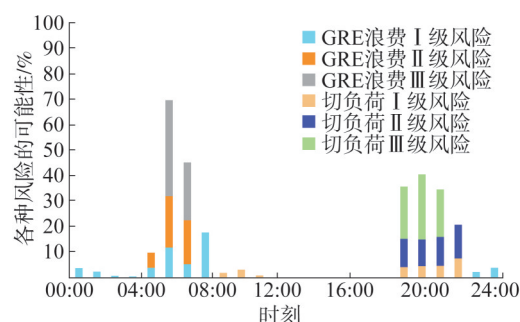


图5 调整前系统各风险出现概率图

Fig.5 Probability chart of various risks in the system before adjustment

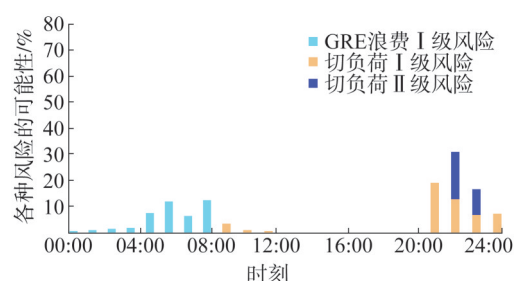


图6 调整后系统各风险出现概率图

Fig.6 Probability chart of various risks in the adjusted system

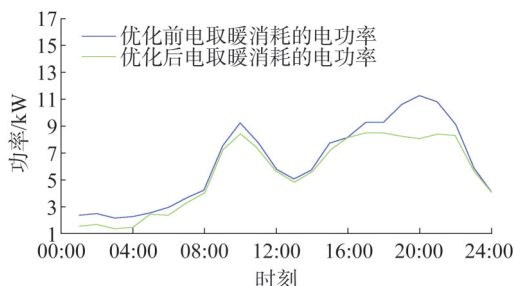


图7 优化前后系统电取暖耗电对比图

Fig.7 Comparison chart of power consumption for electric heating in the system before and after optimization

5 结论

基于氢储能的微电网区域零碳系统优化调度技术是新型电力系统的重点研究方向,提出计及负荷运行风险的电-氢-热耦合微电网区域零碳优化调度技术,经过算例仿真,有以下结论:

1) 通过将供热系统引入电-氢耦合中,充分利用了电解槽以及燃料电池的工作发热,所构建的电-氢-热耦合系统,可以有效减少系统中电热炉直接耗

电供热所用的电量,提高 GRE 的能源利用率,缓解系统供电压力。

2)通过引入负荷运行风险模型与经济补偿模型,通过对用户的引导,可以降低系统中 GRE 浪费以及切负荷风险,提高系统的运行稳定性。

参考文献

- [1] 潘家华,魏晓楠,孙传旺.净零碳转轨发展与多赢协同[J].世界社会科学,2023(4):80-94.
PAN Jiahua, WEI Xiaonan, SUN Chuanwang. The net-zero carbon transition development and multi-win synergies[J]. Social Sciences International, 2023(4):80-94.
- [2] 刘科,张利孟,赵中华,等.煤电机组发电、供汽(热)碳排放分摊方法研究[J].山东电力技术,2023,50(6):52-57.
LIU Ke, ZHANG Limeng, ZHAO Zhonghua, et al. Investigation on allocation method of carbon emission from power and steam/heat supply of coal-fired unit [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(6):52-57.
- [3] 邱发祥,王明远,潘广旭,等.园区综合能源系统日前优化运行研究[J].山东电力技术,2021,48(11):21-28.
QIU Faxiang, WANG Mingyuan, PAN Guangxu, et al. Research on day-ahead optimal operation of park integrated energy system [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(11):21-28.
- [4] 赵杰,王聪,李冠冠,等.考虑需求响应的多微网P2P能源交易低碳运行策略[J].电力建设,2023,44(12):54-65.
ZHAO Jie, WANG Cong, LI Guanguan, et al. Low-carbon operation strategy for P2P energy trading among multiple microgrids considering demand response [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12):54-65.
- [5] 王湑,伦小秀.基于LEAP模型的零碳电厂建设路径[J].环境科学 2023: 1-15 [2024-04-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202311011>.
WANG Tian, LUN Xiaoxiu. Construction path of "zero carbon" power plant based on the leap model [J]. Environmental Science and Pollution Research, 1-15 [2024-04-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202311011>.
- [6] 王思博,庄贵阳,张莹,等.中国经济社会零碳转型策略:增量式改进还是反推式变革[J].新疆师范大学学报(哲学社会科学版),2024,45(4):58-69.
WANG Sibo, ZHUANG Guiyang, ZHANG Ying, et al. China's economic and social zero-carbon transition strategy: incremental improvement or reverse change [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Philosophy and Social Sciences), 2024, 45(4):58-69.
- [7] 李萌,潘家华.碳中和愿景下零碳微单元建构研究[J].中国特色社会主义研究,2023,14(5):35-43.
LI Meng, PAN Jiahua. Research on the zero-carbon energy prosumerage system under the vision of carbon neutrality [J]. Studies on Socialism with Chinese Characteristics, 2023, 14(5):35-43.
- [8] 林水发,郑兆龙,韩晖,等.碳中和愿景下景区碳排放核算与零碳路径研究——以崇州市大雨村幸福里林盘景区为例[J].生态经济 2024,40(4):1-14.
LIN Shuifa, ZHENG Zhaolong, HAN Hui, et al. Research on carbon emission accounting and zero carbon path of scenic spots under the carbon neutrality vision: a case study of Xingfuli linpan scenic area of Dayu village in Chongzhou city [J]. Ecological Economy 2024, 40(4):1-14.
- [9] 刘钟淇,肖晋宇,吴佳玮,等.农村零碳能源系统构建框架研究[J].可再生能源,2023,41(4):538-545.
LIU Zhongqi, XIAO Jinyu, WU Jiawei, et al. Research in construction of zero-carbon rural energy system [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(4):538-545.
- [10] 刘任,刘洋,许立雄,等.计及分布式需求响应的多微电网系统协同优化策略[J].电力建设,2023,44(5):72-83.
LIU Ren, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Multi-microgrid system collaborative optimization strategy considering distributed demand response [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(5):72-83.
- [11] YANG L H, WU X. Net-zero carbon configuration approach for direct air carbon capture based integrated energy system considering dynamic characteristics of CO₂ adsorption and desorption [J]. Applied Energy, 2024, 358:122608.
- [12] 张时聪,王珂,徐伟.绿色电力交易与碳排放交易在零碳建筑中的碳抵消约束限值研究[J].建筑科学:1-11 [2024-04-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1962.tu.20230731.1357.004.html>.
ZHANG Shicong, WANG Ke, XU Wei. Carbon offset constraint limit of green electricity trading and carbon trading in zero carbon buildings [J]. Building Science: 1-11 [2024-04-07]. <http://kns.cnk i.net/kcms/detail/11.1962.tu.20230731.1357.004.html>.
- [13] 林光平,刘兆川,聂立,等.煤与可再生能源深度耦合的典型零碳综合能源系统构建[J].洁净煤技术,2022,28(11):90-104.
LIN Guangping, LIU Zhaochuan, NIE Li, et al. Construction of typical zero carbon integrated energy system with deep coupling of coal and renewable energy [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(11):90-104.
- [14] ZHAO A J, JIAO Y, QUAN W, et al. Net zero carbon rural integrated energy system design optimization based on the energy demand in temporal and spatial dimensions [J]. Renewable Energy, 2024, 222:119818.
- [15] 李星仪,沈小军,金钰.基于氢储能的偏远地区零碳微电网构建及运行策略研究[J].可再生能源,2024,42(2):223-232.
LI Xingyi, SHEN Xiaojun, JIN Yu. Research on construction and operation strategy of zero-carbon micro-energy network based on hydrogen storage in remote areas [J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(2):223-232.

- [16] 贾承宇,张钟,陈衡,等.基于电解水制氢和甲醇合成/重整的零碳新能源消纳系统[J].现代化工,2023,43(8):219-223.
JIA Chengyu, ZHANG Zhong, CHEN Heng, et al. Zero carbon emission new energy - consumption system based on hydrogen production from electrolytic water and methanol synthesis / reforming[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(8):219-223.
- [17] SUN Y, LI H W, WANG D, et al. A novel zero carbon emission system based on the complementary utilization of solar energy and hydrogen[J]. Applied Energy, 2024, 356:122443.
- [18] 顾慧杰,彭超逸,孙书豪,等.风电-光伏-电制氢-抽蓄零碳电力系统短期生产模拟模型[J].上海交通大学学报,2023,57(5):505-512.
GU Huijie, PENG Chaoyi, SUN Shuhao, et al. A short-term production simulation model of wind-PV-hydrogen-pumped storage zero carbon power system[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(5):505-512.
- [19] 赵心怡,谢俊,周翠玉,等.风-光-抽蓄零碳电力系统多时间尺度协调调度模型[J].电力工程技术,2023,42(3):121-129.
ZHAO Xinyi, XIE Jun, ZHOU Cuiyu, et al. A multi-time scale coordinated dispatching model of wind-photovoltaic-pumped storage zero-carbon power system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3):121-129.
- [20] 李卫东,张力兵,齐大伟,等.考虑零碳排放的电-气综合能源系统日前优化调度[J].太阳能学报,2023,44(6):145-151.
LI Weidong, ZHANG Libing, QI Dawei, et al. Day-ahead optimal dispatch of electric-gas integrated energy systems considering zero-carbon emissions[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(6):145-151.
- [21] 张驰,周骏,赵斌,等.零碳园区电氢混合储能系统多目标优化配置[J].电力建设,2022,43(8):1-12.
ZHANG Chi, ZHOU Jun, ZHAO Bin, et al. Multi-objective optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system in zero-carbon park[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(8):1-12.
- [22] 熊展,王素,王玲玲,等.考虑多能互补灵活性和用户低碳意愿的区域综合能源系统鲁棒优化调度[J].电网技术:1-14[2024-04-07].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2028>.
XIONG Zhan, WANG Su, WANG Lingling, et al. Robust optimal scheduling of regional integrated energy system considering multi-energy flexibility complementary and users' low-carbon willingness [J]. Power System Technology: 1-14 [2024-04-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2028>.
- [23] 王秋杰,刘国安,谭洪,等.考虑电氢耦合的虚拟电厂鲁棒可行域模型与求解[J/OL].电网技术:1-15[2024-04-07].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0510>.
WANG Qiujie, LIU Guoan, TAN Hong, et al. Models and solutions of robust feasible region for virtual power plants with electric hydrogen coupling [J/OL]. Power System Technology: 1-15 [2024-04-07]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0510>.
- [24] 孔令国,于家敏,蔡国伟,等.基于模型预测控制的离网电氢耦合系统功率调控[J].中国电机工程学报,2021,41(9):3139-3149.
KONG Lingguo, YU Jiamin, CAI Guowei, et al. Power regulation of off-grid electro-hydrogen coupled system based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9):3139-3149.
- [25] 王笑雪,高超,刘一欣,等.计及多元不确定性的氢电耦合微电网多阶段动态规划方法[J].电力自动化设备,2023,43(12):77-83.
WANG Xiaoxue, GAO Chao, LIU Yixin, et al. Multi-stage dynamic programming method for hydrogen - electric coupled microgrid considering multiple uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12):77-83.

收稿日期:2024-04-09

修回日期:2024-06-26

作者简介:

邢家维(1994),通信作者(573602466@qq.com),男,硕士,工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作;

程 艳(1981),女,博士,正高级工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作;

孙树敏(1968),男,硕士,研究员,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作;

杨 颂(1997),女,硕士,工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作;

王玥娇(1989),女,硕士,高级工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作。

(责任编辑 姜婷婷)

基于“分级-协同”思想的分布式光伏柔性参与 电网调峰技术研究及应用

张 强^{1*}, 李 娜², 蔺晨晖³, 吴继平⁴, 张文栋¹, 刘宏雷⁴

(1. 山东电力调度控制中心, 山东 济南 250001; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250002;

3. 清华大学电机系, 北京 100084; 4. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 分布式光伏在多地爆发式增长, 调度运行迫切需要分布式光伏参与电网调峰的自动发电控制技术手段。现有调度自动化系统的自动发电控制面向传统集中式电源设计, 在体系架构、控制策略、调节性能指标等方面均无法适应分布式光伏常态化参与电网调峰需求。针对此问题, 首先分析新能源发展形势对电网调峰带来的挑战, 进而将分布式资源特性与调节需求深度融合, 创新提出基于“分级-协同”思想的分布式光伏自动发电控制技术路线、体系架构。基于该思想, 阐述用于电网调峰的省地两级分布式自动发电控制策略, 首次给出总调峰需求计算方法、指令分配策略、响应率不足时的转移策略, 并定义针对分布式光伏的调节性能指标, 研制实际的控制系统。最后对所提方法和系统在省级电网的实际应用情况进行介绍, 验证所述方法的有效性和实用性。

关键词: 新型电力系统; 分布式光伏; 电网调峰; 分级; 协同; 两级自动发电控制

中图分类号: TM734

文献标志码: B

文章编号: 1007-9904(2025)01-0046-08

Research and Application of Distributed Photovoltaic Flexible Participation in Power Grid Peak Shaving Technology Based on the Concept of Grading and Collaboration

ZHANG Qiang^{1*}, LI Na², LIN Chenhui³, WU Jiping⁴, ZHANG Wendong¹, LIU Honglei⁴

(1. Shandong Electric Power Dispatching and Control Center, Jinan 250001, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China;

3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: Distributed photovoltaics are experiencing explosive growth in multiple regions, and there is an urgent need for distributed photovoltaics to participate in automatic power generation control technology for grid peak regulation during scheduling and operation. The existing scheduling automation system's automatic power generation control is designed for traditional centralized power sources, and cannot adapt to the demand for distributed photovoltaic normalized participation in grid peak shaving from aspects such as system architecture, control strategy, and regulation performance indicators. To address this issue, this paper first analyzes the challenges brought by the development of new energy to the peak shaving of the power grid, and then deeply integrates the characteristics of distributed resources with the demand for regulation. It innovatively proposes a distributed photovoltaic automatic generation control technology route and system architecture based on the "hierarchical collaborative" idea. Based on this idea, the provincial and local two-level distributed automatic generation control strategy for

基金项目: 国家重点研发计划项目“极高渗透率分布式光伏自适应并网与主动同步关键技术”(2022YFB2402900); 国网公司有限公司科技项目“面向高比例分布式新能源的地区电网有功调控关键技术研究及应用”(520626230061); 国网山东省电力公司科技项目“应对新型电力系统充裕性风险的多元资源主动协调控制技术研究”(520626230003)。

National Key Research and Development Program of China “Key Technologies for Highly Permeable Distributed Photovoltaic Adaptive Grid Connection and Active Synchronization” (2022YFB2402900); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research and Application of Key Technologies for Active Power Control in Regional Power Grids Targeting High Proportion Distributed New Energy” (520626230061); Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Research on Multi Resource Active Coordination and Control Technology to Address the Adequacy Risk of New Power Systems” (520626230003).

peak shaving of the power grid is elaborated. For the first time, the total peak shaving demand calculation method, instruction allocation strategy, and transfer strategy when response rate is insufficient are provided. The regulation performance indicators for distributed photovoltaics are defined, and an actual control system is developed. Finally, the practical application of the method and system described in this article in provincial power grids is introduced, verifying the effectiveness and practicality of the method described in this paper.

Keywords: new power system; distributed photovoltaics; peak regulation of power system; grading; collaboration; two-stage automatic generation control

0 引言

新型电力系统最典型的特征是以新能源为主体,新能源的资源特性对系统平衡分析^[1-6]、调节控制^[7-10]等带来新的挑战,电网调度模式^[11-12]、技术手段^[13-15]面临变革。作为新能源中增速最快的部分,分布式光伏近五年在国内呈现爆发式增长。以山东电网为例,截至2024年5月,风机、光伏总装机容量8 600万kW,其中分布式光伏装机4 400万kW,占光伏总装机的73%,占全网总装机的23%。在春节等节假日低负荷期,如遇晴好天气,午间光伏大发时段,在外电降至最低、火电最小运行方式、调用全部储能和抽水蓄能、集中式新能源参与调峰后,电网负荷备用仍然不满足要求,调度运行迫切需要分布式光伏参与电网调峰,共同承担平衡调节义务。

然而,现有调度自动化系统的自动发电控制功能面向传统集中式电源设计,在体系架构、控制策略、调节性能指标等方面均无法适应分布式光伏常态化参与电网调峰需求。因此,2023年以前,包括河北、山东等分布式光伏实际参与春节调峰的省份,采用的是以电话下令、人工拉停为主的方式。随着分布式光伏持续快速发展,对电网调峰的效率、精细化程度提出更高要求,自动调峰手段已迫在眉睫。

关于新型电力系统下含分布式光伏的自动调节控制问题,学术界和工程界已有一些研究和初步探索。文献[16]提出在配电台区基于“云边端”协同的低压分布式光伏柔性调节体系架构,但未从全网调峰角度考虑各电压等级分布式光伏的调节策略。文献[17]针对分布式光伏可控问题,提出基于人工智能方法的自适应控制技术路线,是一种新的思路。文献[18]以模型预测控制为基础,提出了一种含分布式光伏集群的协调优化调度方法,可用于优化配电网运行。文献[19]提出面向分布式光伏虚拟集群

的有源配电网多级调控方法,可以提高调度控制的快速性和有效性。文献[20]提出基于人工智能辅助决策的分布式光伏配电网调控策略,用于优化集中控制器下发至光伏的出力指令值。文献[21]研究分布式光伏电站区域智能调控系统,通过区域智能调控单元提升调节速度和精度。文献[22]研究光伏电站内分层分布式自动发电控制(automatic generation control, AGC),解决组串式光伏电站控制效率和质量问题。总体而言,上述研究侧重于从配电网、台区、电站的角度考虑分布式光伏调节控制问题,属于自治控制策略,无法涵盖包括电力平衡、电网调峰在内的全网应用场景。

近年来,随着分布式光伏占比的快速提升,在电力电量平衡方面,多级平衡、协调管理的思路呼之欲出。文献[23]提出包含分布式光伏在内的规模化灵活资源虚拟电厂“云-边”协同调度及分布式控制机理。文献[24]提出将大规模电力系统划分为多层级的含分布式资源集群的小规模电力系统。文献[25]针对大量分布式资源并网运行的主动配电网,构建了集群控制、多级协调的调控体系,较好地适应了分布式电源高渗透率电网运行特点。上述研究为分布式光伏参与电网调节控制问题提供了有益思路,但并未从全网调峰场景进行分布式光伏群调群控的具体设计,也未见有省级电网大规模应用案例。

将分布式资源特性与调节需求深度融合,创新提出基于“分级-协同”思想的分布式光伏AGC技术路线,设计不同类型分布式光伏参与电网调峰的技术架构。重点阐述10 kV分布式光伏参与电网调峰的省地两级分布式AGC策略,首次给出总调峰需求计算方法、指令分配策略、响应率不足时的转移策略,并定义了针对分布式光伏的调节性能指标,研制了实际的控制系统。最后对所提方法和系统在省级电网的实际应用情况进行介绍,验证了本文所述方

法的有效性和实用性。

1 基于“分级-协同”思想的分布式光伏AGC技术

1.1 “分级、协同”技术架构

以新能源为主体的新型电力系统,当分布式光伏占据新能源的大多数后,基于分布式光伏单体容量小、数量多、配用电侧接入占比高的特点,若继续沿用传统集中式电源的控制模式,由省级调度(以下简称省调)能量管理系统(energy management system, EMS)“直采直控”,无论从主站系统承载力,还是通信承载力方面均将难以为继。地(县配)调作为分布式光伏的调度管辖机构,缺乏必要的调节控制手段。综合考虑分布式光伏资源特性、调度管辖关系、电网调峰需求,提出采用“分级、协同”思路,通过“局域自治+广域协同”实现分布式光伏自动参与电网调峰。

具体来说,如图 1 所示,10 kV 分布式光伏采用“省地协同”技术路线,构建省调、地区调度(以下简

称地调)两级分布式 AGC,省调 AGC 仅对各地调建模,从省调 EMS 系统获取电网实时调峰需求,按设定的分配策略分解至各地调;地调 AGC 对所辖分布式光伏场站建模,将接收的调峰需求,按设定的分配策略分解下发至各 10 kV 分布式光伏场站闭环执行。

基于系统部署位置和调节需求,低压分布式光伏(380 V 并网)采用“调度-营销协同”技术路线,省调 AGC 将调峰控制目标值直接发送至省公司一级部署的营销用采系统,用采系统采用批量下发的方式,刚性遥控(分合表后开关)或柔性遥调(通过加装规约转换器实现对逆变器的调节)低压分布式光伏,省调、地调同时还接收用采系统回传的执行结果用于控制效果监视,如图 1 所示。

在该架构下,对 10 kV 分布式光伏来说,地调为该地区光伏集群的中枢,省调为全网调节控制的大脑。地调具备对所辖对象柔性调节的能力,控制指令既可以来自地区的自平衡需求、断面越限消除需求,也可以来自省调全网调峰需求,从而实现局域自治与广域协同的统一。对低压分布式光伏,通过调

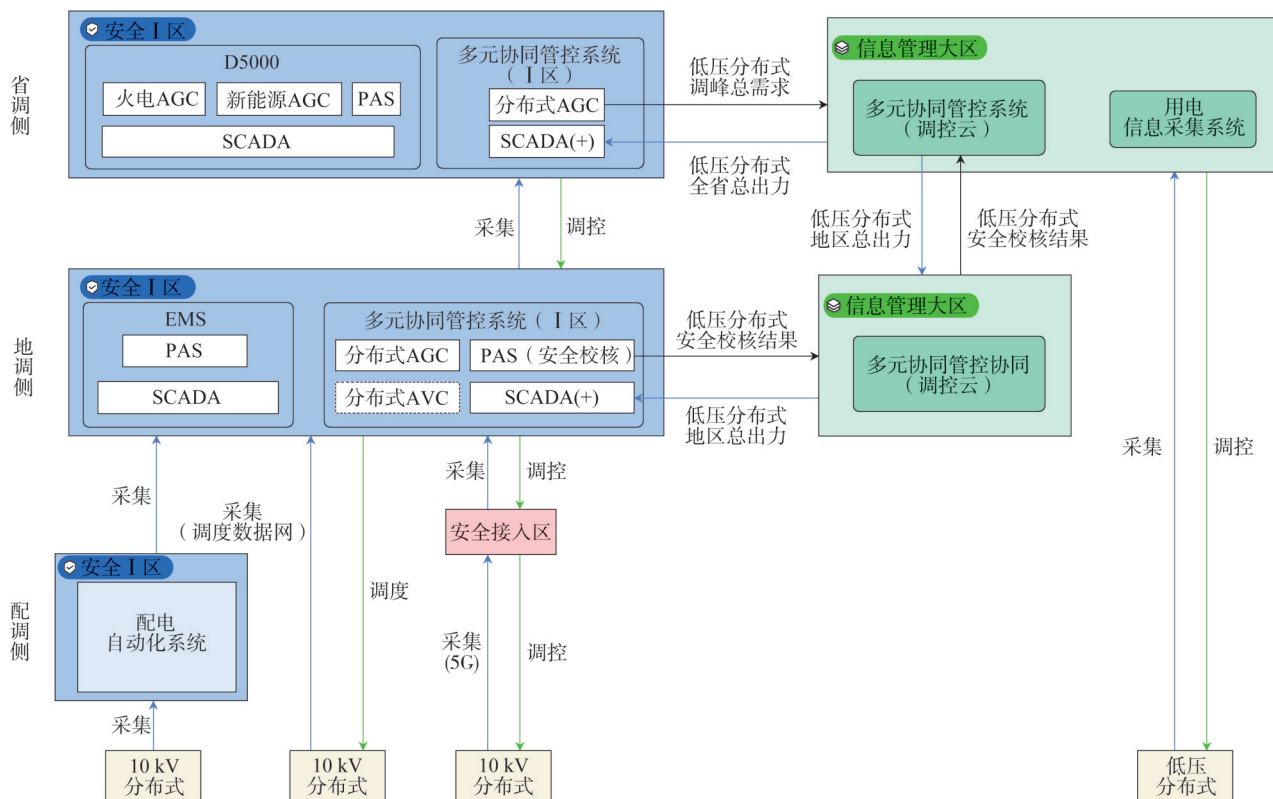


图1 分布式光伏参与电网调峰的分级-协同技术架构图

Fig.1 Hierarchical collaborative technology architecture diagram for distributed photovoltaics participating in grid peak shaving

度、营销系统的横向协同实现远程调节控制。

1.2 10 kV 分布式光伏省地两级 AGC 控制策略

1.2.1 总调峰需求计算

自动调峰模式下,10 kV 分布式光伏总调峰需求来自省调 EMS 系统,跟随参与 AGC 调节模式的火电机组(以下简称 R 模式机组)下备用实时计算,表达式为

$$R_{\text{total}} = |R_r - R_{\min}^{\text{th}}|, R_r < R_{\min}^{\text{th}} \quad (1)$$

式中: R_{total} 为 10 kV 分布式光伏总调峰需求; R_r 为火电 R 模式机组实时下备用值; $R_{\min}^{\text{th}}$ 为火电 R 模式机组下备用低门槛值。

另外,为避免分布式光伏在调峰限电和恢复增发之间频繁切换,同时设置火电 R 模式机组下备用高门槛值 $R_{\max}^{\text{th}}$,当 $R_r > R_{\max}^{\text{th}}$ 时,分布式光伏开始恢复上调; $R_{\min}^{\text{th}} \leq R_r \leq R_{\max}^{\text{th}}$ 时,为缓冲区段,既不上调也不下调。

1.2.2 指令分配策略

在省地协同模式下,针对总调峰需求,通过负荷率排序或装机容量比例排序两种指令分配策略,省调分布式 AGC 将调峰需求分配至各地调,地调分布式 AGC 将接收到的地区调峰需求分配至各 10 kV 分布式光伏场站。

1) 负荷率排序。

该分配策略下,受控对象(地调、场站)的负荷率表达式为

$$L_i = P_i / P_i^{\max} \quad (2)$$

式中: L_i 为对象 i 的负荷率; P_i 为对象 i 的当前出力值; $P_i^{\max}$ 为对象 i 的装机容量。

每个指令周期下调需求按负荷率由高到低排序分配,上调需求按负荷率由低到高排序分配,分配完即结束。每个对象每轮承担的调节量受其步长约束,表达式为

$$\Delta P_i \leq S \quad (3)$$

式中: ΔP_i 为每个对象每轮承担的调节量; S 为调节步长。

2) 装机容量比例排序。

该分配策略下,受控对象(地调、场站)的装机容量比例为:

$$K_i = P_i^{\max} / \sum_{i=1}^N P_i^{\max} \quad (4)$$

式中: K_i 为对象 i 的装机容量比例; $P_i^{\max}$ 为对象 i 的装

机容量; N 为对象数目。

每个指令周期的总调节需求由各对象按装机容量比例承担,每个对象每轮承担的最大量受其步长限制,表达式同式(3)。

1.2.3 响应率不足时的转移策略

为保证执行效率,考虑某对象某轮次响应率,当排序在前的对象上轮响应率低于门槛值时,启动转移分配策略,流程如图 2 所示。

其中,响应率表达式为

$$n = (\Delta P_s / \Delta P_i) \times 100\% \quad (5)$$

式中: n 对象 i 上轮响应率; ΔP_s 为对象 i 上轮实际调节量; ΔP_i 为对象 i 上轮分配调节量。

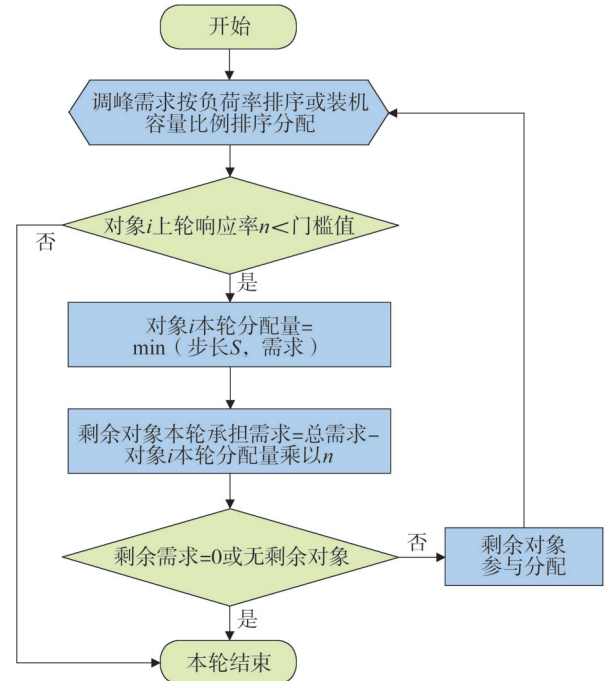


图2 响应率不足时的转移策略

Fig.2 Transfer strategy when the response rate is insufficient

1.3 10 kV 分布式光伏场站调节性能指标

为衡量参与闭环柔性调节的分布式光伏场站调节质量,确定场站闭环资格,定义调节速率、调节精度、调节范围指标。

1.3.1 调节速率

$$V_{ab} = |P_{Ea,b} - P_{Sa,b}| / T_{a,b} \quad (6)$$

式中: V_{ab} 为光伏场站 a 第 b 次调节速率, MW/min;

$P_{Ea,b}$ 为第 b 次指令周期结束时光伏场站 a 实际出力, MW; $P_{Sa,b}$ 为第 b 次指令周期开始时光伏场站 a 实际出力, MW; $T_{a,b}$ 为第 b 次指令周期内光伏场站 a 实际调节时间, min, 即从主站下发 AGC 目标指令起到光伏场站响应稳定的时间间隔, 最大不超过指令周期。

1.3.2 调节精度

$$\Delta P_{ab} = |P_{Ea,b} - P_{a,b}| \quad (7)$$

式中: ΔP_{ab} 为光伏场站 a 第 b 次调节精度, MW; $P_{a,b}$ 为光伏场站 a 接收的第 b 次 AGC 目标指令, MW。

1.3.3 调节范围

调节范围标准值: 0~100% 装机容量, 实际上限受光照强度影响, 下限根据场用电情况设置。

2 应用情况

利用本文所述技术, 已完成适用于分布式电源调节控制的省、地两级分布式 AGC 功能开发, 并在国内某分布式光伏高占比省份进行部署, 系统功能界面如图 3 所示。



(a) 省调系统界面



(b) 地调系统界面

图3 应用系统界面

Fig.3 Application system interface

为验证控制逻辑正确性和有效性, 利用该功能开展国内首次全电压等级分布式光伏精准调峰实战演练。模拟春节期间全网用电负荷大幅回落, 保障

机组供热和新能源消纳矛盾突出; 当日午间时段新能源发电大增, 在外电降至最低、火电最小运行方式、调用全部储能和抽水蓄能、集中式新能源全部参与调峰后电网负备用仍不满足要求, 频率存在越限风险。调控中心会同营销部组织实施该省分布式光伏参与电网调峰, 利用省地两级分布式 AGC, 自动远程柔性调节 10 kV 分布式光伏至最低出力, 并经由营销用采系统下发低压分布式光伏调节指令。该省 17 地区全部参与演练, 包括 10 kV 分布式光伏场站 589 座、装机容量 2 360 MW; 低压分布式光伏 76 481 户、装机容量 2 070 MW。

2.1 参数和策略设置

参数和策略选取如表 1 所示。省调、地调分布式 AGC 分别以 2 min、1 min 周期下发调峰指令, 步长取装机容量的 10%, 指令分配策略选取“负载率排序”方式。

表1 参数和策略选取

Table 1 Parameter and strategy selection

调度机构	所属组	参数	设置
省调	区域	$R_{\min}^{\text{th}}, R_{\max}^{\text{th}}$	300 MW、400 MW
		死区	10 MW
	10 kV 群组	控制周期	2 min
		指令触发方式	周期触发
	10 kV 控制对象-地调	步长	10% 装机容量
		上、下调限值	地区上送
		指令分配策略	负载率排序
		转移策略启用门槛(响应率)	30%
地调	区域	死区	1 MW
		指令触发方式	周期触发
	10 kV 群组	控制周期	1 min
		省地协同投入	是
	10 kV 控制对象-场站	步长	10% 装机容量
		上调限值	装机容量
		下调限值	5% 装机容量
		指令分配策略	负载率排序

2.2 应用效果

省调 AGC 控制模式为“自动调峰”, 地调 AGC 投

入“省地协同”。总调峰需求按照负载率分配原则在 10 kV 群组内分配,表 2 为 14:26:39 指令时刻全省 17 地区 10 kV 分布式光伏当前出力、实发命令、期望调节量、实际调节量、响应率情况。其中 E 地本轮次响应率低于门槛值 30%,下轮次分配时按 2.2.3 所述启用转移策略;N 地由于调节需求小于地调分布式 AGC 死区(1 MW),本轮指令不下发。上述执行结果符合系统控制策略和逻辑。

图 4 为演练期间(14:00)10 kV 分布式光伏跟随主站指令下调时的出力曲线,横坐标为时刻,纵坐标为纳入 AGC 闭环的 10 kV 分布式光伏有功功率值。14:26—14:45,全省 10 kV 分布式光伏场站柔性下调 50 万 kW,平均调节速率大于 5% 装机容量/min、调节精度小于 3% 装机容量,调节性能满足电网要求。

营销用采系统低压分布式光伏 15 min 执行成功率达到 90% 以上,压限发电出力 50 万 kW。由于低压分布式光伏调节控制非本文重点,此处不再展开描述。



图 4 全省 10 kV 分布式光伏实际调节曲线
Fig.4 Actual adjustment curve of 10 kV distributed photovoltaic in the whole province

本次实战演练充分验证了基于本文思想的自动调峰策略、技术、功能的有效性,在极大解放人力、提高效率的同时,有效提升了分布式光伏参与电网调峰的精细化程度。

表 2 某轮次全省各地区实际指令及执行情况

Table 2 The actual instructions and execution status in various regions of the province in a certain round

时刻	指令方式	地区	控制模式	当前出力	实发命令	期望调节量	实际调节量	响应率/%
14:26:39	104 遥调	A 地 10 kV	AUTO	119.5	78.1	-41.4	-29.6	71.50
	104 遥调	B 地 10 kV	AUTO	31.6	17.8	-13.8	-10.6	76.81
	104 遥调	C 地 10 kV	AUTO	19.4	12.6	-6.8	-3.2	47.06
	104 遥调	D 地 10 kV	AUTO	23	14.1	-8.9	-4.3	48.31
	104 遥调	E 地 10 kV	AUTO	81.3	49.5	-31.8	-4.9	15.41
	104 遥调	F 地 10 kV	AUTO	49.5	22.8	-26.7	-21.2	79.40
	104 遥调	G 地 10 kV	AUTO	61.2	38.3	-22.9	-23.2	101.31
	104 遥调	H 地 10 kV	AUTO	22.7	15.6	-7.1	-5.3	74.65
	104 遥调	I 地 10 kV	AUTO	6.2	3.7	-2.5	-1	40.00
	104 遥调	J 地 10 kV	AUTO	61.5	40.4	-21.1	-15.7	74.41
	104 遥调	K 地 10 kV	AUTO	26.2	14.4	-11.8	-8.4	71.19
	104 遥调	L 地 10 kV	AUTO	25.7	17.1	-8.6	-8.6	100.00
	104 遥调	M 地 10 kV	AUTO	26.9	16.8	-10.1	-7.9	78.22
	104 遥调	N 地 10 kV	AUTO	1.3	0.7	-0.6	0.1	-16.67
	104 遥调	O 地 10 kV	AUTO	30.5	21.1	-9.4	-4	42.55
	104 遥调	P 地 10 kV	AUTO	8	4.9	-3.1	-2.6	83.87

3 结束语

随着新型电力系统建设加速推进,各地将不同程度陆续进入新能源高占比时代,尤其分布式光伏的井喷式增长态势对电网调峰、调频、配电网承载力等多方面带来难题和挑战,是产学研各界关注和研究的热点。本文在特性分析基础上创新提出区别于传统集中控制模式的“分级-协同”AGC技术路线,阐述了用于电网调峰的省地两级分布式AGC策略。所研制的控制系统已在某分布式光伏大省首次成功应用,验证了本文所述总调峰需求计算方法、指令分配策略、响应率不足时的转移策略、分布式光伏调节性能指标的正确性和有效性,为相关网省分布式光伏自动参与电网调节控制提供了一种有益借鉴。

下一步,需要针对新能源占比持续提升后电网结构、方式、特性的变化开展适应性分析,深化和拓展多级、多元协同控制手段,实现分区自治与全局协调的统筹,以最小代价、最高效率解决新型电力系统电力平衡相关问题。

参考文献

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 李明节,陈国平,董存,等.新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J].电网技术,2019,43(11):3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [3] 陈典,陆润钊,张松涛,等.新型电力系统电力电量平衡计算分析技术综述[J].电网技术,2023,47(10):3952-3970.
CHEN Dian, LU Runzhao, ZHANG Songtao, et al. Review of new power system power balance calculation and analysis techniques [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3952-3970.
- [4] 刘映尚,马骞,王子强,等.新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1694-1705.
LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1694-1705.
- [5] 陈典,陆润钊,张健,等.实用化水火风光系统时序电力电量平衡方法[J].水力发电学报,2023,42(5):25-34.
CHEN Dian, LU Runzhao, ZHANG Jian, et al. Sequential power and energy balance practical method for hydro-thermal-wind-solar power systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42(5): 25-34.
- [6] 张思,杨晓雷,阙凌燕,等.高比例光伏发电对浙江电网电力平衡的影响及应对策略[J].浙江电力,2022,41(11):9-16.
ZHANG Si, YANG Xiaolei, QUE Lingyan, et al. The impact of high-proportion photovoltaic power generation on the power balance of Zhejiang power grid and its countermeasures [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(11): 9-16.
- [7] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [8] 余贻鑫,刘艳丽,秦超,等.分层分群电网体系结构[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):1-8.
YU Yixin, LIU Yanli, QIN Chao, et al. Layered and clustered grid architecture [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 1-8.
- [9] 李军徽,罗铨众,朱星旭,等.基于绿证-碳交易机制的风-火-蓄联合调峰控制策略[J].电力建设,2023,44(7):11-20.
LI Junhui, LUO Xuanzhong, ZHU Xingxu, et al. Peak regulation control strategy of wind-thermal-storage combined based on green certificate-carbon trading mechanism [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 11-20.
- [10] ALAM M J E, MUTTAQI K M, SUTANTO D. A multi-mode control strategy for VAr support by solar PV inverters in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1316-1326.
- [11] 许中阳,宋晓通.含高比例清洁能源的微电网多目标优化调度策略[J].分布式能源,2023,8(2):19-25.
XU Zhongyang, SONG Xiaotong. Multi-objective optimal scheduling strategy for microgrid with high permeability clean energy [J]. Distributed Energy, 2023, 8(2): 19-25.
- [12] 孙国强,殷岩岩,卫志农,等.基于深度确定性策略梯度的主动配电网有功-无功协调优化调度[J].电力建设,2023,44(11):33-42.
SUN Guoqiang, YIN Yanyan, WEI Zhinong, et al. Coordinated optimal dispatch of active and reactive power in active distribution networks using deep deterministic strategy gradient [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 33-42.
- [13] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J].

- Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7):1893-1904.
- [14] XU T, WU W C, ZHENG W Y, et al. Fully distributed quasi-Newton multi-area dynamic economic dispatch method for active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4):4253-4263.
- [15] 张硕,肖阳明,李英姿,等.新型电力系统电-碳-绿证市场协同运行的区块链关键技术[J].电力建设,2023,44(11):1-12.
- ZHANG Shuo, XIAO Yangming, LI Yingzi, et al. Collaborative operation of electricity-carbon-green market of new-type power system based on blockchain technology [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11):1-12.
- [16] 刘洋,于海东,刘文彬,等.基于“云边端”协同的分布式光伏柔性调节体系架构[J].山东电力技术,2023,50(7):23-29.
- LIU Yang, YU Haidong, LIU Wenbin, et al. Architecture of distributed photovoltaic flexible regulation based on cloud-edge-end collaboration [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(7):23-29.
- [17] 栗峰,丁杰,周才期,等.新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J].电网技术,2024,48(1):184-196.
- LI Feng, DING Jie, ZHOU Caiqi, et al. Key technologies of large-scale grid-connected operation of distributed photovoltaic under new-type power system [J]. Power System Technology, 2024, 48(1):184-196.
- [18] 郑小宇,季宇,张颖,等.基于模型预测控制的分布式光伏集群协调优化控制[J].电网与清洁能源,2019,35(7):66-74.
- ZHENG Xiaoyu, JI Yu, ZHANG Ying, et al. Coordinated optimal control of distributed photovoltaic cluster based on model predictive control [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(7):66-74.
- [19] 窦晓波,常莉敏,倪春花,等.面向分布式光伏虚拟集群的有源配电网多级调控[J].电力系统自动化,2018,42(3):21-31.
- DOU Xiaobo, CHANG Limin, NI Chunhua, et al. Multi-level dispatching and control of active distribution network for virtual cluster of distributed photovoltaic [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3):21-31.
- [20] 窦晓波,蔡超,段向梅,等.计及模型误差的分布式光伏配电网优化调控方法[J].电力自动化设备,2019,39(12):41-48.
- DOU Xiaobo, CAI Chao, DUAN Xiangmei, et al. Optimal control method of distributed PV considering model errors in distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12):41-48.
- [21] 王以笑,崔丽艳,雷振锋,等.分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(4):118-122.
- WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4):118-122.
- [22] 王淑超,段胜朋,侯炜,等.光伏电站分层分布式自动功率控制技术[J].电力系统自动化,2016,40(8):126-132.
- WANG Shuchao, DUAN Shengpeng, HOU Wei, et al. Hierarchical distributed control structure based AGC technology for photovoltaic power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8):126-132.
- [23] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.
- KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18):3-14.
- [24] 陈皓勇,谭碧飞,伍亮,等.分层集群的新型电力系统运行与控制[J].中国电机工程学报,2023,43(2):581-594.
- CHEN Haoyong, TAN Bifei, WU Liang, et al. Operation and control of the new power systems based on hierarchical clusters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2):581-594.
- [25] 吴文传,张伯明,孙宏斌,等.主动配电网能量管理与分布式资源集群控制[J].电力系统自动化,2020,44(9):111-118.
- WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. Energy management and distributed energy resources cluster control for active distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9):111-118.

收稿日期:2024-02-29

修回日期:2024-07-29

作者简介:

张 强(1980),通信作者(zq8027@163.com),男,博士,工程技术应用研究员,从事电网调度运行与研究工作;

李 娜(1991),女,硕士,工程师,从事电网调度自动化相关研究工作;

蔺晨晖(1995),男,博士,助理研究员,从事电力系统能量管理研究工作;

吴继平(1984),男,高级工程师,主要从事频率控制相关技术研究及系统研发工作;

张文栋(1989),男,高级工程师,从事电网调度运行相关工作;

刘宏雷(1992),男,工程师,从事电网调度自动化相关软件研发工作。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.006

基于深度强化学习的空气源热泵供热系统温度控制策略

刘 伟¹, 高 嵩^{2*}, 宋宗勋¹, 许晓康¹, 刘 萌²

(1. 国网山东省电力公司威海供电公司, 山东 威海 264204;

2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

摘要:空气源热泵(air source heat pump, ASHP)负荷具备良好的可调节特性,其建模的准确性和控制策略的设计是充分发挥其调节潜力的关键。文中考虑空气源热泵供热系统的储热特性,提出了基于深度强化学习(reinforcement learning, RL)的空气源热泵供热系统温度控制策略。首先建立了基于参数辨识的空气源热泵供热系统数学模型。其次建立了空气源热泵供热系统马尔可夫过程决策模型,并基于Q-Learning算法设计了供热系统深度强化学习控制策略。基于实际运行数据的仿真结果表明,本文提出的考虑供热延迟的供热系统数学模型能够准确预测供回水温度及室内温度变化情况,且所提出的基于深度强化学习的温度控制策略能够在维持用户室内温度在设定值的前提下,有效降低用电成本。

关键词:空气源热泵;分时电价;强化学习;水温控制策略

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)01-0054-08

Temperature Control Strategy for Air Source Heat Pump Heating System Based on Deep Reinforcement Learning

LIU Wei¹, GAO Song^{2*}, SONG Zongxun¹, XU Xiaokang¹, LIU Meng²

(1. State Grid Weihai Power Supply Company, Weihai 264204, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: The air source heat pumps (ASHP) exhibits good adjustability, and the accuracy of its modeling and the design of control strategies are key to fully exploiting its regulation potential. This paper considers the thermal storage characteristics of air source heat pump heating systems and proposes a temperature control strategy based on deep reinforcement learning (RL) for ASHP heating systems. First, a mathematical model of the ASHP heating system is established based on parameter identification. Then, a Markov decision process (MDP) model for the ASHP heating system is developed, and a temperature control strategy based on deep reinforcement learning is designed using the Q-learning algorithm. Simulation results based on real operating data demonstrate that the proposed heating system mathematical model, which accounts for heating delays, can accurately predict the variations in supply and return water temperatures as well as indoor temperatures. Furthermore, the proposed deep reinforcement learning-based temperature control strategy effectively reduces electricity costs while maintaining the indoor temperature at the set value.

Keywords: air source heat pump; time of use pricing; reinforcement learning; water temperature control strategy

0 引言

在碳达峰碳中和背景下,可再生能源在我国减排路径上起到至关重要的支撑作用^[1]。可再生能源的快速发展对于助力实现“双碳”目标具有重要的

推动作用,但其自身受天气等复杂因素影响的出力不确定性也给电网安全运行带来挑战^[2]。新能源出力具有时段性,为了缓解新能源并网后可能引发的供需不平衡问题,分时电价作为一种调节工具逐步得到实施。通过在不同时间段内划分电价,引导用户调整自身用电行为,以优化电力系统的负荷分布^[3]。随着信息技术的不断发展,负荷可控性逐渐提升。需求侧能够逐渐与发电侧协同,调节不同时

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520613220004)。
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (520613220004)。

间段的电力分配,在不影响用户使用的前提下参与电力系统辅助服务^[4]。

近年来“煤改电”逐渐推行,电采暖逐步取代传统燃煤取暖,成为一种清洁、高效的能源利用方式。空气源热泵因其高能效和环境适应性,成为高效电采暖的代表技术。随着技术的不断进步和市场需求的不断增加,空气源热泵的应用领域日益广泛^[5]。空气源热泵供热系统依托供热管网,具备一定的储热能力,还能够根据外部环境温度的变化进行灵活调节,以优化系统运行效率^[6]。因此,结合分时电价政策,空气源热泵供热系统能够在保证用户室内温度不越限的前提下调整用电功率,以降低运行成本。

当前,空气源热泵系统的控制策略通常包括水温调节^[7]、流量调节^[8]及两者结合的综合调节方法^[9]。然而,空气源热泵供热系统的运行机制相对复杂,涉及多个相互耦合的物理参数,如何设计合适的控制策略以实现优化运行仍具有较大挑战。近年来,深度强化学习作为一种先进的人工智能技术,已经逐渐被应用于复杂系统的优化控制中。文献[10]提出了一种电采暖系统优化框架,通过强化学习算法的自适应调整,实现电采暖系统的优化运行;文献[11]采用强化学习方法,研究了地铁站空调系统的节能控制策略,有效降低了能耗并维持了舒适性;文献[12]通过强化学习计算最优电价并优化储能调度算法,为轨道交通系统中的能效提升提供了新的解决方案;文献[13]利用强化学习优化楼宇节能运行,显著提高了建筑用能效率;文献[14]设计了一种多区域住宅暖通空调智能控制方法,通过自适应调节显著提升了热舒适度和节能效果。

尽管强化学习在多个能源系统中取得了显著进展,然而在空气源热泵供热系统的温度控制领域,相关研究尚显不足。因此,本文以空气源热泵供热系统为研究对象,结合分时电价背景,基于深度强化学习提出了一种空气源热泵供热系统优化控制策略,在确保用户的舒适度的同时降低用电成本。首先设计了基于强化学习的空气源热泵供热系统控制框架;之后基于空气源热泵系统运行特性,建立了空气源热泵供热系统数学模型;接着,建立了马尔科夫过程(markov decision process, MDP)决策模型,并基于Q-learning算法实现优化实现智能调节;最后,本文通过仿真实验验证了该控制策略在节能与温控方面

的实际效果。

1 基于强化学习的系统控制策略

强化学习是一种通过智能体与环境交互来学习并优化决策过程的机器学习方法,通过智能体在与环境的互动中不断探索并调整策略,实现最大化累积奖励或某个具体目标^[15]。智能体根据环境状态的变化和行为的反馈,修正其决策策略,从而提升决策质量。

强化学习通常基于马尔可夫决策过程进行建模^[16]。马尔可夫决策过程可以通过五元组 (S, A, p, R, γ) 来表示。其中, S 是状态空间,包含所有可能的环境状态; A 是动作空间,定义了智能体可执行的所有可能动作; p 是状态转移概率,表示在采取某一动作后,环境从当前状态转移到下一状态的概率; R 是奖励函数,用于衡量当前行动的有效性; γ 是折扣因子,用于平衡当前奖励和未来奖励的重要性。

基于这一理论框架,提出空气源热泵供热系统智能控制策略。主要包括以下三个步骤:

1) 经验产生。

在这一阶段,智能体根据当前环境状态执行相应的控制动作。采用 ϵ -greedy策略选择当前最优动作或进行一定的探索以尝试新的控制策略。在每次控制动作执行后,环境状态发生变化,智能体根据新的状态计算即时奖励,并通过集中控制器调整热泵机组的启停台数。这一过程不断为智能体提供反馈,帮助其改进决策。

2) 数据更新。

每次执行控制动作后,智能体将当前状态、所采取的动作、获得的奖励以及更新后的状态信息记录下来。将 t 时刻系统环境状态 S_t 、智能体所采取的控制动作 A_t 、奖励值 R_t ,以及 $t+1$ 时刻系统状态 S_{t+1} 作为整体进行记录。

3) 参数更新。

在训练过程中,智能体逐渐减少探索的概率 ϵ 的值。随着学习的进行,智能体倾向于选择能够最大化长期奖励的动作。当奖励值趋于稳定且不再显著变化时,学习过程结束,智能体认为已经掌握了最优的控制策略,输出最优的空气源热泵启停方案。

本文提出的空气源热泵供热系统温度控制框架

如图1所示。

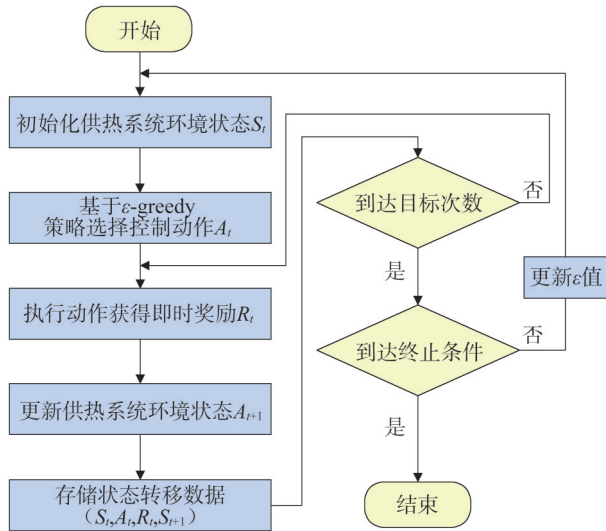


图1 基于强化学习的水温控制策略

Fig.1 Water temperature control strategy based on reinforcement learning

2 空气源热泵供热系统建模

2.1 系统构成

空气源热泵是一种高效节能设备,能够将外部空气中的热量提取并转化为高温热能,从而加热室内空气或水,满足冬季建筑供暖的需求。通常,单台空气源热泵的制热能力有限,因此在实际应用中,常通过多台热泵机组的联合使用来实现集中供热。通过循环水泵将加热后的水送至供热管道,并将热水输送到用户端,完成区域供暖。根据实际运行过程,空气源热泵供热系统供暖过程如图2所示。

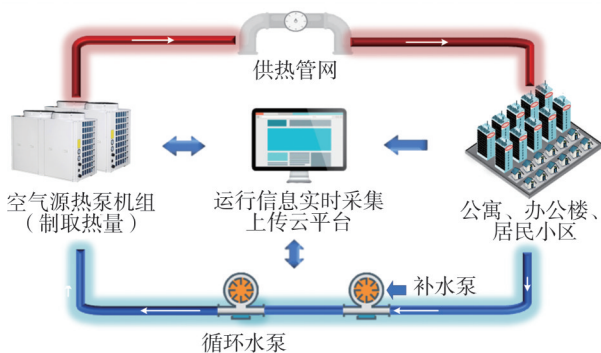


图2 空气源热泵供热系统集中供暖过程

Fig.2 Central heating process of air source heat pump heating system

另一方面,随着传感器和数据传输技术的进步,空气源热泵供热系统运行过程的可观测性得到了显著提升。关键参数如供回水温度、热泵运行状态和室外温度等能够实时采集,并由数据传输单元传输至集中控制系统,实现全局监控和自我优化。这为本文后续进行模型有效性验证提供了数据支撑,为控制策略验证提供了基础。

2.2 系统模型

为实现一定区域的集中供暖,实际空气源热泵供热系统一般包含多个热泵机组,共同为指定区域的建筑物提供供暖。现行空气源热泵供暖方案一般基于水基循环,通过循环热水的吸热散热过程实现热源侧与用户侧的热量传递。因此,本部分建模从热源侧建模与用户侧建模两方面展开。

热源侧的建模主要关注空气源热泵的制热能力与电功率消耗之间的关系,供热系统的总制热功率如式(1)所示。

$$P_h = \sum_{i=1}^N s_i \lambda_{\text{cop}} P_N \quad (1)$$

式中: P_h 为系统总制热功率; s_i 为开关状态,开启为1,关闭为0; i 为热泵索引编号; λ_{cop} 为空气源热泵能效比,代表所制热功率与电功率的比值; N 为热泵总装机台数; P_N 为单台机组额定电功率。

根据热泵的热力学原理,热泵的能效比 λ_{cop} 与热源和热汇温度有关,当低温度热源不变时,机组出水温度越高,其能效比越小, λ_{cop} 的变化过程可表示为^[17]

$$\lambda_{\text{cop}} = \frac{T_s(t)}{T_s(t) - T_o(t)} \quad (2)$$

式中: $T_s(t)$ 为 t 时刻供水温度; $T_o(t)$ 为 t 时刻室外温度。

空气源热泵供热系统通过供热管网向用户供热,在本文研究中,考虑的是通过改变热源侧制热功率以影响循环热水供水温度的质调节控制方式。考虑循环热水的传输延迟,供水温度与热源侧制热功率的变化关系可以表示为^[18]

$$C_w \frac{dT_s(t)}{dt} = K_w (T_r(t + \tau_h) - T_s(t)) + \sum_{i=1}^N s_i \lambda_{\text{cop}} P_N \quad (3)$$

式中: C_w 为循环热水的比热容; K_w 为循环热水的热导; $T_r(t + \tau_h)$ 为 $t + \tau_h$ 时刻的回水温度; τ_h 为循环热

水从回水口到出水口的流动时间。

经过用户侧散热后,回水温度可以通过式(4)计算。

$$C_w \frac{dT_r(t)}{dt} = K_w (T_s(t) - T_r(t - \tau_h)) - Q_{ex} \quad (4)$$

式中: $T_r(t)$ 为 t 时刻回水温度; $T_r(t - \tau_h)$ 为 $t - \tau_h$ 时刻回水温度; Q_{ex} 为用户侧散热量。

用户侧散热量与用户侧进水温度和室内温度有关,可表示为

$$Q_{ex} = K_{a-w} (T_{u,in} - T_i(t)) \quad (5)$$

式中: $T_i(t)$ 为 t 时刻室内温度; $T_{u,in}$ 为用户侧进水温度; K_{a-w} 为循环热水与用户室内温度之间的平均热导。

室内温度与室外温度以及用户侧散热量有关,如式(6)所示。

$$C_{user} \frac{dT_i(t)}{dt} = K_{user} (T_o(t) - T_i(t)) + Q_{ex} \quad (6)$$

式中: C_{user} 为等效建筑比热容; K_{user} 为等效建筑热导。

式(3)一式(6)建立了空气源热泵供热系统循环热水温度与室内温度的变化模型。模型中比热容和热导等参数无法采集,因此需要通过参数辨识进行确定。

模型中热导可以通过供热系统稳态运行过程进行直接计算,具体如式(7)所示。

$$\begin{cases} K_w = \frac{\sum_{i=1}^N s_i \lambda_{cop} P_N}{T_s(t) - T_r(t - \tau_h)} \\ K_{a-w} = \frac{K_w (T_s(t) - T_r(t - \tau_h))}{(T_s(t + \tau_s) - T_i(t))} \\ K_{user} = \frac{K_{a-w} (T_s(t + \tau_s) - T_i(t))}{(T_i(t) - T_o(t))} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $T_s(t + \tau_s)$ 为 $t + \tau_s$ 时刻的供水温度; τ_s 为供水延迟,可根据式(8)计算^[19]。

$$\tau_s = \frac{\pi D_h^2 \rho_w L}{4\dot{m}} \quad (8)$$

式中: D_h 为管道直径; ρ_w 为循环水密度; L 为管道长度; $\dot{m}$ 为循环水质量流量。

相比之下,比热容是暂态参数,须借助专门的辨识方法来确定。结合供热系统实际可采集数据,本

文采用基于数据驱动的参数辨识方法,相较于基于模型的辨识方法具有更高的灵活性,适用于复杂系统模型的参数辨识^[20]。结合式(3)一式(6)具体形式,本文选择适用于状态空间模型参数辨识的子空间法^[21]。具体辨识原理此处不再详细展开,其基本形式为

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = Hx(t) + Bu(t) \\ y(t) = Dx(t) + Eu(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x(t)$ 为状态变量; $u(t)$ 为输入变量; $y(t)$ 为输出变量; H 、 B 、 D 、 E 为待辨识参数。

通过合理选择输入输出变量,并将循环热水温度变化模型式(3)一式(6)转化为上述状态空间模型的形式,可以利用子空间法从输入输出数据中提取相关参数。

以供水温度变化过程为例,令 $u(t) = T_r(t)$, $y(t) = T_s(t) = Dx(t)$,将其转化为状态空间方程的形式,可得式(10)。

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{K_w}{C_w} x(t) - \frac{K_w}{D \cdot C_w} T_r(t) \quad (10)$$

通过对比式(9)与式(10),可以得出 C_w 表达式为

$$C_w = \frac{K_w}{H} \quad (11)$$

至此本文建立了描述空气源热泵供热系统关键温度变化过程的数学模型。该模型能够描述供水温度、回水温度以及用户室内温度变化过程,为后续基于深度强化学习的温度控制策略提供了模型基础。

3 强化学习算法设计

3.1 供热系统MDP模型

为实现用户室内温度控制与供热系统运行成本的最优设计,本研究采用了MDP决策模型。

1) 状态空间设计。

状态空间是所有可能状态的集合,描述了系统在每个决策时刻的状态特征。状态空间的定义需要根据问题的具体特点设计。为了有效区分空气源热泵供热系统不同的状态并采取相应的行动,状态空间需要包括全面且具有代表性的状态变量。然而,状态空间的维度过大会导致计算复杂度大大增加,模型训练困难。为了平衡这一问题,本文选择 t 时刻

热泵开机台数 n 、供水温度 $T_s(t)$ 、回水温度 $T_r(t)$ 和室内温度 $T_i(t)$ 四个参数描述系统状态,如式(12)所示。

$$S_t = (n, T_s(t), T_r(t), T_i(t)) \quad (12)$$

2) 动作空间设计。

动作空间定义了在一状态下决策主体可采取的所有可能行为集合,通常需要结合具体问题的物理约束、操作限制以及目标功能加以刻画。本文采用通过改变供热功率而改变供水温度的质调节,即通过调整空气源热泵的开机台数来控制供水温度,从而调整供热效果。因此,动作空间设计为开机台数集合。每个动作集合对应一个热泵开机台数的选择方案,动作空间设计为

$$A = \{0, 1, \dots, N\} \quad (13)$$

奖励函数直接决定了最优控制策略的学习方向,为了确保用户室内温度的舒适度,奖励函数需要综合考虑热舒适度和系统运行成本,本文设计的考虑用户热舒适性的奖励函数如式(14)所示。

$$\begin{cases} r_t = -C_{\text{tou}} n P_N - \delta T(a_t, S_{t+1}) \\ T(a_t, S_{t+1}) = 1 - \exp(-0.5(T_i(t) - T_{\text{set}})^2) - \lambda(T_r(t) - T_{\text{set}})^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中: C_{tou} 为分时电价; T_{set} 为室内温度设定值; r_t 为 t 时刻所获奖励; a_t 为 t 时刻所采取的控制动作; δ 为温度偏移奖励权重; λ 为热舒适度权重。

3.2 值函数设计

Q -Learning 是一种高效的强化学习算法,通过估计每个状态-动作所对应的价值来寻找最优策略^[22]。算法使用 Q 表来记录每个状态-动作对的 Q 值,并通过不断的探索与反馈更新这些 Q 值。具体更新规则是通过贝尔曼方程,根据当前的奖励和未来状态的最大 Q 值来调整当前 Q 值。随着训练的进行,智能体逐渐学会选择那些能最大化累积奖励的动作,从而优化决策过程。

通过 Q -Learning 算法不断迭代更新状态-动作值函数,帮助智能体在空气源热泵供热系统中逐步学习到最优的控制策略。在每一个决策时刻,智能体根据当前的系统状态选择一个动作,并根据反馈的奖励对其策略进行调整,不断积累关于不同动作效果的数据,从而更新 Q 值,以此指导其在未来的决策中选择最优动作。如式(15)所示。

$$Q(S_t, a_t) \leftarrow$$

$$[r_t + \gamma \max_{a_{t+1}} Q(S_{t+1}, a_{t+1}) + (1 - \alpha) Q(S_t, a_t)] \quad (15)$$

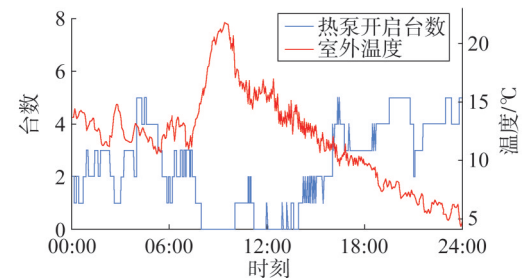
式中: $\alpha \in (0, 1)$ 学习率。通过不断更新值函数, Q -Learning 能够逐步逼近最优的控制策略,从而实现空气源热泵供热系统的温度控制目标。

为了进一步提升学习过程的效率和防止陷入局部最优解,本文采用 ϵ -greedy 策略。在该策略中,智能体以概率 ϵ 随机选择一个动作,以概率 $1-\epsilon$ 选择当前已知价值最高的动作,且在训练初期以较高的探索概率选择随机动作,而随着学习的深入,探索概率逐渐减小^[23]。通过自适应调整, Q -Learning 能够有效地实现节能控制,同时考虑用户的舒适性需求。

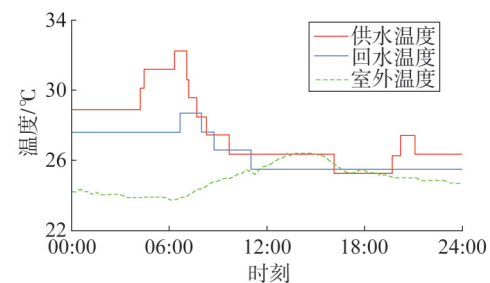
4 算例分析

4.1 供回水温度变化模型验证

为了验证本文所提建模方法的有效性,本部分结合某实际空气源热泵供热系统 2023 年 3 月 8 日运行数据与 2023 年 3 月 14 日现场调控实验数据,进行模型的关键参数辨识与模型正确性验证。模型参数辨识数据如图 3 所示。



(a) 热泵开机台数与室外温度



(b) 供回水温度与用户室内温度

图3 某空气源热泵供热系统实际运行数据

Fig.3 Actual operation data of air source heat pump heating system

结合空气源热泵供热系统相关运行参数,根据

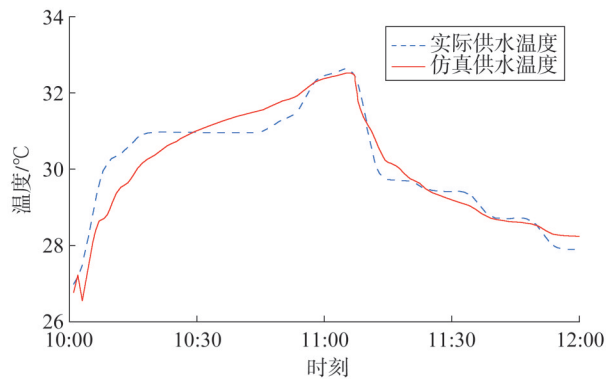
实际运行数据对模型仿真参数进行选取,仿真算例中能效比 λ_{cop} 更新步长为 5 min。供水延迟根据式(8)与实际参数进行综合计算求取,最终供水延迟选取为 $\tau_s=15$ min。加热延迟时间根据循环水流速以及管道程度进行估算,最终取 $\tau_h=7$ min,选取 10:00—12:00(室外环境温度为 15.2 °C)数据进行参数辨识,而验证数据选取 2023 年 3 月 14 日 10:00—12:00 启停实验数据进行模型验证。参数辨识结果如表 1 所示,模型验证结果如图 4 所示。

由供回水温度仿真结果可以看出,所提空气源热泵供热系统模型建模方法能够有效模拟供热系统供回水温度变化情况。经计算,对供水温度的仿真误差为 1.68%,回水温度的仿真误差为 1.51%,为后续基于强化学习的水温控制提供了模型基础。

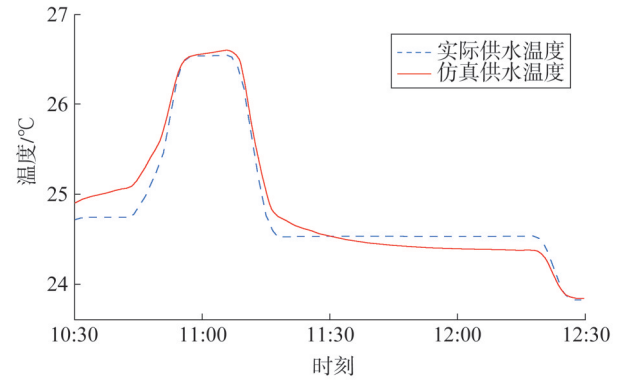
表 1 参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results

参数	辨识方法	辨识结果
C_w	输入 $T_r(t)$, 输出 $T_s(t)$	7.12×10^6
K_w	$K_w = \frac{n\lambda_{\text{cop}} P_N}{T_s(t) - T_r(t - \tau_h)}$	7.87×10^4
K_{a-w}	$K_{a-w} = \frac{K_w (T_s(t) - T_r(t - \tau_h))}{(T_s(t + \tau_s) - T_i(t))}$	7.59×10^4
C_{user}	输入 $\left(T_o(t) + \frac{K_{a-w}}{K_{\text{user}}} T_s(t)\right)$, 输出 $T_i(t)$	4.19×10^4
K_{user}	$K_{\text{user}} = \frac{K_{a-w} (T_s(t + \tau_s) - T_i(t))}{(T_i(t) - T_o(t))}$	3.32×10^9



(a) 供水温度仿真结果



(b) 回水温度仿真结果

图 4 供热系统供回水仿真结果与实际数据对比

Fig.4 Comparison of the simulation results of the supply and return water temperature with the actual data in the heating system

4.2 基于强化学习的控制策略验证

同样采用 2.2 节建模策略,本研究基于 2023 年 1 月某典型日运行数据评估控进行强化学习控制策略验证,以评估所提控制策略在保证用户舒适度以及响应分时电价变化的表现。仿真模型在设置中考虑了室内温度设定范围、供水温度上下限等约束条件,如式(16)所示。

$$\begin{cases} 18^\circ\text{C} \leq T_i(t) \leq 26^\circ\text{C} \\ 0 \leq n \leq 15 (n \text{ 为正整数}) \\ 45^\circ\text{C} \leq T_s(t) \leq 55^\circ\text{C} \\ 40^\circ\text{C} \leq T_r(t) \leq 50^\circ\text{C} \end{cases} \quad (16)$$

在强化学习模型训练过程中,探索概率 $\epsilon=0.6$,折扣率 $\gamma=0.1$ 。室内温度期望值设定为 22 °C,分时电价选取如图 5 所示。考虑到实际运行过程,控制指令的更新时间间隔设置为 1 h,以降低热泵启停损耗。

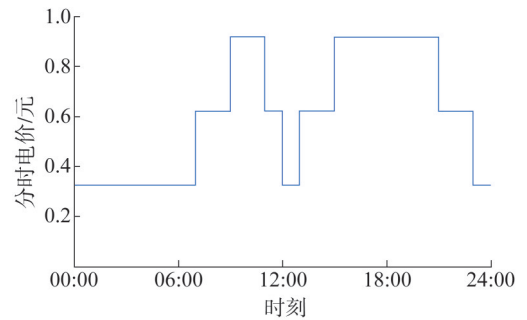


图 5 分时电价

Fig.5 Time-of-use pricing

图6和图7展示了本文所提控制策略下,智能体输出的最优开机台数方案与此方案下供回水温度及室内温度变化情况。根据仿真结果,优化后的系统一天总用电成本为1 090元,相较于优化前的1 204元,减少了9.5%的电力消耗。结合图5分时电价进行分析,可以发现在电价较低时段,系统通过适有序逐步增加热泵运行台数,提升供暖总功,并将一部分热量储存于室内空间;而在电价较高时段,系统则通过减少热泵的开机台数,降低供暖输出,用户室内温度逐渐降低,实现了用电负荷的主动转移。与此同时,基于强化学习的奖励函数,系统能够精准地控制供热量,使得用户室内温度始终保持在22℃左右。由此可见,强化学习控制方案不仅有效优化了系统的用电成本,还保障了用户的供暖舒适度。

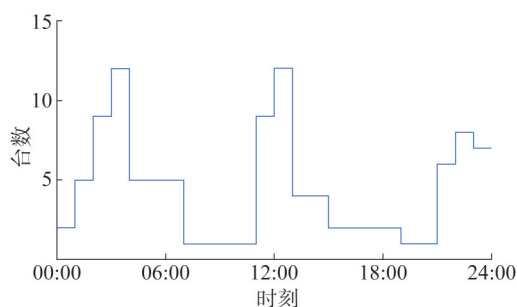


图6 强化学习控制下的开机台数

Fig.6 The number of power-on units under reinforcement learning control

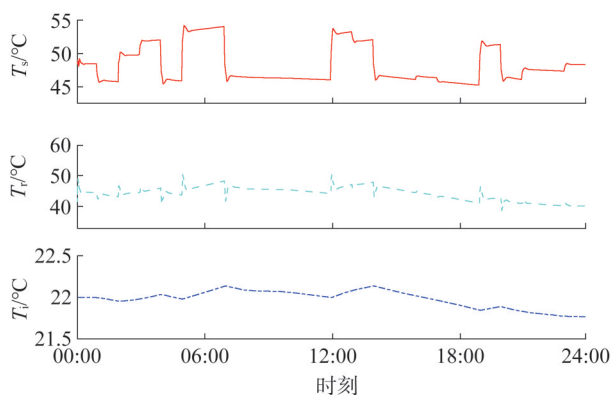


图7 强化学习控制下的供热系统温度变化情况

Fig.7 Temperature variation of heating system under reinforcement learning control

5 结论

结合分时电价背景,提出了一种基于深度强化

学习的空气源热泵供热系统优化控制策略,在维持用户室内温度在一定范围前提下,降低了供热系统的运行成本。文章主要研究成果如下。

1)建立了基于子空间法参数辨识的空气源热泵供热系统数学模型,基于实际运行数据的验证结果表明,所建立模型对供热系统供回水温度的预测结果较为准确,总误差在2%以内。

2)提出了基于Q-learning算法的空气源热泵供热系统优化控制策略,维持用户舒适度的同时,降低供热系统运行成本。作为一种调节潜力大的可调负荷资源,后续研究可以围绕空气源热泵供热系统与调峰辅助服务的强化学习控制方案进行展开。

参考文献

- [1] 龚俊祥,徐有琳,张菁,等.新型电力系统下配电网网络结构研究[J].山东电力技术,2024,51(1):45-51.
GONG Junxiang, XU Youlin, ZHANG Jing, et al. Research on the network structure of new power system distribution network [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(1): 45-51.
- [2] 康重庆,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研究框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [3] ZHAO J Y, WANG W, GUO C X. Hierarchical optimal configuration of multi-energy microgrids system considering energy management in electricity market environment [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144: 108572.
- [4] 刘萌,游大宁,刘航航,等.楼宇中央空调参与电网调度与控制应用研究[J].山东电力技术,2021,48(4):8-13.
LIU Meng, YOU Daning, LIU Hanghang, et al. Application of building central air conditioning participating in power grid dispatching and control [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(4): 8-13.
- [5] 李建凯,庄绪成,王海英,等.寒冷地区空气源热泵地板供暖系统运行及分析[J].建筑科学,2023,39(10):105-112.
LI Jiankai, ZHUANG Xucheng, WANG Haiying, et al. Operation and performance analysis of floor heating system of air-source heat pump in cold regions [J]. Building Science, 2023, 39(10): 105-112.
- [6] 刘洪,王亦然,李积逊,等.考虑建筑热平衡与柔性舒适度的乡村微能源网电热联合调度[J].电力系统自动化,2019,43(9):50-58.

- LIU Hong, WANG Yiran, LI Jixun, et al. Coordinated heat and power dispatch of micro-energy network of countryside considering heat balance model of building and flexible indoor comfort constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 50-58.
- [7] LI Z G, WU W C, WANG J H, et al. Transmission-constrained unit commitment considering combined electricity and district heating networks [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7 (2): 480-492.
- [8] CHEN Y W, GUO Q L, SUN H B, et al. A water mass method and its application to integrated heat and electricity dispatch considering thermal inertias[J]. Energy, 2019, 181: 840-852.
- [9] WANG D, ZHI Y Q, JIA H J, et al. Optimal scheduling strategy of district integrated heat and power system with wind power and multiple energy stations considering thermal inertia of buildings under different heating regulation modes [J]. Applied Energy, 2019, 240: 341-358.
- [10] ZHONG S Y, WANG X Y, ZHAO J, et al. Deep reinforcement learning framework for dynamic pricing demand response of regenerative electric heating [J]. Applied Energy, 2021, 288: 116623.
- [11] 焦焕炎,冯浩东,魏东,等.基于强化学习的地铁站空调系统节能控制[J].控制与决策,2022,37(12):3139-3148.
- JIAO Huanyan, FENG Haodong, WEI Dong, et al. Energy saving control for subway station air conditioning systems based on reinforcement learning [J]. Control and Decision, 2022, 37 (12): 3139-3148.
- [12] JUNG H. An optimal charging and discharging scheduling algorithm of energy storage system to save electricity pricing using reinforcement learning in urban railway system [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 17(1): 727-735.
- [13] GAO Y, MATSUNAMI Y, MIYATA S, et al. Operational optimization for off-grid renewable building energy system using deep reinforcement learning [J]. Applied Energy, 2022, 325: 119783.
- [14] DING Z K, FU Q M, CHEN J P, et al. Energy-efficient control of thermal comfort in multi-zone residential HVAC via reinforcement learning[J]. Connection Science, 2022, 34(1): 2364-2394.
- [15] DING Z H, HUANG Y H, YUAN H, et al. Introduction to reinforcement learning [M] // Deep Reinforcement Learning. Singapore: Springer Singapore, 2020: 47-123.
- [16] BELLMAN R. A Markovian decision process [J]. Journal of Mathematics and Mechanics, 1957: 679-684
- [17] 张军. 空气源热泵供热技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2021.
- [18] 刘萌,田雨扬,谢鑫,等.基于模型预测控制的空气源热泵负荷目标温度控制策略[J].山东电力技术,2022,49(12):53-59.
- LIU Meng, TIAN Yuyang, XIE Xin, et al. Precise temperature control strategy of air source heat pump load based on model predictive control [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49 (12): 53-59.
- [19] DUQUETTE J, ROWE A, WILD P. Thermal performance of a steady state physical pipe model for simulating district heating grids with variable flow[J]. Applied Energy, 2016, 178: 383-393.
- [20] 倪智宇,谭述君,吴志刚.线性时变反馈系统的状态空间模型和模态参数递推辨识[J].控制与决策,2016,31(2):324-330.
- NI Zhiyu, TAN Shujun, WU Zhigang. Recursive identification of state space model and modal parameter of linear time-varying feedback system[J]. Control and Decision, 2016, 31(2): 324-330.
- [21] 罗小锁,周国清,邹涛.基于子空间辨识的状态空间模型预测控制[J].计算机工程与应用,2012,48(19):234-237.
- LUO Xiaosuo, ZHOU Guoqing, ZOU Tao. State space model predictive control based on subspace identification [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(19): 234-237.
- [22] 赵德京,马洪聪,廖登宇,等.一种基于动作采样的Q学习算法[J].控制工程,2024,31(1):70-79.
- ZHAO Dejing, MA Hongcong, LIAO Dengyu, et al. An action-sampling based Q-learning algorithm [J]. Control Engineering of China, 2024, 31(1): 70-79.
- [23] 于飞,郝建国,张中杰.基于动作概率的强化学习动作探索策略[J].计算机应用与软件,2023,40(5):184-189.
- YU Fei, HAO Jianguo, ZHANG Zhongjie. Action exploration strategy of reinforcement learning based on action probability [J]. Computer Applications and Software, 2023, 40(5): 184-189.

收稿日期:2024-02-18

修回日期:2024-06-18

作者简介:

刘 伟(1970),男,高级工程师,主要研究方向为电网调度、电网建设;

高 嵩(1984),通信作者(rkjd9717@163.com),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制、负荷控制;

宋宗勋(1974),男,高级工程师,主要研究方向为电网调控运行、继电保护;

许晓康(1986),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网调控运行;

刘 萌(1986),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制、负荷控制。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.007

考虑火力发电深度调峰的高渗透率新能源电力系统优化调度

刘科^{1*}, 张利孟¹, 孟令彤², 刘恩生³, 王太⁴, 宋文浩¹

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003;

2. 中国石油大学(华东)石大山能新能源学院, 山东 青岛 266580;

3. 华电国际技术服务中心, 山东 济南 250014; 4. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003)

摘要:为解决高比例新能源接入电网所带来的弃风弃光问题,针对高渗透率新能源电力系统,提出一种考虑火力发电深度调峰与新能源消纳的优化调度模型。该模型优化目标是系统调度总成本最小,包括火力发电机组运行成本、深度调峰补偿、风光储运行成本以及弃风弃光惩罚成本。通过调用CPLEX求解器对5台火力发电机组、1个风电场、1个光伏电站和1个储能电站组成的电力系统进行优化调度求解,并针对储能调峰与火力发电深度调峰进行分析。结果表明,高比例新能源接入电网,会导致明显的弃风弃光问题,但接入储能电站,可以降低弃风弃光率,降低系统综合运行成本;仅靠储能调峰容易增加储能电站的建设费用,而加入火力发电深度调峰可降低储能配置容量,有效提高新能源消纳能力,且调峰深度越大,弃风弃光率越小,系统综合运行成本越小。

关键词:弃风弃光;优化调度;储能电站;深度调峰

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)01-0062-10

Optimal Scheduling of Power System With New Energy High Penetration and Deep Peak Regulation of Thermal Power Units

LIU Ke^{1*}, ZHANG Limeng¹, MENG Lingtong², LIU Ensheng³, WANG Tai⁴, SONG Wenhao¹

(1.State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2.College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

3.Huadian Power International Technical Service Center, Jinan 250014, China;

4.School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to solve the problem of abandoning wind and photovoltaic power under a high proportion of new energy integration, an optimal model of a power system with new energy consumption and deep peak regulation is established. The optimization objective of this model is the smallest system operating cost, including the operation cost of thermal power units, compensation of deep peak regulation of thermal power unit, operation cost of wind-photovoltaic-energy storage, and penalty cost of abandoned wind and photovoltaic power. CPLEX solver is utilized to obtain the optimal scheduling model of a power system with five thermal power units, one wind farm, one photovoltaic plant, and one energy storage power station. The peak regulation of energy storage and thermal power units is analyzed. The results show that the high proportion of new energy integration easily leads to the phenomenon of abandoned wind and photovoltaic power, but the energy storage power station can decrease the ratio of abandoned wind and photovoltaic power and reduce the system operating cost. However, relying solely on energy storage for peak shaving can easily increase the construction cost of energy storage power stations. Deep peak regulation of thermal power units can reduce the capacity of energy storage configuration and improve new energy consumption. Greater depth of peak shaving leads to a lower ratio of abandoned wind and photovoltaic power and the system operating cost.

基金项目:国网山东省电力公司电力科学研究院自主研发项目“储能运行对电网碳减排作用量化分析研究”(ZY-2023-05)。

Independent Research and Development Project of State Grid Shandong Electric Power Research Institute “Quantitative Analysis Research on the Effect of Energy Storage Operation on Carbon Reduction in the Power Grid” (ZY-2023-05).

Keywords: abandon wind and photovoltaic power; optimal scheduling; energy storage power station; deep peak regulation

0 引言

为解决能源危机与环境污染问题,风力、光伏等清洁能源得到迅速发展^[1-2]。风力发电、光伏发电大规模接入电网,能够有效降低碳排放量,有助于实现“双碳”目标。但是风光发电具有明显的反调峰特性,当电力系统中风力发电、光伏发电接入比例较高时,仅依靠火力发电机组常规调节,会造成火力发电机组频繁启停,不利于电网的安全稳定运行,同时,当系统可调容量不足时,也会导致严重的弃风弃光问题^[3-4]。为提升新能源消纳能力,确保电力系统安全可靠,需要进一步挖掘储能调峰与火力发电深度调峰能力,建立电力系统优化调度模型势在必行。

近年来,储能系统的规模化建设增加了电力系统可调容量,可有效提高新能源消纳能力,因此相关学者展开了一系列研究。文献[5]以提升新能源消纳为目标,建立了风光抽蓄联合系统优化调度模型,并对实例进行分析验证;文献[6]对风力发电机组出力进行预测,以系统运行成本最小为目标,建立了风火蓄联合系统优化调度模型;文献[7-10]针对风-光-火-蓄(储)联合系统的电力调度进行了研究,建立了优化调度模型,提高了新能源消纳能力;文献[11]与文献[12]在电力系统优化调度中进一步添加了燃气轮机机组和水电机组,分析了风光水气火储系统的调度特性。为实现电力系统低碳运行,相关学者也对低碳经济调度进行了探索。文献[13]与文献[14]将碳排交易成本引入目标函数,构建了风光火储低碳经济调度模型。耦合储能系统的优化调度模型提高了新能源消纳能力,但是为解决高渗透率新能源电力系统面临的调峰困境,火力发电深度调峰不可避免,需要在调度模型中进一步引入火力发电深度调峰。

火力发电深度调峰需要对火力发电机组进行改造与运行调整^[15],发电成本的计算方式与常规调峰机组不同。在电力系统调度中引入火电深度调峰,可有效提高风电消纳^[16-17]。因此,文献[18]针对火力发电深度调峰,建立环境经济调度模型,分析了机组的煤耗特性与CO₂排污特性;文献[19]采用聚类方法对深度调峰工况火力发电机组的负荷分配进行了研究。火力发电深度调峰的研究虽已有开展,但

是在高渗透率新能源电力系统中的应用研究还不充分。

鉴于此,在全面分析风光火储联合系统运行发电成本的基础上,引入弃风弃光惩罚成本、火力发电深度调峰成本与补偿等,构建考虑储能调峰与火力发电深度调峰的高渗透率新能源电力系统优化调度模型。根据该模型的分析结果进行优化调度,有望提升新能源消纳能力,改善风力发电、光伏发电的反调峰特性,进一步推进实现“双碳”目标。

1 电力系统优化调度模型

本文研究的电力系统包括火力发电机组、风电机组、光伏电站、储能电站,组成的联合系统如图1所示。风光发电具有随机性与反调峰特性,与电力用户的负荷需求不匹配,此时需要火力发电机组与储能电站进行调峰,使得系统输出负荷与电力用户需求负荷相匹配。为提高新能源消纳能力,在电力系统中引入弃风弃光惩罚成本、火力发电深度调峰成本与补偿,构建电力系统优化调度模型。

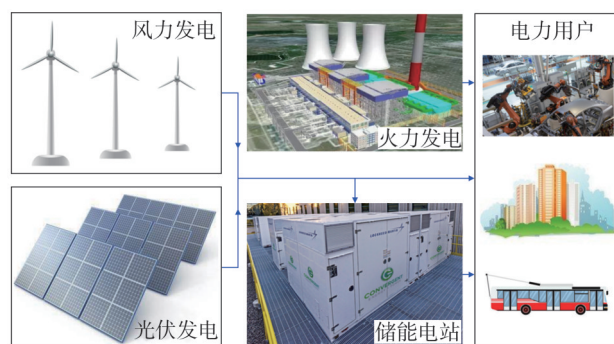


图1 风-光-火-储联合系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of wind-photovoltaic-thermal-energy storage hybrid system

1.1 目标函数

风-光-火-储联合系统的优化调度本质上是复杂的非线性优化问题,涉及各电源的运行约束与安全约束,优化目标是系统调度总成本最小,涉及弃风弃光惩罚成本、火力发电深度调峰成本与补偿等,表达式为

$$\min(F) = C_h + C_f + C_g + C_x + C_{qfg} - C_{bc} \quad (1)$$

式中: F 为系统综合成本; C_h 、 C_f 、 C_g 、 C_x 分别为火力发

电机组、风力发电、光伏发电、储能成本; C_{qfg} 为弃风弃光惩罚成本; C_{bc} 为火力发电深度调峰补偿。

1) 火力发电机组调峰运行成本。

火力发电机组调峰包括常规调峰(负荷率 50%~100%)、不投油深度调峰(负荷率 40%~50%)与投油深度调峰(负荷率 30%~40%)。

①火力发电机组常规调峰阶段的运行成本主要包括燃料成本 $C_{i,t}^{hfd}$ 、机组启停成本 $C_{i,t}^{qt}$ 与爬坡成本 $C_{i,t}^{pp}$, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} C_h = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_h} (C_{i,t}^{hfd} U_{i,t} + C_{i,t}^{qt} + C_{i,t}^{pp}) \\ U_{i,t} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为调度总时间; N_h 为火力发电机组数量; $U_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时段的状态标识, 0、1 分别代表火力发电机组停机与开机状态。

燃料成本的表达式为

$$C_{i,t}^{hfd} = (a_i P_{i,t}^{h2} + b_i P_{i,t}^h + c_i) w \quad (3)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为火力发电机组 i 的煤耗系数; w 为燃煤单价; $P_{i,t}^h$ 为火力发电机组 i 在 t 时段的出力。

机组启停成本的表达式为

$$\begin{cases} C_{i,t}^{qt} = S_{i,t}^{qd} C_i^{qd} + S_{i,t}^{qj} C_i^{qj} \\ S_{i,t}^{qd}, S_{i,t}^{qj} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_{i,t}^{qd}$ 、 $S_{i,t}^{qj}$ 为状态标志, 火力发电机组 i 在 t 时段由停机状态转变为开启状态时, $S_{i,t}^{qd} = 1$ 、 $S_{i,t}^{qj} = 0$, 反之, $S_{i,t}^{qd} = 0$ 、 $S_{i,t}^{qj} = 1$; C_i^{qd} 、 C_i^{qj} 分别为火力发电机组启动、停机一次的费用。

爬坡成本的表达式为

$$C_{i,t}^{pp} = \sigma_i \left| \frac{dP_{i,t}^h}{dt} \right| \quad (5)$$

式中: σ_i 为火力发电机组 i 的爬坡成本因子。前后时刻的功率相减除以间隔时段可以获得功率变化率。

②不投油深度调峰阶段, 转子会产生损耗, 减少机组使用寿命^[20]。因此成本包括燃料成本、机组启停成本、爬坡成本及损耗成本。机组损耗成本 w_i^{cost} 计算式为^[21]

$$w_i^{cost} = \lambda S_h / (2N_f (P_{i,t}^h)) \quad (6)$$

式中: λ 为火力发电机组损耗系数; S_h 为火力发电机组的整机成本; $N_f (P_{i,t}^h)$ 为转子致裂循环周次。

③投油深度调峰阶段, 为确保锅炉稳定燃烧, 需要向炉膛投油。因此, 需要考虑燃油成本, 表达

式为

$$C_{oil} = Q_{oil} S_{oil} \quad (7)$$

式中: Q_{oil} 为投油量; S_{oil} 为油价。

综上, 火力发电机组常规调峰阶段采用式(2)计算运行成本, 不投油深度调峰阶段运行成本表达式为

$$C_h = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_h} (C_{i,t}^{hfd} U_{i,t} + C_{i,t}^{qt} + C_{i,t}^{pp} + w_t^{cost}) \quad (8)$$

投油深度调峰阶段运行成本表达式为

$$C_h' = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_h} (C_{i,t}^{hfd} U_{i,t} + C_{i,t}^{qt} + C_{i,t}^{pp} + w_t^{cost}) + C_{oil} \quad (9)$$

2) 火力发电机组调峰补偿。

火力发电机组深度调峰会增加发电成本, 降低火力发电机组调峰积极性。因此, 需要对火力发电深度调峰进行补偿, 促进火力发电机组参与调峰过程。调峰补偿收益的表达式为

$$C_{bc} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_h} (\zeta^{if} P_{i,t}^{if}) \quad (10)$$

式中: ζ^{if} 为单位调峰电量的补偿费用; $P_{i,t}^{if}$ 为火力发电深度调峰电量。

3) 风-光-储运行维护成本。

风力发电、光伏、储能电站运行维护成本的表达式分别为:

$$C_f = \sum_{t=1}^T (\beta^f P_t^f) \quad (11)$$

$$C_g = \sum_{t=1}^T (\beta^g P_t^g) \quad (12)$$

$$C_x = \sum_{t=1}^T [\beta^x (P_t^{cd} + P_t^{fd})] \quad (13)$$

式中: β^f 、 β^g 、 β^x 分别为风力发电、光伏发电、储能电池的单位运行成本; P_t^f 、 P_t^g 分别为 t 时段风力发电与光伏发电的出力; P_t^{cd} 、 P_t^{fd} 分别为 t 时段储能电池的充放电功率。

4) 弃风弃光惩罚成本。

为提高新能源的消纳, 需要进一步考虑弃风弃光惩罚成本, 其相应表达式为^[22]

$$C_{qfg} = \sum_{t=1}^T (\gamma^{qf} P_t^{qf} + \gamma^{qg} P_t^{qg}) \quad (14)$$

式中: γ^{qf} 、 γ^{qg} 分别为弃风、弃光惩罚系数; P_t^{qf} 、 P_t^{qg} 分别为 t 时段弃风、弃光功率。

1.2 系统运行约束条件

1) 功率平衡约束。

系统运行过程中, 火力发电机组、风电机组、光

伏机组出力以及储能电站的充放电功率需要实时保持平衡,相应表达式为

$$\sum_{i=1}^{N_h} P_{i,t}^h + P_t^f + P_t^g - P_t^{cd} + P_t^{fd} = P_t^L \quad (15)$$

式中: P_t^L 为 t 时段的系统负荷。

2) 火力发电机组约束。

主要包括上下限约束、爬坡约束、开停时间约束,其中机组出力的上下限约束为

$$U_{i,t} P_{i,t}^{h_min} \leq P_{i,t}^h \leq U_{i,t} P_{i,t}^{h_max} \quad (16)$$

式中: $P_{i,t}^{h_min}$ 、 $P_{i,t}^{h_max}$ 分别为火力发电机组 i 在 t 时段的最小、最大出力。

火力发电机组爬坡约束的表达式为

$$-R_{i,t}^{h_down} \Delta t \leq P_{i,t}^h - P_{i,t-1}^h \leq R_{i,t}^{h_up} \Delta t \quad (17)$$

式中: $R_{i,t}^{h_down}$ 、 $R_{i,t}^{h_up}$ 分别为火力发电机组 i 的向下、向上爬坡速率。

火力发电机组开停时间约束的表达式为

$$\begin{cases} (T_{i,t-1}^{h_on} - T_{i,t-1}^{h_min_on})(U_{i,t-1} - U_{i,t}) \geq 0 \\ (T_{i,t-1}^{h_off} - T_{i,t-1}^{h_min_off})(U_{i,t} - U_{i,t-1}) \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: $T_{i,t-1}^{h_on}$ 、 $T_{i,t-1}^{h_off}$ 分别为火力发电机组 i 在 $t-1$ 时段的连续运行时长与连续停机时长; $T_{i,t-1}^{h_min_on}$ 、 $T_{i,t-1}^{h_min_off}$ 分别为火力发电机组 i 在 $t-1$ 时段的最小运行时长与最小停机时长。

火力发电机组不能同时启停,因此启停状态标志需要满足的逻辑约束为:

$$0 \leq S_{i,t}^{qd} + S_{i,t}^{qj} \leq 1 \quad (19)$$

$$U_{i,t} - U_{i,t-1} = S_{i,t}^{qd} + S_{i,t}^{qj} \quad (20)$$

3) 风电与光伏出力约束。

风电与光伏的出力应该小于其最大预测功率,相应表达式为:

$$0 \leq P_t^f \leq P_t^{f_max} \quad (21)$$

$$0 \leq P_t^g \leq P_t^{g_max} \quad (22)$$

式中: $P_t^{f_max}$ 、 $P_t^{g_max}$ 分别为 t 时段风电与光伏的最大预测功率。

4) 电池储能电站约束。

电池储能电站充放电功率约束的表达式为:

$$0 \leq P_t^{cd} \leq P_{t,max}^{cd} \quad (23)$$

$$0 \leq P_t^{fd} \leq P_{t,max}^{fd} \quad (24)$$

式中: $P_{t,max}^{cd}$ 、 $P_{t,max}^{fd}$ 分别为储能电站的最大充电、放电功率。

过充过放容易导致储能电池出现变形、漏电、容

量减少等问题,为避免此类不利影响,储能电站须满足荷电状态容量约束,相应表达式为:

$$E_{min} \leq E_t \leq E_{max} \quad (25)$$

$$\begin{cases} E_t = E_{t-1} + \left(u_{cd} P_t^{cd} \eta_{cd} - \frac{u_{fd} P_t^{fd}}{\eta_{fd}} \right) \Delta t \\ u_{cd}, u_{fd} \in \{0, 1\} \end{cases} \quad (26)$$

式中: E_{max} 、 E_{min} 为储能电站荷电状态容量上下限; η_{cd} 、 η_{fd} 分别为储能电站的充、放电效率; u_{cd} 、 u_{fd} 为状态标识, $u_{cd}=1$ 、 $u_{fd}=0$ 表示储能电站处于充电状态, $u_{cd}=0$ 、 $u_{fd}=1$ 表示储能电站处于放电状态,两者满足的逻辑约束如式(27)所示。

$$0 \leq u_{cd} + u_{fd} \leq 1 \quad (27)$$

为保证储能电站连续可靠运行,调度周期初始储能容量应等于调度周期结束时的储能容量,相应表达式为^[23]

$$E_{start} = E_{end} \quad (28)$$

式中: E_{start} 、 E_{end} 为初始和终止时刻的储能容量。

5) 旋转备用约束。

系统所需的正负旋转备用能力由火力发电机组与储能电站共同提供,表达式为:

$$\sum_{i=1}^{N_h} (U_{i,t} P_{i,t}^{h_max} - P_{i,t}^h) + P_t^{cnsy} \geq R_t^u \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^{N_h} (P_{i,t}^h - U_{i,t} P_{i,t}^{h_min}) + P_t^{fd} \geq R_t^d \quad (30)$$

式中: R_t^u 、 R_t^d 分别为系统正负旋转备用要求; P_t^{cnsy} 为储能电站剩余可用出力。

综上,风光火储联合系统优化调度的流程如图2所示,通过CPLEX求解器对系统优化调度模型进行求解,满足约束条件与目标函数的要求,获得最优的调度方案。

2 算例分析

本文系统调度周期 T 为24 h,时间间隔 Δt 为1 h,系统包含5台火力发电机组,其中3台600 MW机组参与深度调峰,2台300 MW机组不参与深度调峰,火力发电机组装机总容量为2 400 MW,相关参数如表1所示,其中煤耗系数采用文献[19,24]中的数据,燃煤价格为600元/t,爬坡成本因子为25元/(MW/h)。风电场、光伏电站的装机容量分别为1 800 MW与900 MW,新能源渗透率为53%。风电场、光伏电站的运行成本均取80元/MW,弃风弃

光惩罚成本为 500 元/MW,储能电站的运行成本取 50 元/MW,储能电站的最大充放电功率为储能电站容量的 20%,荷电状态容量下限与上限分别为容量的 10% 与 90%。

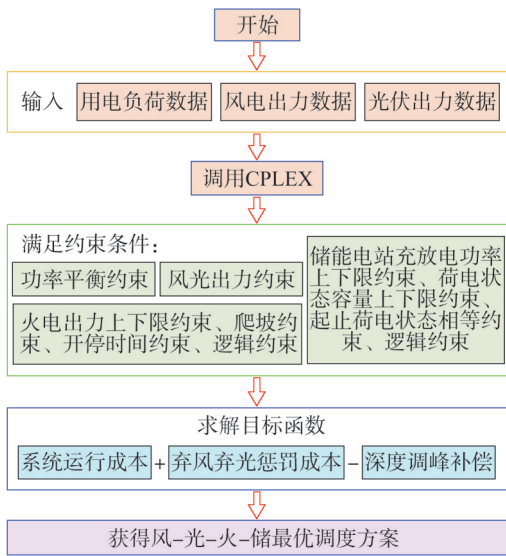


图2 电力系统优化调度流程图

Fig.2 Optimal scheduling flow chart of electric power system

表 1 火力发电机组参数

Table 1 Parameters of Thermal power units

序号	参数	600 MW	300 MW
1	台数	3	2
2	最大发电功率/MW	600	300
3	最小发电功率/MW	300	150
4	(常)煤耗系数 $a_f/(t/(MW)^2)$	0.000 030 995	0.000 121
	(深)煤耗系数 $a_f/(t/(MW)^2)$	0.000 472 6	
5	(常)煤耗系数 $b_f/(t/MW)$	0.251 5	0.232
	(深)煤耗系数 $b_f/(t/MW)$	0.085 3	
6	(常)煤耗系数 c_f/t	19.501 9	16.507
	(深)煤耗系数 c_f/t	37.096 9	
7	向上爬坡速率/(MW/min)	6	3
8	向下爬坡速率/(MW/min)	6	3
9	启停成本/元	30 000	15 000
10	连续运行(停机)时长/h	6	4

图 3 给出了系统日内负荷变化的预测曲线,午高峰与晚高峰的时间段分别为 12:00—16:00 与 19:00—21:00,最小负荷出现在 03:00—06:00。最高负荷为 2 520 MW,大于火力发电机组装机容量,最低负荷为 1 930 MW,负荷的峰谷差为 590 MW。图 4 给出了风力发电与光伏发电出力的变化曲线,从中可以发现风电负荷具有明显的随机波动特性,在 04:00—08:00 时段风电出力较大,但是负荷需求较低,容易发生弃风现象,此时间段内风电出力呈现反调峰特性;在 19:00—21:00 时段负荷需求较大,但风电出力较小,也呈现明显的反调峰特性。光伏出力高峰一般出现在 10:00—14:00,此时段容易出现弃光现象,日内变化呈现明显的昼发夜停特点。

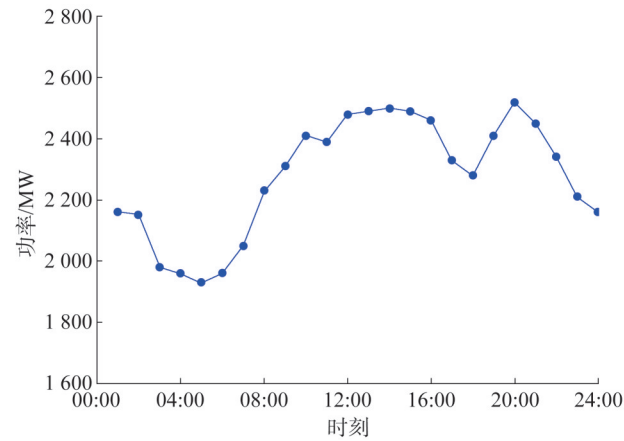


图3 系统负荷变化预测曲线

Fig.3 Prediction curve of system load

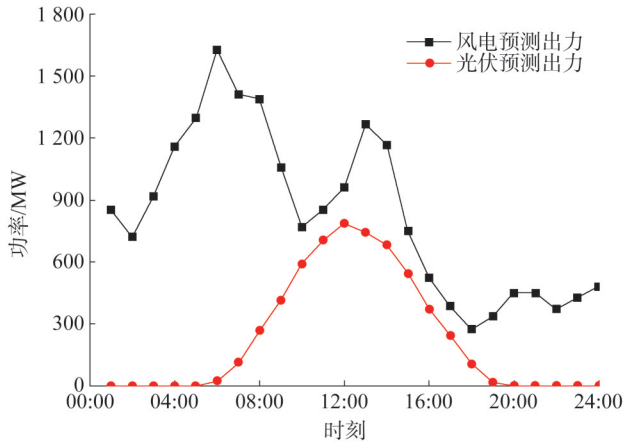


图4 风电与光伏出力预测曲线

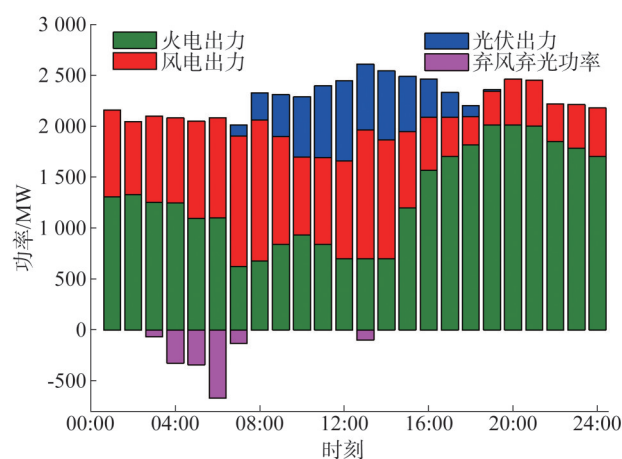
Fig.4 Prediction curve of wind and photovoltaic output

为探究火力发电深度调峰与储能调峰对高渗透率新能源电力系统调度的影响,本文设置了两种调度方案,分别为:方案1,火力发电常规调峰且不参与深度调峰,研究储能容量对系统调度与新能源消纳的影响,分析各成本的变化规律;方案2,火力发电参与深度调峰。

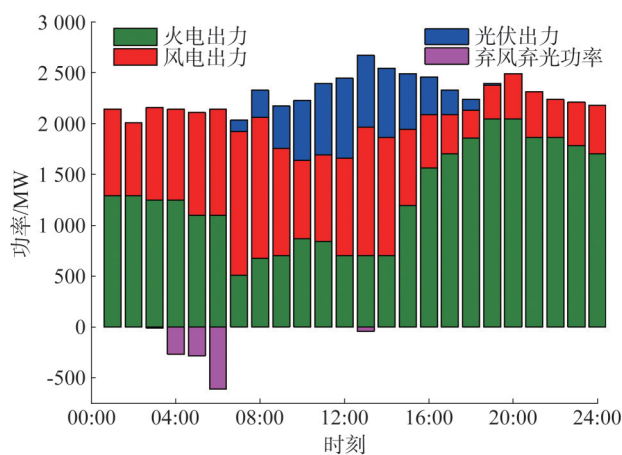
2.1 方案1 结果分析

新能源大规模接入电网容易导致弃风弃光等问题。为解决这些问题,储能电站起着至关重要的作用。为探究储能容量对系统调度的影响,配置不同容量。图5给出300 MW、600 MW、900 MW 3种储能容量对应的日前优化调度输出功率及弃风弃光功率。当储能容量较低时(300 MW),9个时刻出现弃风弃光现象,其主要出现在风电与光伏出力高峰期。储能容量升至600 MW与900 MW时,弃风弃光出现的时刻分别降为6个与4个,光伏出力高峰期的风光消纳得到明显改善,但是在04:00—06:00时段依然存在明显的弃风弃光现象,主要是因为此时段社会用电负荷较低,但是此时段风力发电的出力比较高。图6给出了储能电站充放电及剩余电量变化情况,储能电站的充电时段主要分布在风电出力高峰与光伏出力高峰时段,而在用电负荷需求较大时放电,提高了电力系统消纳新能源的能力。

表2列出了不同储能容量对应的系统运行成本,由表可知,随着储能容量的增加,弃风弃光率从10.27%逐渐降为4.74%,惩罚成本从130.85万元逐渐降至60.35万元,储能容量越大,风光消纳效果越好。同时,火力发电机组的燃料成本也有所降低,

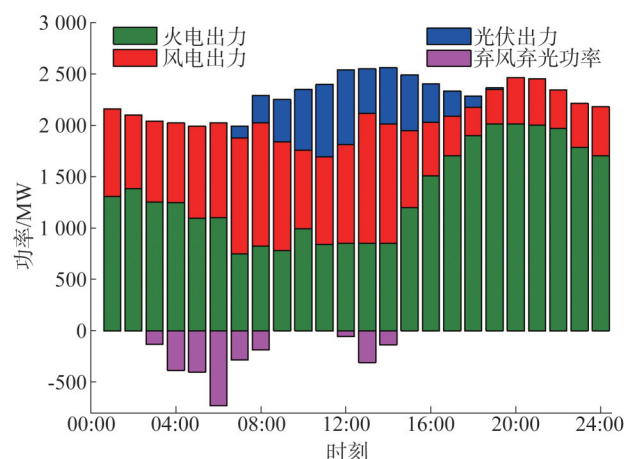


(b) 储能容量 600 MW

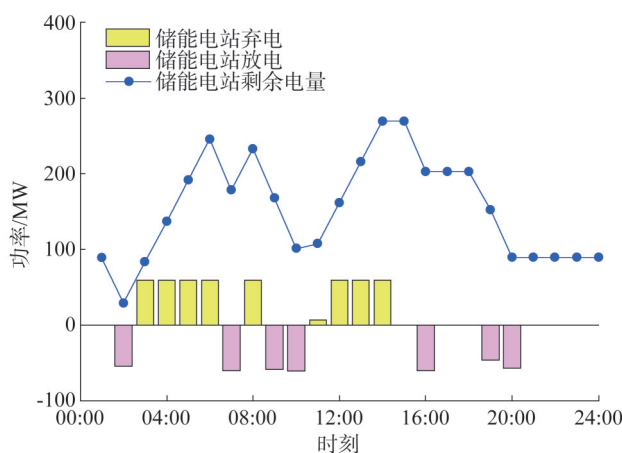


(c) 储能容量 900 MW

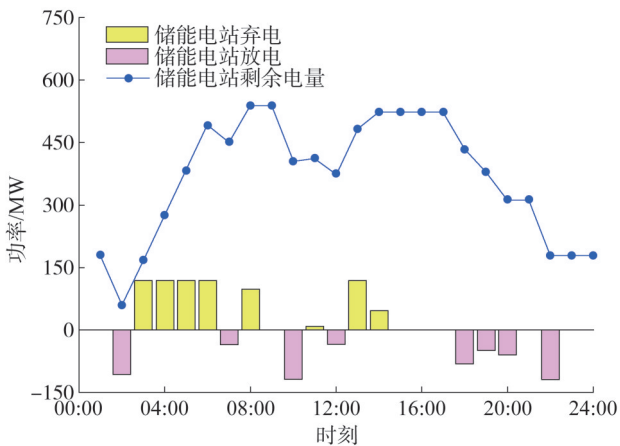
图5 不同储能容量对应的优化调度输出及弃风弃光功率
Fig.5 Output powers of units and powers of abandoned wind and photovoltaic power for different energy storage capacity



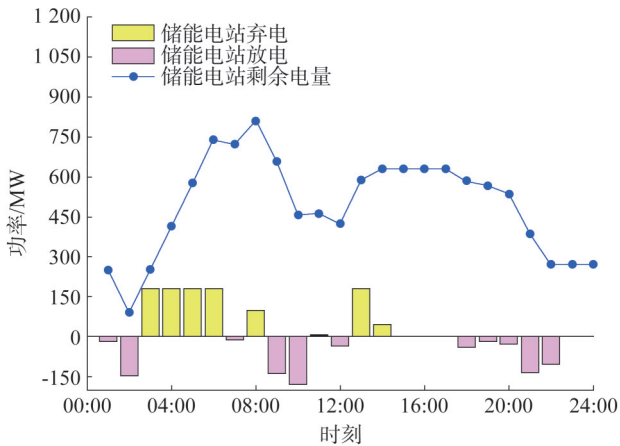
(a) 储能容量 300 MW



(a) 储能容量 300 MW



(b) 储能容量 600 MW



(c) 储能容量 900 MW

图6 不同容量的储能电站充放电及剩余电量变化
Fig.6 Charge/discharge process and state of charge of energy storage power station with different capacity

风-光运行成本略有升高,系统调度总成本由946.43万元降至866.43万元。可见,储能电站可有效避免高比例新能源接入电力系统所带来的弃风弃光问题,降低系统运行总成本。

图7进一步展示了储能容量对系统调度总成本

与弃风弃光率的影响,随着储能容量的增加,系统调度总成本与弃风弃光率逐渐减小,但是减小的幅度也逐渐减小。储能容量高达1500 MW时,弃风弃光率为3.13%,与储能容量900 MW相比,并未降低很多。可见,仅靠储能电站提高新能源消纳能力存在一定不足,容易增加储能建设费用,需要进一步发挥火力发电深度调峰潜力。

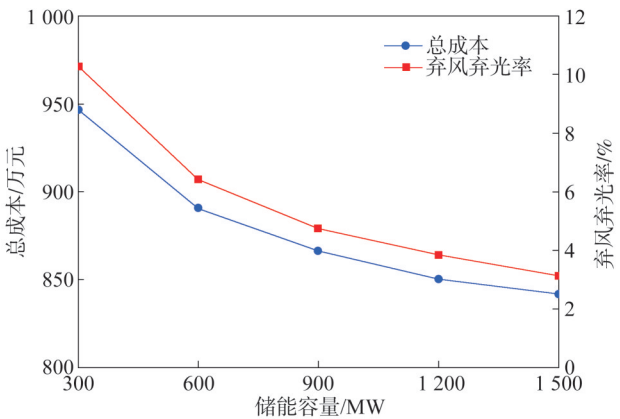


图7 储能容量对总成本与弃风弃光率的影响
Fig.7 Influence of energy storage capacity on total cost and abandoned wind and photovoltaic power rates

2.2 方案2结果分析

为提高新能源消纳能力,火力发电深度调峰势在必行,方案2采用文献[25]的方法计算机组损耗成本,投油深度调峰阶段的投油量为3.5 t/h,油价为6000元/t,深度调峰的经济补偿为400元/MWh。图8给出了储能容量300 MW、火力发电调峰深度70%对应的优化调度输出及弃风弃光功率,图9展示了火力发电调峰深度70%时储能电站的充放电及剩余电量变化情况。

表2 不同储能容量对应的系统运行成本

Table 2 Operation Cost for different energy storage capacity

储能容量/MW	火力发电机组			风-光发电机组			储能电站运行成本/万元	总成本/万元
	燃料成本/万元	启停成本/万元	爬坡成本/万元	运行成本/万元	弃风弃光率/%	惩罚成本/万元		
300	605.75	16.50	6.00	182.92	10.27	130.85	4.41	946.43
600	584.22	21.00	6.07	190.76	6.42	81.85	6.79	890.69
900	575.78	21.00	5.60	194.20	4.74	60.35	9.50	866.43

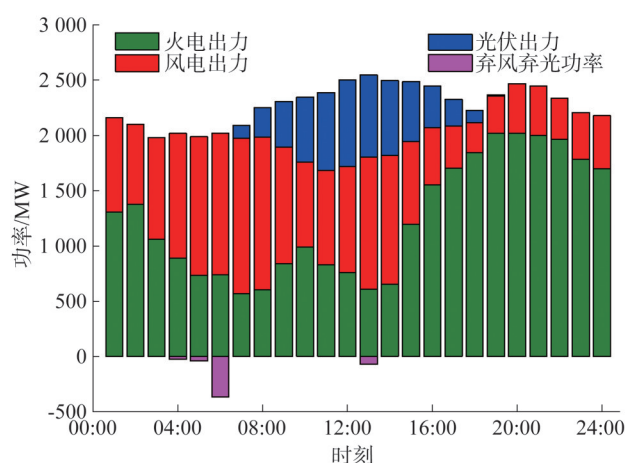


图8 火力发电调峰深度70%时优化调度输出
及弃风弃光功率

Fig.8 Output powers and powers of abandoned wind and photovoltaic power in one day for peak regulation depth 70%

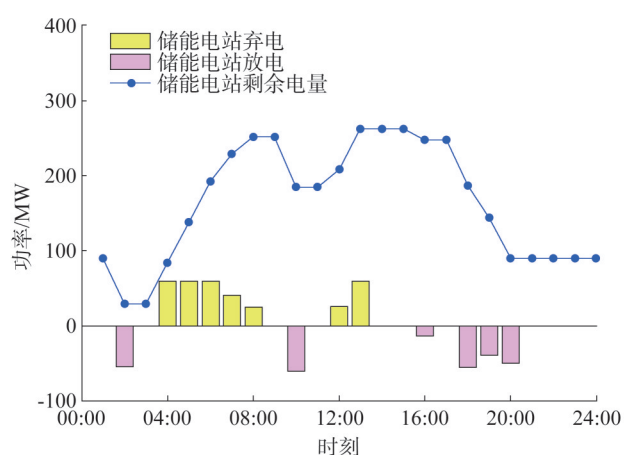


图9 火力发电调峰深度70%时储能电站充放电
及剩余电量的变化

Fig.9 Charge/discharge process and state of charge of energy storage power station for peak regulation depth 70%

对比图8与图5(a)可知,弃风弃光出现的时刻由9个降为4个,且弃风弃光功率也明显下降,弃风弃光率从10.27%降至2%,惩罚成本从130.85万元降至25.45万元。火力发电机组的燃料成本从605.75万元降至568.63万元,启停成本由16.5万元降至13.5万元,但是增加了深度调峰成本29.89万元,获得深度调峰补偿23.72万元。系统调度总成本从946.43万元降至823.35万元。可见,火力发电深度

调峰可明显增强新能源消纳能力,降低火力发电机组启停次数,提高电力系统调度的经济性。对比图9与图6(a)可知,火力发电深度调峰的介入,储能电站的充电次数与放电次数均减少,减轻了储能电站的运行压力。

图10给出了系统调度总成本与弃风弃光率随火力发电调峰深度的变化,火力发电调峰深度由50%逐渐增加至70%,系统调度总成本与弃风弃光率均逐渐减小。

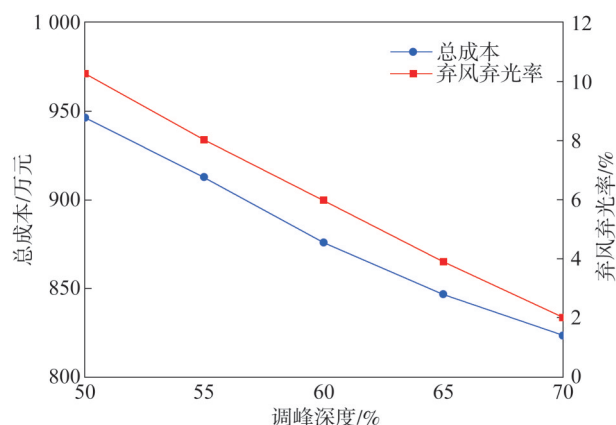


图10 火力发电调峰深度对总成本与弃风弃光率的影响

Fig.10 Influence of peak regulation depth of thermal power unit on total cost and abandoned wind and photovoltaic power rates

3 结论

针对高渗透率新能源电力系统,提出一种考虑新能源消纳与火力发电深度调峰的优化调度模型,该模型充分考虑了火力发电机组运行成本、风光储运行成本、弃风弃光惩罚成本以及深度调峰补偿等。调用CPLEX求解器对优化调度模型进行求解,并针对储能调峰与火力发电深度调峰进行分析,结论如下:

1)高渗透率新能源电力系统存在明显的弃风弃光现象,但储能电站的接入可提高新能源消纳比例,且储能容量越大,风光消纳效果越好,也可进一步降低系统运行总成本。

2)仅靠储能电站提高新能源消纳能力存在一定不足,容易增加储能建设费用,而火力发电深度调峰的接入可以有效提高新能源消纳能力,且调峰深度越大,弃风弃光率越小,系统调度总成本越小。

参考文献

- [1] 乔路丽,方诗琦,赵庭锐,等.基于相似日和IGA-BP的光伏发电功率预测方法研究[J].电网与清洁能源,2022,38(1):128-134.
QIAO Luli, FANG Shiqi, ZHAO Tingyue, et al. A study on the forecasting method of photovoltaic power generation based on similar day and IGA-BP [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(1): 128-134.
- [2] 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.
ZHAO Dongmei, WANG Haoxiang, TAO Ran. A multi-source coordinated optimal scheduling model considering wind-load uncertainty [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 707-718.
- [3] 甘伟,艾小孟,方家琨,等.风-火-水-储-气联合优化调度策略[J].电工技术学报,2017,32(增刊1):11-20.
GAN Wei, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Coordinated optimal operation of the wind, coal, hydro, gas units with energy storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32 (S1): 11-20.
- [4] 姜枫,鲍峰,姬联涛,等.考虑抽蓄-风-光-火联合系统运行经济效益的日前优化调度研究[J].水力发电,2022,48(1):99-105.
JIANG Feng, BAO Feng, JI Liantao, et al. Research on optimization of day-ahead dispatching of pumped storage-wind power-photovoltaic-thermal power hybrid system considering operating economic benefit [J]. Water Power, 2022, 48(1): 99-105.
- [5] 马实一.风电-光伏-抽水蓄能联合优化运行模型建立与应用[J].供用电,2018,35(1):80-85.
MA Shiyi. Modeling and application of combined optimization operation of wind power, photovoltaic generation and pumped storage station [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 80-85.
- [6] 马丽叶,王志强,陆肖宇,等.基于机会约束规划的风-火-蓄联合系统优化调度[J].电网技术,2019,43(9):3311-3320.
MA Liye, WANG Zhiqiang, LU Xiaoyu, et al. Optimal scheduling of combined wind-thermo-storage system based on chance constrained programming [J]. Power System Technology, 2019, 43 (9): 3311-3320.
- [7] 安磊,王绵斌,齐霞,等.“风、光、火、蓄、储”多能源互补优化调度方法研究[J].可再生能源,2018,36(10):1492-1498.
AN Lei, WANG Mianbin, QI Xia, et al. Optimal dispatching of multi-power sources containing wind/photovoltaic/thermal/hydro-pumped and battery storage [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(10): 1492-1498.
- [8] 王明松.风-光-蓄-火联合发电系统的两阶段优化调度策略[J].电网与清洁能源,2020,36(5):75-82.
WANG Mingsong. Two-stage optimal dispatching strategy of the wind-solar-pumped storage-thermal combined system [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 75-82.
- [9] 邵磊,多增森,柴嘉启,等.抽蓄-风-光-火联合系统日前优化调度研究[J].电网与清洁能源,2023,39(6):108-114.
SHAO Lei, DUO Zengsen, CHAI Jiaqi, et al. A study on the day-ahead optimal scheduling of the pumped storage-wind-solar-thermal combined system [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 108-114.
- [10] 罗远翔,王宇航,刘铖,等.风-光-火-蓄联合系统两阶段优化调度[J].太阳能学报,2023,44(1):500-508.
LUO Yuanxiang, WANG Yuhang, LIU Cheng, et al. Two-stage optimal dispatching of wind power-photovoltaic-thermal power-pumped storage combined system [J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(1): 500-508.
- [11] 李志伟,赵书强,刘金山.基于机会约束目标规划的风-光-水-气-火-储联合优化调度[J].电力自动化设备,2019,39(8):214-223.
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Jinshan. Coordinated optimal dispatch of wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-storage system based on chance-constrained goal programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 214-223.
- [12] 韩江丽,肖白,韩江乐.含风光水气火蓄的多能源电力系统日运行优化调度方法[J].东北电力大学学报,2020,40(3):50-58.
HAN Jiangli, XIAO Bai, HAN Jiangle. A daily operation optimization scheduling method of multi-energy power system with wind-photovoltaic-hydro-gas-thermal-pumped storage [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2020, 40 (3): 50-58.
- [13] 杨贤东,袁旭峰,熊炜,等.考虑源荷不确定性的风光火储系统低碳经济调度[J].智慧电力,2022,50(8):22-29.
YANG Xiangdong, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Low-carbon economic dispatch of wind-solar-fired-storage system considering source-load uncertainty [J]. Smart Power, 2022, 50(8): 22-29.
- [14] 王荣茂,刘森,张晔,等.基于碳交易与碳捕捉均衡成本的风光火储系统低碳调度技术[J].可再生能源,2023,41(4):562-568.
WANG Rongmao, LIU Miao, ZHANG Ye, et al. Low carbon scheduling technology for wind-pv-thermal-storage system based on carbon trading and carbon capture cost balance [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(4): 562-568.
- [15] 戚鹏.680 MW超临界机组深度调峰技术实践研究[J].山东电力技术,2023,50(1):71-75.
QI Peng. Practical research on deep peak regulation technology of a 680 MW supercritical unit [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50 (1): 71-75.
- [16] 靳伯阳.计及辅助服务收益热电联产机组深度调峰技术的经济性[J].分布式能源,2022,7(6):52-59.
JIN Boyang. Techno-economic analysis of deep peak regulation of combined heat and power units considering the benefits of auxiliary service [J]. Distributed Energy, 2022, 7(6): 52-59.

- [17] 崔杨,安宁,付小标,等.考虑风电消纳与火-储深度调峰的系统优化调度及补偿费用分摊策略[J].电力自动化设备,2023,43(5):86-95.
CUI Yang, AN Ning, FU Xiaobiao, et al. Optimal scheduling of system and compensation cost sharing strategy considering wind power consumption and thermal-storage deep peak shaving[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5):86-95.
- [18] 喻心,王德林,孙超,等.不同调峰深度下火电机组的环境经济调度优化[J].太阳能学报,2023,44(6):152-160.
YU Xin, WANG Delin, SUN Chao, et al. Environmental economic dispatch optimization of thermal power units at different peak-load regulation depths[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(6):152-160.
- [19] 任燕燕,曹惠琳,姜海岩,等.基于聚类的火电机组深度调峰负荷优化分配研究[J].热力发电,2023,52(9):48-57.
REN Yanyan, CAO Huilin, JIANG Haiyan, et al. Load optimal distribution of deep peak regulation for thermal power units based on clustering[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9):48-57.
- [20] 车永强,张彦飞,刘玉智,等.调峰及低负荷运行对汽机侧设备的影响分析[J].山东电力技术,2022,49(5):13-17.
CHE Yongqiang, ZHANG Yanfei, LIU Yuzhi, et al. Influence analysis of peak load regulation and low load operation on turbine equipment[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(5):13-17.
- [21] 林俐,田欣雨.基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J].电网技术,2017,41(7):2255-2263.
LIN Li, TIAN Xinyu. Analysis of deep peak regulation and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2255-2263.
- [22] 李雄威,王昕,顾佳伟,等.考虑火电深度调峰的风光火储系统日前优化调度[J].中国电力,2023,56(1):1-7.
LI Xiongwei, WANG Xin, GU Jiawei, et al. Day-ahead optimal dispatching of wind-solar-thermal power storage system considering deep peak shaving of thermal power[J]. Electric Power, 2023, 56(1):1-7.
- [23] 郭斌琪,张江丰,苏烨,等.考虑电池容量衰减的风火储优化调度策略[J].电器与能效管理技术,2021(9):32-39.
GUO Binqi, ZHANG Jiangfeng, SU Ye, et al. Optimal scheduling strategy of wind, fire and energy storage considering battery capacity degradation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(9):32-39.
- [24] 李雄威,王昕,徐家豪,等.考虑火电深度调峰的风光火储系统分层优化调度模型[J].油气与新能源,2023,35(6):74-81.
LI Xiongwei, WANG Xin, XU Jiahao, et al. A hierarchical optimal scheduling model of wind-photovoltaic-thermal-energy storage system considering deep peak shaving of thermal power[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(6):74-81.
- [25] 于国强,刘克天,胡尊民,等.大规模新能源并网下火电机组深度调峰优化调度[J].电力工程技术,2023,42(1):243-250.
YU Guoqiang, LIU Ketian, HU Zunmin, et al. Optimal scheduling of deep peak regulation for thermal power units in power grid with large-scale new energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1):243-250.

收稿日期:2024-01-29

修回日期:2024-05-29

作者简介:

刘 科(1986),通信作者(luliuke@163.com),男,硕士,高级工程师,从事燃煤电厂深度调峰与节能减碳、电力系统优化调度等工作;

张利孟(1989),男,硕士,高级工程师,从事煤电机组节能诊断优化等工作;

孟令彤(2004),女,研究方向为电力系统优化调度;

刘恩生(1976),男,硕士,正高级工程师,从事火电生产运营管理等工作;

王 太(1986),男,博士,讲师,从事发电新技术的开发及应用等工作;

宋文浩(1996),男,博士后,工程师,从事碳减排、电力系统优化调度等工作。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.008

·输变电·

邻近变电站终端塔级联接地降阻策略研究

毛惠卿¹,高 涛¹,张建伟²,张 凯¹,穆明亮¹,田海鹏^{2*}

(1. 国网山东省电力公司滨州供电公司, 山东 滨州 256600; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:在邻近变电站的终端塔接地网中,终端塔接地网的接地面积有限,而对其接地电阻要求较高,并且金属接地材料易发生腐蚀导致终端塔无法有效进行接地。为解决上述问题,采用有限元软件对柔性石墨接地材料在终端塔接地网中的应用进行了研究,提出了有限面积下的级联接地降阻策略,并与其他接地降阻形式接地网的接地特性进行对比分析。仿真结果表明:在传统接地结构下,柔性石墨材料的接地网能够小幅度地降低接地电阻;在其他条件相同的情况下,随土壤电阻率升高,级联接地网的降阻效率与分流系数逐渐升高,而其他降阻形式接地网基本不发生变化;随着接地极长度的增加,三种降阻形式接地网的降阻效率与分流系数均逐渐升高,而级联接地网的降阻效率始终高于其他接地网,由此可得级联接地网能够有效降低接地电阻,提高接地网散流效率。

关键词:柔性石墨;级联接地;接地降阻;有限元

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)01-0072-09

Research on Resistance Reduction Strategy of Terminal Tower-level Connection Ground in Adjacent Substation

MAO Huiqing¹, GAO Tao¹, ZHANG Jianwei², ZHANG Kai¹, MU Mingliang¹, TIAN Haipeng^{2*}

(1.State Grid Binzhou Power Supply Company, Binzhou 256600, China;

2.School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: In the terminal tower grounding grid near the substation, the grounding area of the terminal tower grounding grid is limited, the grounding resistance is high, and the metal grounding material is easy to corrode, so the terminal tower cannot be effectively grounded. In order to solve the above problems, the application of flexible graphite grounding material in terminal tower grounding grids is studied by using finite element software, and the strategy of cascade grounding resistance reduction under a limited area is proposed, and the grounding characteristics are compared with other grounding resistance reduction types. The simulation results show that the flexible graphite grounding grid can reduce the grounding resistance slightly under the traditional grounding structure. Under the same conditions, with the increase of soil resistivity, the resistance reduction efficiency and shunt coefficient of the cascade grid increase gradually, while the other resistance reduction types of the grid basically do not change. With the increase of the length of the grounding pole, the resistance reduction efficiency and shunt coefficient of the three types of grounding grids are gradually increased, and the resistance reduction efficiency of the cascade grounding grid is always higher than that of other grounding grids. It can be seen that the cascade grounding grid can effectively reduce the grounding resistance and improve the scattering efficiency of the grounding grid.

Keywords: flexible graphite; level connection ground; grounding resistance reduction; finite element

0 引言

变电站接地网是保证输变电站设备安全稳定运

行的基础过电压和防静电装置^[1-2]。变电站接地装置不仅关乎人身和设备安全,更对整个变电系统的稳定运行至关重要^[3-4]。在实际情况中,临近变电站的终端塔接地网面临着严重的腐蚀问题,为保证变电站内设备的安全,近站终端塔的散流降阻要求较为严格,且由于靠近变电站,近站终端塔接地网的施工面积受到限制。因此,有效解决接地材料的腐蚀问题,对确保接地系统稳定性和可靠性以及保障电

基金项目:国家自然科学基金项目(52304068);国网山东省电力公司科技项目(520615220001)。

National Natural Science Foundation of China (52304068); Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (520615220001)。

力系统的人身和财产安全至关重要^[5-7]。

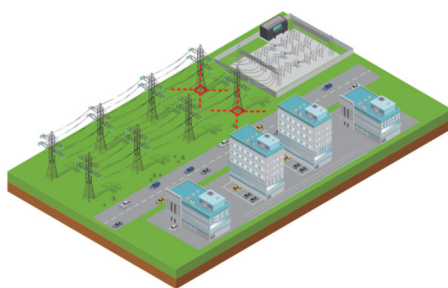
为降低杆塔的接地电阻,国内外学者对输电杆塔接地网的接地降阻策略展开了大量研究分析^[8-10]。文献[11-12]提出了构建与主接地网相连的引外接地网的接地降阻策略,通过研究引外距离、引外接地网面积以及土壤电阻率等因素的影响规律,得出了引外接地网设计的最佳接地降阻方案。文献[13]装设一个与接地极相连的绝缘平行导体来实现降阻,且通过仿真与试验验证,上述方法可有效降低杆塔的接地电阻。杨超^[14]验证了采用降阻剂降阻的实际效果。但在实际情况中,某些降阻剂会加速接地网腐蚀,并且还会对环境造成污染^[15-16],因此降阻剂的使用受到了很大的限制。文献[17-19]提出在水平接地极上装设针刺式接地装置来降低接地电阻的接地降阻策略。

文中首先通过搭建近站终端塔外延型接地网有限元仿真模型,对比分析了柔性石墨材料与典型金属材料接地网的接地降阻与散流效率;其次提出了有限面积下的级联接地降阻方案,并研究了土壤电阻率及接地极长度对级联接地降阻与接地散流特性的影响,为近变电站终端塔接地降阻提供参考。

1 近站杆塔柔性石墨材料应用研究

由于柔性石墨材料拥有优良的耐腐蚀性能,为解决临近变电站终端杆塔金属接地网面临的腐蚀问题,将耐腐蚀性较差的镀锌钢替换为柔性石墨作为接地网材料。为验证替代方案在接地电阻与接地散流方面的可行性,采用有限元软件搭建杆塔典型外延接地网仿真模型,近站终端塔外延型接地示意图如图1所示。

图1中 L_0 为接地网方框的长度, L_1 为接地网方框间的距离, L_2 为方框接地网单根外延接地极的长度。仿真中, L_0 取10 m、 L_1 取40 m、 L_2 取10 m。模拟仿真采用的接地材料参数如表1所示^[20]。



(a) 杆塔外延接地网

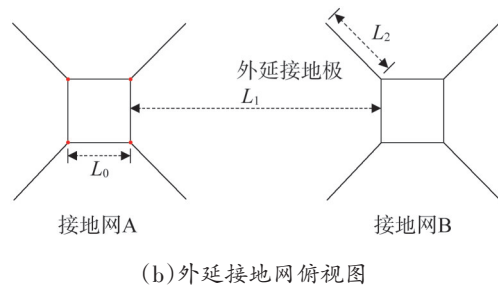


图1 近站终端塔外延型接地示意图

Fig.1 The extension grounding diagram of the near-station terminal tower

表1 模拟仿真材料基本参数

Table 1 Basic parameters of materials in the simulation

参数	柔性石墨	镀锌钢
电导率/(S/m)	30 769.23	520 833.33
相对介电常数	12	1

仿真模型中,接地电阻计算式为

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

式中: U 为接地体终端电压; I 为流入接地体的雷电流幅值。

为更直观准确地表示接地网的接地分流特性,引入分流系数 φ 来直观地表明某一相关因素对接地网接地极分流的影响规律,定义接地网的分流系数 φ 为

$$\varphi = \frac{I_r}{I_s} \times 100\% = \frac{S J_r}{S J_s} \times 100\% = \frac{J_r}{J_s} \times 100\% \quad (2)$$

式中: I_r 为流入接地网水平接地极的电流; I_s 为流入接地网接地引下线的总电流; J_r 为接地网水平接地极的电流密度; J_s 为接地网引下线的电流密度; S 为接地网材料的截面积。

采用幅值为100 kA的标准雷电流,土壤电阻率自 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 增加到 $1\,200 \Omega \cdot \text{m}$,经过仿真可得土壤电阻率对柔性石墨材料与镀锌钢接地网的接地电阻及降阻效率的影响,如图2所示。

由图2仿真结果可得,在相同接地网外延极长度时,随着土壤电阻率的增加,不同材料接地网的接地电阻随之升高,整体呈现线性上升的变化趋势。当土壤电阻率自 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 增加到 $1\,200 \Omega \cdot \text{m}$ 时,柔性石墨接地网的接地电阻从 2.54Ω 升高到 29.78Ω ,

增加了 $27.24\ \Omega$; 而镀锌钢接地网的接地电阻从 $2.85\ \Omega$ 升高到 $33.73\ \Omega$, 增加了 $30.88\ \Omega$ 。柔性石墨接地网的降阻效率从 40.16% 升高到 40.57% , 仅增加了 0.41 个百分点; 而镀锌钢接地网的降阻效率从 32.88% 降低到 32.68% , 仅降低了 0.2 个百分点。由上述降阻效率的变化情况可得, 随着土壤电阻率的变化, 不同材料接地网的降阻效率变化非常小, 可认为不同材料接地网的降阻效率整体基本不发生显著变化。此外, 在相同土壤电阻率的情况下, 相较于镀锌钢作为接地材料, 采用柔性石墨时的接地电阻较小, 而且降阻效率高于镀锌钢接地网。

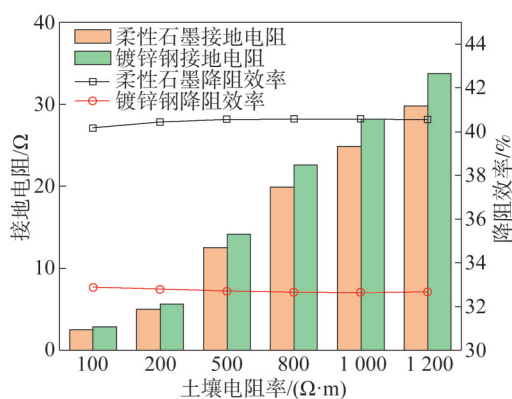


图2 土壤电阻率对接地网接地特性的影响

Fig.2 The influence of soil resistivity on the grounding resistance reduction characteristics of grounding grid

出现以上变化趋势的原因为: 相对于镀锌钢, 柔性石墨的通流能力较强, 流入外延接地极进行接地散流的雷电流分量更多; 而随着土壤电阻率的增加, 接地网单位长度的散流能力受限, 柔性石墨接地网的接地散流外延接地极长度相对更长, 因此柔性石墨接地网的接地电阻相对更低, 降阻效率相对更高。为进一步验证出现上述变化的原因, 经仿真得土壤电阻率对不同材料接地网外延接地极分流系数的影响, 如图3所示。

由图3仿真结果可得, 当外延接地极长度都为 10 m 的情况下, 随着土壤电阻率的升高, 不同材料接地网的分流系数随之升高, 其中柔性石墨接地网的分流系数变化相对较大, 镀锌钢接地网的分流系数变化相对较小。当土壤电阻率自 $100\ \Omega\cdot m$ 增加到 $1\ 200\ \Omega\cdot m$ 时, 柔性石墨接地网的分流系数从

59.72% 上升到 60.19% , 镀锌钢接地网的分流系数从 57.47% 上升到 57.53% , 整体来看, 不同材料接地网的分流系数上升幅度较小, 整体呈现不发生显著变化的趋势。而在相同情况下, 对比不同材料接地网的分流系数, 镀锌钢接地网始终低于柔性石墨。在不同土壤电阻率的情况下, 柔性石墨接地网外延接地极的分流能力强于镀锌钢接地网。

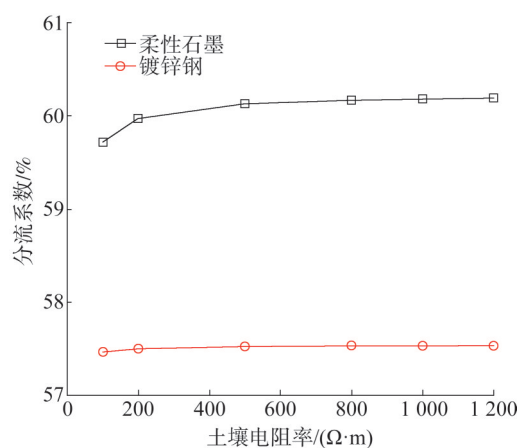


图3 土壤电阻率对不同材料接地网分流系数的影响

Fig.3 The influence of soil resistivity on the shunt coefficient of grounding grids with different materials

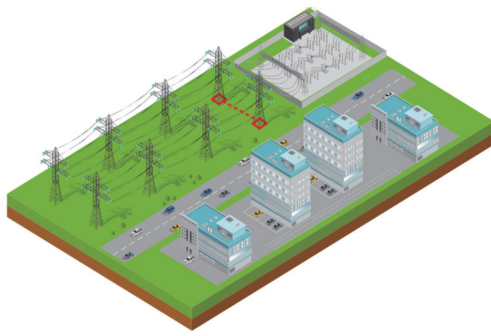
由此, 可以认为采用柔性石墨替代镀锌钢作为接地网材料的方案是可行的, 能够解决镀锌钢接地网面临的腐蚀问题, 同时能够略微降低接地网的接地电阻。

2 近站杆塔级联接地降阻策略研究

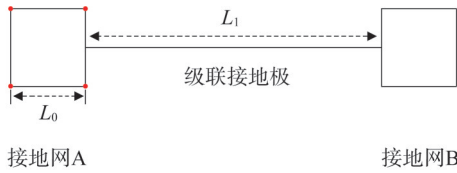
为减少土地资源的无效利用, 充分利用土地资源来扩大近站终端塔接地网入地电流的散流区域, 进而降低近站终端塔的接地电阻, 基于非金属接地材料在临近变电站的输电线路终端塔中的应用, 提出一种近站终端塔级联接地的接地散流降阻策略, 如图4所示。

图4中, 将近站终端塔的接地网A与接地网B通过水平接地极相互连接。其中级联接地极的长度与接地方框间的距离 L_1 相等。

此外在外延接地网的基础上, 还可在外延射线接地极下方铺设平面复合降阻材料, 改进外延接地网示意图如图5所示。



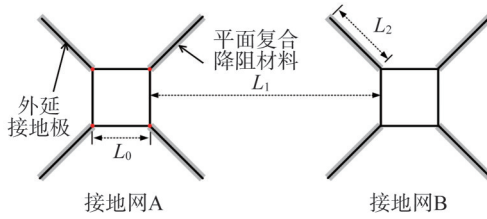
(a) 近站终端塔级联接地网



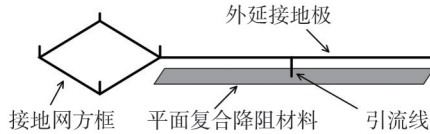
(b) 接地网级联俯视图

图4 近站终端塔级联接地示意图

Fig.4 The schematic diagram of tower-level connection of near-station terminal



(a) 改进外延接地网俯视图



(b) 改进外延接地结构

图5 近站终端塔改进外延接地网示意图

Fig.5 The schematic diagram of the improved epitaxial grounding grid of the near-station terminal tower

图5中,外延接地极铺设的柔性石墨面状电极宽为0.2 m,厚度为0.004 m,面状电极埋深1 m,与外延接地极相距0.2 m,通过引流线与外延接地极相互连接。

为更加明确对比级联接地网、方框外延型接地网与铺设柔性石墨面状电极的改进外延型接地网的接地降阻特性,评估近站杆塔级联接地的降阻效果。根据上述三种接地网的示意图,采用有限元软件搭

建三种近站终端塔接地网仿真模型进行对比分析。在级联接地系统中,为控制不同接地降阻形式的接地网外延接地极的总长度相同,建模时保持 $L_1=8L_2$ 。外延接地网与改进外延接地网的几何模型参数一致。

仿真模型中的方框接地网边长为10 m,接地材料选择具有良好防腐性能的柔性石墨材料,其半径取14 mm,埋设深度取0.8 m。采用有限元仿真软件分别搭建级联接地极为40 m的级联接地网、单根外延接地极为5 m的外延型接地网以及铺设平面复合降阻材料的改进外延型接地网仿真模型。

3 级联接地降阻特性对比

3.1 土壤电阻率的影响

对杆塔接地网施加幅值为100 kA、雷电流波前时间为 $2.6 \mu\text{s}$ 、波尾时间为 $50 \mu\text{s}$ 的雷电入地电流,得出不同土壤电阻率情况下不同降阻形式的接地网接地电阻及降阻效率如图6所示。

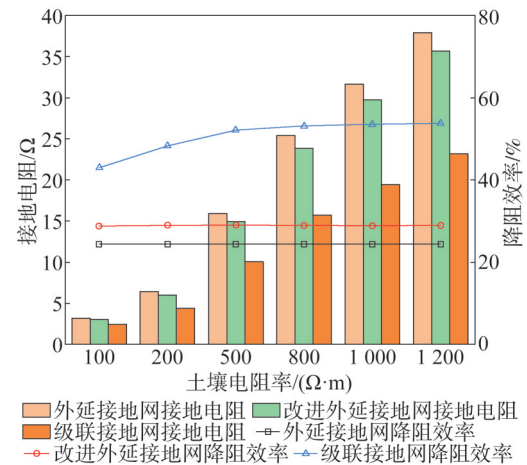


图6 土壤电阻率对接地电阻与降阻效率的影响

Fig.6 The influence of soil resistivity on grounding resistance and resistance reduction efficiency

由图6可得,随着土壤电阻率的升高,不同降阻措施的接地网接地电阻均随之增加。但是在相同土壤电阻率情况下,采用级联降阻措施的级联接地网的接地电阻均低于外延型接地网与改进外延型接地网。对于三种形式接地网的接地降阻效率,在不同土壤电阻率情况下,级联接地网的降阻效率均远高于外延型接地网与改进外延型接地网,即相对于典型接

地降阻形式,级联接地网的降阻效果较好。

由图6还可以看出,随着土壤电阻率的升高,外延接地网与改进外延接地网的降阻效率基本不发生变化,级联接地网的降阻效率先升高而后趋于平稳,当土壤电阻率由 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 增高到 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,降阻效率提高了1.7个百分点;而土壤电阻率由 $1\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$ 增高到 $1\ 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,其降阻效率仅提升0.04个百分点。这主要是因为随着土壤电阻率的升高,级联接地网的接地降阻效果达到上限,所以降阻效率趋于饱和。

为进一步分析土壤电阻率对不同外延长度接地网的影响,通过对外延总长度为80 m、140 m的不同形式接地网进行仿真分析可得,土壤电阻率对不同形式接地网接地电阻与降阻效率的影响规律分别如图7、图8所示。

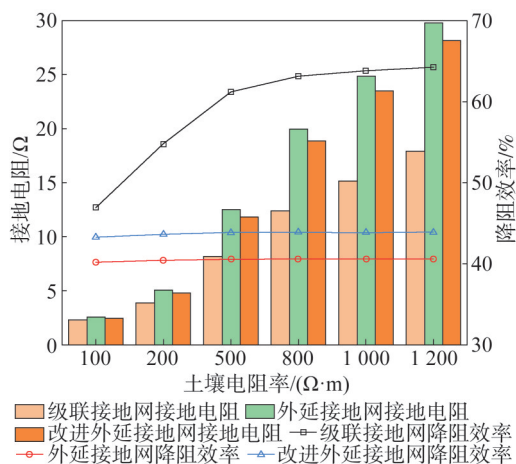


图7 土壤电阻率对外延总长80 m接地网的影响

Fig.7 The influence of soil resistivity on the extension of the total length of 80m grounding grid

由图7可得,在外延总长度为80 m时,随着土壤电阻率的增大,三种接地降阻形式的接地网接地电阻随之升高,并整体呈现正相关趋势且级联接地网的接地电阻始终低于外延接地网与改进外延接地网。并且当土壤电阻率自 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 增长到 $1\ 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,级联接地网与外延接地网的接地电阻差距越来越大,最大相差 $4.08\ \Omega$,最小相差 $0.12\ \Omega$ 。

由图7还可以看出,随着土壤电阻率的升高,外延接地网与改进外延接地网的降阻效率基本不发生变化,级联接地网的降阻效率先升高而后趋于平稳

且变化较大,说明级联接地受土壤电阻率的影响较大。其中外延接地的降阻效率最高为 61.02% ,改进外延接地网的降阻效率最高为 62.21% ,级联接地的降阻效率最高为 69.14% 。

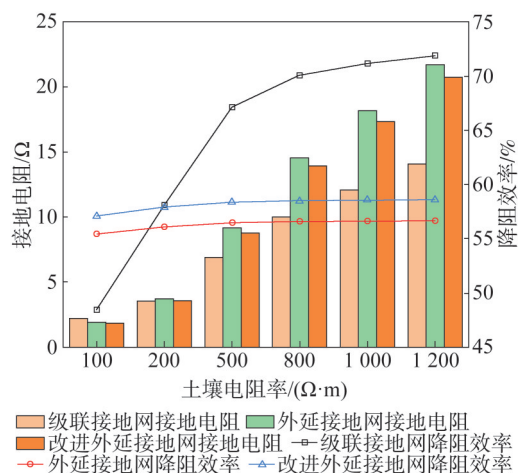


图8 土壤电阻率对外延总长140 m接地网的影响

Fig.8 The influence of soil resistivity on the extension of the total length of 140m grounding grid

由图8可得,在外延总长度为140 m时,随着土壤电阻率的增大,三种接地降阻形式的接地网接地电阻随之升高,并整体呈现正相关趋势,但级联接地网的接地电阻在低土壤电阻率的情况下,高于外延接地网与改进外延接地网,而后随着土壤电阻率的升高,接地电阻随之升高但低于外延接地网与改进外延接地网。当土壤电阻率自 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 增长到 $1\ 200\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,级联接地网的接地电阻自高于外延形式接地网 $0.17\ \Omega$ 降低到低于外延形式接地网 $1.9\ \Omega$ 。

由图8还可以看出,随着土壤电阻率的升高,外延接地网与改进外延接地网的降阻效率随之略微升高,但整体基本保持不变,级联接地网的降阻效率先升高而后趋于平稳,其中外延接地的降阻效率最高为 70.61% ,改进外延接地网的降阻效率最高为 72.61% ,级联接地的降阻效率最高为 74.39% 。可见,对于级联接地网来说,尽管其降阻效率在低土壤电阻率时低于外延接地网,但随着土壤电阻率的升高,级联接地的降阻效率相对外延接地与改进外延接地网的升高幅度更大,当土壤电阻率达到 $500\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,级联接地网的降阻效率

已高于外延接地与改进外延接地网。出现这种规律的原因主要在于当土壤电阻率较低时,单位长度的水平接地极接地散流能力未受到限制,接地极的通流能力限制了其接地散流能力,而外延接地网由于其外延接地极长度较短,致使其通流能力受限较小,可有效向外延接地极远端进行分流,故能有效进行接地降阻;而级联接地网由于级联接地极的长度较长,导致其通流能力所受影响较大,无法相对有效地向级联接地极远端通流,故级联接地极的分流相对较少,接地网的散流受限,由此导致外延接地网与改进外延接地网的接地电阻低于级联接地网;但是随着土壤电阻率的升高,单位长度的水平接地极的散流受限,迫使入地电流向接地网远端通流,而级联接地网存在级联接地方框可更加有效地进行接地,所以级联接地网的降阻效率逐渐升高,而后逐渐远高于外延接地网与改进外延接地网。

3.2 接地极长度的影响

固定土壤电阻率为 $500 \Omega \cdot \text{m}$, 改变外延接地极总长度。经仿真计算可得, 随着外延接地极总长度的增加, 不同接地降阻形式接地网的接地电阻与降阻效率变化情况如图 9 所示。

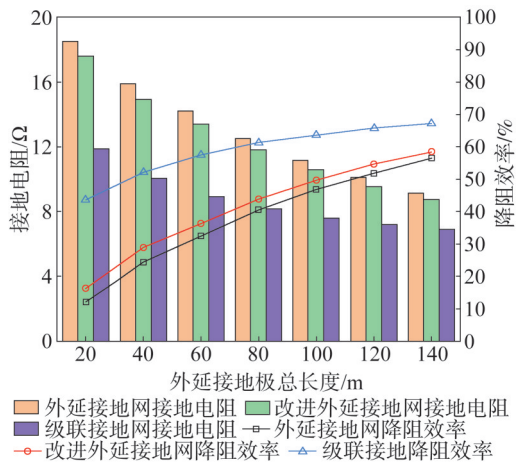


图9 外延接地极总长度对不同形式接地网的影响

Fig.9 The influence of the total length of the epitaxial grounding electrode on different forms of grounding grids

由图 9 可得, 随着外延接地极总长度的逐渐增加, 不同接地形式接地网的接地电阻均逐渐减小, 降阻效率逐步提高。在相同外延接地极总长度下, 级

联接地网的接地电阻相比外延接地网与改进外延接地网更小, 降阻效率始终高于外延接地网与改进外延接地网。接地极总长度为 20 m 时, 级联接地网的降阻效率达 42.41%, 高于相同总长度的外延接地网与改进外延接地网。其主要原因在于随着外延接地极长度的增加, 接地网的散流面积逐渐增大, 其接地散流能力逐渐增加, 因此接地电阻逐渐降低; 而当外延接地极长度相同时, 由于级联接地网通过级联接地极与其他接地方框连接, 致使其拥有相对更大的接地散流面积, 由此导致级联接地网的接地电阻相对更低, 而降阻效率相对更高。

从图 9 中还可以看出, 当级联接地极长度由 20 m 增加到 40 m 时, 级联接地网降阻效率由 43.64% 升高到 52.14%, 升高了 8.50 个百分点; 而由 120 m 增加到 140 m 时, 其接地降阻效率由 65.76% 升高到 67.14%, 仅升高了 1.38 个百分点。由此可得随着级联接地极长度的增加, 级联接地网的降阻效率整体呈现先显著升高、后逐渐趋于平稳的变化趋势。这主要是因为接地极的通流长度存在一定限制, 当级联接地极的长度达到一定程度时, 其通流能力接近上限, 由于单位长度的接地散流能力有限, 因此进一步增加级联接地极的长度不能显著提升接地网的降阻效率。

4 级联接地散流特性对比

4.1 土壤电阻率的影响

为研究土壤电阻率对不同降阻形式接地网的散流特性的影响, 保持其余条件不变, 得出不同土壤电阻率情况下, 不同降阻形式接地网接地极的分流系数如图 10 所示。

由图 10 可得, 随着土壤电阻率的升高, 不同降阻措施的接地网分流系数均随之增加。但是在相同土壤电阻率情况下, 采用级联降阻措施的级联接地网的分流系数高于外延接地网, 略低于改进外延接地网。随着土壤电阻率自 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 升高到 $1200 \Omega \cdot \text{m}$, 级联接地与外延接地网的分流系数相差变大, 由 3.74% 增高到 6.38%; 与改进外延接地网的分流系数相差变小, 由 3.101% 降低到 0.414%。对于三种形式接地网的接地散流特性, 在不同土壤电阻率情况下, 级联接地形式的散流特性均远高于外延接地形式。

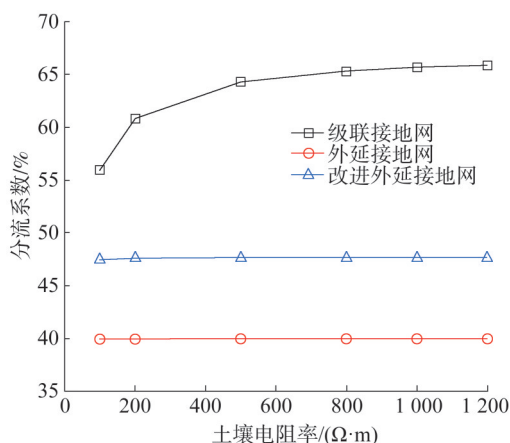


图10 土壤电阻率对接地极分流系数的影响

Fig.10 The influence of soil resistivity on the shunt coefficient of grounding electrode

由图10还可以看出,随着土壤电阻率的升高,外延接地网与改进外延接地网的分流系数基本不发生变化,级联降阻形式接地网的分流系数先升高而后趋于平稳,其中外延接地的分流系数最高为59.73%,改进外延接地网的分流系数最高为66.52%,级联接地的分流系数最高为66.11%。当土壤电阻率由 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 增高到 $200\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,分流系数提高了1.64个百分点;而土壤电阻率由 $1000\ \Omega\cdot\text{m}$ 增高到 $1200\ \Omega\cdot\text{m}$ 时,其分流系数仅提升0.06个百分点。这主要是因为随着土壤电阻率的升高,级联接地网方框向土壤中的散流能力达到上限,入地电流主要通过外延接地极进行散流,所以分流系数趋于饱和。

4.2 接地极长度的影响

为研究外延接地极总长度对不同降阻形式接地网的散流特性的影响,改变外延接地极总长度,经仿真计算得到随外延接地极总长度变化,不同降阻形式接地网外延接地极的分流系数变化情况如图11所示。

由图11可得,在相同降阻方式的接地网中,外延接地极总长度逐渐增加,导致接地极的分流系数也随之上升。其中接地极总长度为20 m时,级联接地网的分流系数达54.41%,远高于相同总长度的外延接地网与改进外延接地网。接地极总长度为140 m时,级联接地网的分流系数达74.96%,略低于相同总长度的改进外延接地网,与外延接地网基本

持平。以上结果表明,当接地极长度较短时,级联接地网的分流系数高于外延接地网与改进外延接地网,而随着接地极长度的延长,级联接地的分流系数变化相对较小,而外延接地与改进外延接地的分流系数变化较大,由此可得当接地极长度达到一定程度时,外延接地网与改进外延接地网的分流系数将高于级联接地网。

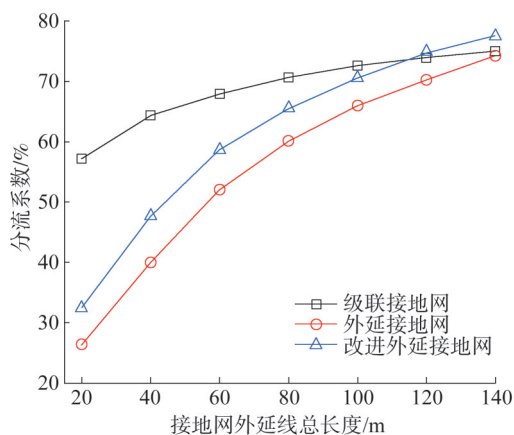


图11 外延接地极长度对接地极分流系数的影响

Fig.11 The influence of the length of the epitaxial grounding electrode on the shunt coefficient of the grounding electrode

从图11中还可以看出,随着级联接地极长度的延长,接地网的分流系数整体均呈现逐渐提高而后趋于饱和的变化趋势。其中级联接地网的分流系数趋于饱和的趋势更加显著,而外延接地网与改进外延接地网趋于饱和的趋势相对更小。这主要是因为随着接地极总长度的增加,级联接地极的通流能力逐渐接近上限,通流能力受限致使通流至接地极末端的电流逐渐减少,而由于外延接地形式的单根接地极仅为级联接地极的八分之一,所以外延接地极的通流能力所限制相对较小,依旧可以相对有效地通流至接地极末端进行接地散流,因此当接地极总长度达到140 m时,外延接地的分流系数接近级联接地网,改进外延接地极的分流系数高于级联接地网,由此推断按照此变化趋势进一步增加接地极长度,级联接地极的分流系数会低于外延接地网。

5 非金属级联接地降阻应用实例

针对山东省鲁中地区某变电站近站终端塔采取

级联接地进行接地降阻改造。为对比级联接地改造前后输电杆塔接地网的接地电阻变化情况,分析级联接地网的接地降阻效果,采用接地摇表分别测量试点应用工程输电杆塔接地网改造前及经级联接地改造后四角接地引下线的接地电阻,如表2所示。

表2 改造前后输电杆塔的接地电阻
Table 2 Grounding resistance of transmission tower before and after transformation 单位:Ω

输电杆塔	接地电阻	
	改造前	改造后
杆塔 T ₁	47.18	10.4
杆塔 T ₂	52.45	8.48
杆塔 T ₃	36.63	9.47

由表2可得,经过级联接地改造后,输电杆塔 T₁、T₂ 和 T₃ 的接地电阻相对改造前均发生大幅度下降。外延接地网占地面积 S₁ 与级联接地网占地面积 S₂ 计算公式为:

$$S_1 = (L_0 + \sqrt{2} L_2)^2 \times 2 \quad (3)$$

$$S_2 = L_0 \times (2L_0 + L_1) \quad (4)$$

其中三根输电杆塔接地网的接地方框长度均为 10 m,输电杆塔 T₁ 与 T₂ 间的最短距离约为 90 m,输电杆塔 T₁ 与 T₃ 间的最短距离约为 75 m,级联接地网占地面积分别为 1 100 m² 及 950 m²。当外延接地网长度分别为 10 m、15 m 及 20 m 时,外延接地网占地面积分别为 1 165 m²、1 948 m²、2 931 m²。由此工程项目可见,级联接地降阻策略能够在实际中应用,并且可以在降低接地网有限施工面积的同时显著降低接地网的接地电阻。

6 结论

针对邻近变电站终端塔在有限接地面积下的降阻问题进行仿真分析,提出了针对邻近变电站终端塔的级联接地降阻措施,得出了以下结论:

1)在典型接地降阻接地网的情况下,相较于镀锌钢接地网,采用柔性石墨材料的降阻效率较好,在相同土壤电阻率的情况下,柔性石墨接地网比镀锌钢接地网的降阻效率高 7.89 个百分点,外延接地极的分流系数高 2.66 个百分点,可见柔性石墨材料可

以有效地替代镀锌钢材料搭建接地网。

2)对于近站终端塔有限面积下的级联接地降阻策略,在土壤电阻率与外延接地极总长度一定时,级联接地网的降阻效率可达 69.14%,级联接地极的分流系数可达 65.85%,降阻效率与分流能力均高于外延接地网与改进外延接地网。并且随着土壤电阻率的增加,级联接地网的降阻效率与分流系数也随之逐渐升高,接地极长度的增加也会使级联接地网的降阻效率与分流系数逐渐升高。

3)山东省鲁中地区某变电站近站终端塔采取级联接地降阻改造。对其改造前后的接地电阻进行对比分析,验证了级联接地可以在降低接地网有限施工面积的同时显著降低接地网的接地电阻。

参考文献

- [1] 安韵竹,田海鹏,姜映辉,等.变电站接地网引下线氧浓差腐蚀仿真计算研究[J].山东电力技术,2023,50(9):1-9.
AN Yunzhu, TIAN Haipeng, JIANG Yinghui, et al. Simulation calculation of oxygen concentration difference corrosion of grounding grid lead-down line in substation[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(9): 1-9.
- [2] 王虹丽,胡元潮,李勋,等.变电站接地网材料选型与接地参数计算[J].水电能源科学,2017,35(12):178-182.
WANG Hongli, HU Yuanchao, LI Xun, et al. Study on selection of grounding network material and contrastive calculation of grounding parameters [J]. Water Resources and Power, 2017, 35 (12): 178-182.
- [3] 李伟,王伟,孙永春,等.应用CDEGS进行变电站接地网设计流程的研究[J].电瓷避雷器,2022(5):113-118.
LI Wei, WANG Wei, SUN Yongchun, et al. Application of CDEGS in substation grounding grid design process [J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5): 113-118.
- [4] 李柯.结合磁场延拓的变电站接地网腐蚀状态研究[J].电瓷避雷器,2021(5):93-99.
LI Ke. Corrosion state of substation grounding grid combined with magnetic field extension [J]. Insulators and Surge Arresters, 2021 (5): 93-99.
- [5] 周利军,何智杰,陈颖,等.接地导体腐蚀对地网接地电阻的影响和改善方法[J].铁道学报,2018,40(2):39-44.
ZHOU Lijun, HE Zhijie, CHEN Ying, et al. Impact of grounding conductor corrosion on grounding resistance of grounding mesh and improvement method [J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(2): 39-44.
- [6] 孟晓明,王利民,陈思敏,等.电力工程接地材料研究现状及展望[J].化工新型材料,2016,44(9):10-12.

- MENG Xiaoming, WANG Limin, CHEN Simin, et al. Research status and prospect of grounding material in power engineering[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(9):10-12.
- [7] 旦乙画, 张芮漩. 电力系统接地装置腐蚀特性及其诊断技术[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(11):26-41.
- DAN Yihua, ZHANG Ruixuan. Corrosion characteristics and diagnosis technologies of grounding devices in power systems[J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(11):26-41.
- [8] 李腾. 考虑地形特征的杆塔辅助接地网接地特性研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021.
- [9] 张昌, 甘艳, 邹建明, 等. 高土壤电阻率地区柔性石墨复合接地材料与圆钢接地材料的有效长度对比研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(1):58-63.
- ZHANG Chang, GAN Yan, ZOU Jianming, et al. Comparative study on the effective length between flexible graphite composite grounding material and round steel grounding material in high soil resistivity[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(1):58-63.
- [10] 杨帅, 李超英, 谭波, 等. 方框带射线型接地体冲击特性影响因素[J]. 高电压技术, 2016, 42(5):1548-1555.
- YANG Shuai, LI Chaoying, TAN Bo, et al. Influence factor of impulse characteristics of box and ray grounding device[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5):1548-1555.
- [11] 潘文霞, 柴守江, 周建文. 引外接地网参数优选研究[J]. 电网技术, 2016, 40(6):1916-1920.
- PAN Wenxia, CHAI Shoujiang, ZHOU Jianwen. Research of optimal parameters of the external grounding grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(6):1916-1920.
- [12] 鲁志伟, 常树生, 东方, 等. 引外接地对降低接地网接地阻抗的作用分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(6):119-121.
- LU Zhiwei, CHANG Shusheng, DONG Fang, et al. Grounding impedance analysis of grounding grids connected with buried conductors[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6):119-121.
- [13] EL MGHAIIRBI A, AHMEDA M, HARID N, et al. Technique to increase the effective length of practical earth electrodes: simulation and field test results [J]. Electric Power Systems Research, 2013, 94:99-105.
- [14] 杨超. 输电线路杆塔接地网降阻剂接地特性及优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [15] 陈俊杰. 防雷接地中降阻剂的使用对土壤污染的影响研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(7):138-141.
- CHEN Junjie. Study on impact of using drag reducing agents on lightning protection and grounding on soil pollution [J]. Environmental Science and Management, 2020, 45(7):138-141.
- [16] 胡毅, 王力农, 郑传广. 送电线路接地装置采用降阻剂的防腐问题分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(7):17.
- HU Yi, WANG Linong, ZHENG Chuanguang. Analysis of corrosion-proof problem in grounding equipment of transmission line using resistance-reducing agent [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7):17.
- [17] 李景丽, 蒋建东, 李丽丽. 针刺式接地装置降阻机制的仿真和试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1):211-217.
- LI Jingli, JIANG Jiandong, LI Lili. Simulation and experiment study on resistance-reducing mechanism of grounding device with spicules[J]. Power System Technology, 2013, 37(1):211-217.
- [18] 李景丽, 时永凯, 朱子卓, 等. 考虑土壤火花击穿特性的针刺式接地装置降阻研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(1):11-20.
- LI Jingli, SHI Yongkai, ZHU Zizhuo, et al. Resistance reduction of needle-punched grounding device considering soil spark breakdown characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1):11-20.
- [19] 刘宽. 输电线路杆塔冲击接地阻抗降阻策略研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- [20] 刘志祥. 考虑微地形特征的输电线路杆塔接地降阻技术研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023.
- 收稿日期: 2024-03-21
修回日期: 2024-05-19
作者简介:
毛惠卿(1973), 女, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运行与维护、电力系统防灾减灾等;
高 涛(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运行与维护、电力系统防灾减灾等;
张建伟(1999), 男, 硕士在读, 主要研究方向为输变电设备运行与维护、电力系统防灾减灾等;
张 凯(1983), 男, 硕士, 主要研究方向为输变电设备运行与维护、电力系统防灾减灾等;
穆明亮(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为输变电设备运行与维护、电力系统防灾减灾等;
田海鹏(1999), 通信作者(tianhaipeng1999@163.com), 男, 硕士在读, 主要研究方向为输变电设备运行与维护、电力系统防灾减灾等。
- (责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.009

非晶合金变压器出口短路状态下绕组温度分布特性研究

刘兴华¹, 李 飞¹, 赵彦龙¹, 咸日常^{2*}, 陈 磊²

(1. 国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 负荷侧发生出口短路故障会导致变压器绕组温度迅速升高, 轻则引起绕组绝缘老化, 降低设备耐用性, 重则会使绝缘失效, 配电变压器毁坏。电力变压器采用的特殊绕组结构决定了绕组的热点温度及其位置在实际试验中难以获取, 尤其是非晶合金变压器绕组采用矩形结构, 出口短路故障造成的设备烧毁风险更大。以一台SBH15型非晶合金变压器为例, 采用COMSOL仿真建模对其发生出口短路故障后绕组的温度分布特性进行研究, 揭示温度沿绕组的分布规律及热点温度值。研究表明: 非晶合金变压器矩形绕组沿长轴的温度高于短轴, 处于低压状态下的绕组温度比处于高压状态下的绕组温度更高, 热点温度出现在低压绕组长轴转角处; 最后, 为提高其耐热能力提出了具体改进措施。

关键词: 非晶合金; 变压器; 矩形绕组; 出口短路; 热点温度

中图分类号: TM401

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)01-0081-08

Research on Temperature Distribution of Outlet Short-circuit Hot Spots in Amorphous Alloy Transformer Winding

LIU Xinghua¹, LI Fei¹, ZHAO Yanlong¹, XIAN Richang^{2*}, CHEN Lei²

(1. State Grid Zibo Power Supply Company, Zibo 255000, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: The occurrence of an outlet short circuit fault on the load side can cause a rapid increase in the temperature of the transformer winding. Mild cases can cause insulation aging of the winding, reduce equipment durability, further can lead to insulation failure and damage to the distribution transformer. The special winding structure used in power transformers determines that the hot spot temperature and position of the winding are difficult to obtain in practical tests, especially when the winding of amorphous alloy transformers adopts a rectangular structure, the risk of equipment burnout caused by outlet short circuit faults is greater. This article takes an SBH15 amorphous alloy transformer as an example and uses COMSOL simulation modeling to study the temperature distribution characteristics of the winding after the outlet short circuit fault, revealing the distribution law of temperature along the winding and the hot spot temperature value. Research has shown that the rectangular winding of amorphous alloy transformers has a higher temperature along the long axis than the short axis. The winding temperature in the low voltage state is higher than that in the high voltage state, and the maximum temperature is reached at the junction of the long axis in the low voltage state of the winding. Finally, specific suggestions were proposed to improve its heat resistance.

Keywords: amorphous alloy; transformer; rectangular winding; short-circuit; hot spot temperature

0 引言

在电能分配和电压等级变换的过程中, 配电变压器发挥关键作用, 其运行的稳定性、安全性和经济

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目“电力变压器出口短路条件下绕组热点温度及其绝缘寿命研究”(520603230005)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Research on Hotspot Temperature and Insulation Life of Winding of Power Transformer Under Its Exit Short Circuit Condition” (520603230005)。

性极大影响配电网的运行状态^[1-3]。而在配电变压器运行故障中, 由负荷侧低压出口发生短路所引起的故障较为普遍^[4]。在突然短路时, 由于通过绕组的短路电流剧增, 功率损耗呈指数规律增加, 损耗的电功率几乎全部转换为热能, 常伴有变压器本体及变压器绕组温度的迅速上升。变压器的圆形绕组特点是按轴对称排布, 发生短路时, 绕组的温度会不可避免升高, 但是轴对称结构让热量平均分布, 所以发

热时的稳定性较好^[5-7]。而非晶合金变压器绕组以非完全轴对称的矩形形状排布,一旦在出口发生短路故障,绕组快速发热,并且受结构特殊性影响会存在受热不均问题,在某些部位的温度会更高,严重时会造成绕组绝缘失效而引起变压器烧毁^[8]。所以,对负载侧出口处于短路状态下的非晶合金变压器绕组发热问题进行研究,进而采取针对性工艺和技术措施,有着重大的工程意义。

研究人员开展了一系列有关电力变压器绕组温度分布特性的研究。刘国坚等^[9]、廖才波等^[10]对变压器绕组温度沿轴向高度分布特性进行了有限元分析;毛晓燕等^[11]研究了温度对变压器铜导线机械性能的影响;王伟等^[12]通过改变风机数量研究了冷却器对绕组热点温度的影响;王磊等^[13]把负载率作为控制变量,探求负载变化和绕组温度上升之间的关联。随着研究的深入,温度结合电磁、机械等物理场的多物理场仿真获得了广泛的关注。Jia等^[14]对油浸式变压器的电磁-流体-热-机械应力耦合过程进行了有限元分析数值研究,得出了绕组温度与机械特性的相互影响关系。Yu等^[15]建立了换流变压器绕组的电磁-热流双向耦合数学模型,从而计算了绕组的实际损耗和温度。在以上研究的基础上,多种温度特性改善的方法被提出,例如结合变压器运行特性或智能模型等建立变压器绕组热点温度预测方法^[16-17]。需要注意的是,目前对变压器绕组温升及热点分布的研究多以额定运行状态的圆形对称绕组为主,而对于其负荷侧出口短路故障状态下,尤其是非晶合金变压器矩形绕组的温度分布特性认识不足,这也造成对其进行热点温度预测变得困难。

以一台实际的SBH15型非晶合金变压器为例,利用COMSOL对其进行有限元仿真,研究其负荷侧低压出口短路故障下矩形绕组温度的分布特性,揭示温度沿矩形绕组的分布规律及热点温度值,并且提出具体改进措施以提高非晶合金变压器在出口短路状态下的绕组绝缘耐热能力。

1 绕组热源分析与温度计算

1.1 出口短路故障危害

配电变压器负荷侧发生低压出口短路故障时,高、低压绕组均流过高出负载电流十几倍的短路电流,该短路电流与绕组电阻同时作用,会在短期内发

热过多,导致绕组甚至整个变压器的温度比正常运行状态下高出一大截,若变压器矩形绕组的最热温度超出绝缘部件的受热限度,影响小的话会加快绝缘部件老化速度,从而引起使用寿命的减短,严重时会造成其绝缘失效,造成配电变压器烧坏。

突发短路故障时,两个不同角度下变压器引出线烧毁情况如图1所示。直观来看,绝缘已遭到严重破坏。通过检查发现,由于变压器铁芯和绕组等部件发热温度分布不均,引起严重的局部过热现象,热点温度的位置靠近端部引出线,从而导致引出线绝缘烧毁,造成变压器运行停电事故^[8]。

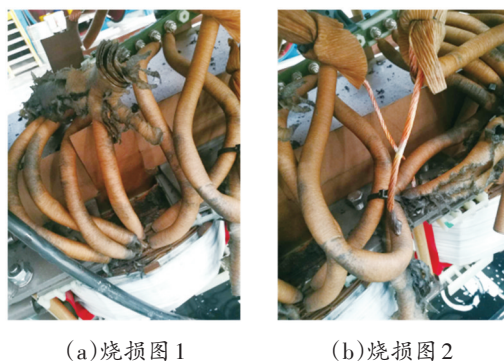


图1 配电变压器绕组短路故障后引出线绝缘烧损

Fig.1 Insulation burn loss diagram after short circuit fault

1.2 绕组热源分析

配电变压器绕组在空载和负载运行时产生的损耗主要以热能形式存在,使变压器温度和变压器内环境温度上升^[18-19]。

变压器绕组的总损耗功率(包括空载损耗功率和有负载损耗功率)为

$$P_T = P_0 + P_k \quad (1)$$

式中: P_T 为总损耗功率,W; P_0 为空载损耗功率,W; P_k 为负载损耗功率,W。

绕组铁心内的涡流损耗和磁滞损耗共同构成空载损耗;存在于绕组匝间的涡流损耗与电阻损耗,以及变压器油箱和附加组件等地方的杂散损耗共同构成变压器的负载损耗^[20]。

空载损耗功率可以表示为

$$P_0 = P_h + P_e = \delta_h f B_m^2 + \delta_e f^2 B_m^2 \quad (2)$$

式中: P_h 为绕组铁心磁滞损耗功率,W; P_e 为绕组铁心涡流损耗功率,W; δ_h 为磁滞损耗系数; δ_e 为涡流损

耗系数; f 为电源频率,Hz; B_m 为最大铁心磁通密度,Wb/m²[8]。

负载损耗功率可以表示为

$$P_k = I^2 R + P_w + P_z \quad (3)$$

式中: I 为流过矩形绕组的电流; R 为矩形绕组的电阻; $I^2 R$ 为矩形绕组中电阻的损耗功率; P_w 为矩形绕组中的涡流损耗功率; P_z 为剩余的杂散损耗功率。

由式(3)可得,当变压器出现出口短路故障时,流过绕组的短路电流增加了十几倍,负载损耗相应增加数百倍。由于损耗的电能几乎全部会以热能的形式存在,因此配电变压器在出口短路故障时,变压器的快速升温主要由负载损耗功率的急剧增加所造成的。

1.3 绕组温度计算

均匀物体发热、冷却方程式为^[21]

$$Pdt = CGd\tau + KF\tau dt \quad (4)$$

式中: P 为用于产生热量的总损耗功率,W; t 为时间,s; C 为比热容,J/(kg·K); G 为质量,kg; K 为散热系数,W/(m²·℃); F 为散热面积,m²; τ 为超过周围介质的温升,K; Pdt 为被测量物在 dt 时间中产生热量所用的功率损耗值,W; $CGd\tau$ 为被测量物的温度升高 $d\tau$ 需要吸收的热功率值; $KF\tau dt$ 为在 dt 时间内周围介质从被测量物中吸收的热功率值。

变压器常规运行时,如果低压出口侧突然发生短路故障,变压器内迅速升高的热量在极短期间内无法向周围介质挥发,近似于变压器油、铁心以及变压器绕组将负载和空载的功耗热量全部吸收,从而导致变压器温度的快速升高,对应的发热、冷却方程可简化为

$$Pdt = CGd\tau \quad (5)$$

当运行过程中的负荷不变时,损耗功率 P 是一个不变的定数,热量的吸收和散出处于平衡状态,该方程可化为:

$$Pt = CG\tau \quad (6)$$

$$P = I^2 R = (JS)^2 \rho \frac{l}{S} = J^2 S \rho l \quad (7)$$

$$G = S\gamma \times 10^{-3} \quad (8)$$

由式(6)一式(8)可得

$$\tau = \frac{J^2 \rho}{\gamma C} \times 10^3 t = \frac{\rho}{\gamma C} J^2 \times 10^3 t = a J^2 t \times 10^{-3} \quad (9)$$

式中: J 为短路时的导体电流密度,A/mm²; γ 为体积

质量密度,kg/m³; ρ 为电阻系数, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; a 为系数,表达式为

$$a = \frac{\rho}{\gamma C} \times 10^6 \quad (10)$$

则配电变压器低压出口短路故障时绕组的平均温度为

$$T = T_0 + \tau = T_0 + a J^2 t \times 10^{-3} \quad (11)$$

式中: T_0 为配电变压器低压出口短路故障前的运行温度,℃。

2 绕组温度仿真计算模型

2.1 模型参数及简化处理

以SBH15-M-400/10型号的油浸式非晶合金变压器为例,研究非晶合金变压器出口短路状态下绕组温度分布特性,该型号变压器基本的技术参数如表1所示,绕组铁心、绕组和变压器油的材料特性参数如表2所示。

表1 变压器基本技术参数

Table 1 Basic technical parameters of transformers

参数	高压绕组	低压绕组
容量/kVA	400	
额定频率/Hz	50	
联结组标号	Dyn11	
额定电流/A	13.33	577.35
额定电压/V	10 000	400
绕组匝数	693	16
绕组电阻/ Ω	3.928 40	0.001 71
内径尺寸/mm	403×262×195	304×206×195
外径尺寸/mm	522×322×195	401×259×195

表2 材料物理性能参数

Table 2 Physical property parameters of the material

参数	绕组	铁心	变压器油
密度/(kg/m ³)	400	10 000	1 053 - 0.584T
热导率/(W/(m·k))	51.9	400	0.151 - 7.1×10 ⁻⁵ T
比热容/(J/(kg·K))	446	385	807.163+3.58T
动力黏度/(kg/(m·s))	—	—	11.71e ^{-0.02T}

为更深层次地研究非晶合金变压器在低压、高

压出口短路故障时矩形绕组温度的暂态分布特点,利用 COMSOL 有限元仿真软件来完成相应的建模计算。在满足精度要求的条件下,为简化计算工作量,对模型进行了以下假设^[1]。

1)非晶合金变压器模型总体结构特点是以铁心为中心对称分布。

2)不考虑绕组线圈垫块、夹件、线圈之间的绝缘等扰动因素。

3)变压器低压出口短路故障的持续时间很短,油的导热系数较小,所以不考虑热对流、热辐射的影响。

4)变压器低压出口短路故障发生前后的外界环境温度保持不变。

2.2 模型建立

非晶合金变压器的铁心由非晶带材加工而成,其材质硬而脆,特点是不容易剪切,一般根据变压器容量需求制成矩形截面,其高、低压绕组因此采用矩形结构^[22-24]。

非晶合金变压器构造特殊,与三相对称的圆形绕组配电变压器不同,普通的二维轴对称模型无法准确体现温度分布特点,利用三维模型才能够更准确反映其绕组在低压/高压出口短路故障时的温度分布特点。本研究依据变压器实际规模构建三维仿真模型,为减小计算误差,且保证软件能准确模拟计算,采用分块处理法对仿真模型进行网格划分,在温度梯度较大的区域,网格剖分较精细,反之则相对粗糙,仿真模型网格剖分如图2所示。

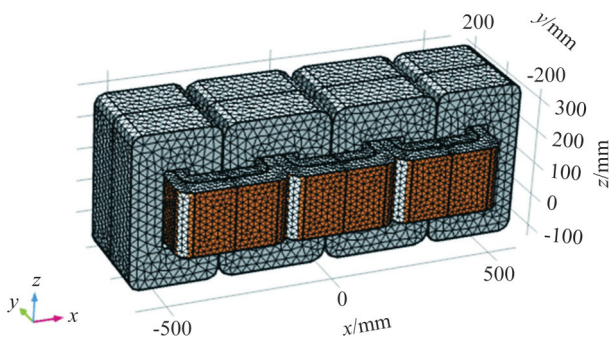


图2 三维仿真模型网格剖分图

Fig.2 3D simulation model mesh generation diagram

变压器绕组区域的传热过程主要为热传导和热对流,热传导方程为

$$\frac{\partial^2 T_h}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T_h}{\partial z^2} + \frac{q}{k_m} = 0 \quad (12)$$

式中: z 和 r 分别为模型的轴向和横向坐标,m; T_h 为热源温度,℃; k_m 为传热导体的热传导率,W/(m·K); q 为热源功率,W/m³。

在仿真过程中,绕组与油之间的热对流满足守恒定律,即

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{\partial(ur)}{\partial r} + \frac{1}{z} \frac{\partial(vr)}{\partial z} = 0 \\ \rho_o(u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z}) = F_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu_s(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \\ \rho_o(u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z}) = F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_s(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \\ u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k_o}{\rho_o c_p}(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}) \end{cases} \quad (13)$$

式中: u 和 v 分别为油的径向和轴向流动速度,m/s; F_r 和 F_z 分别为油的径向和轴向体积力,N; p 为流体压强,Pa; c_p 为油流比热容用,W/(kg·K); ρ_o 为油流密度,kg/m³; k_o 为油流热导率,W/(m·K); μ_s 为流体黏度。

在仿真过程中,边界条件设置如下:

1)添加“固体传热”作为物理场,根据表2中材料物理性能参数设定各个材料的特性参数;

2)将铜耗与铁耗产生的热量作为热源,因此“热源”选择“体积损耗密度,电磁”;

3)设置环境温度为20℃;

4)选择“全耦合求解法”进行求解器配置,添加频域-瞬态研究进行计算。

3 分析仿真计算结果

依据 GB 1094.5《电力变压器 第5部分:承受短路的能力》,只有通过2s的连续电流,才能有效测定变压器的绕组短路耐热性能。分析三维仿真结果,低压侧出口发生短路故障后的2s,非晶合金变压器矩形绕组的温度分布如图3所示。

由图3可知,低压出口短路故障2s时刻,非晶合金变压器整体的热点温度分布特点是长轴温度比短轴温度更高,而内部温度分布特点是低压侧绕组比高压侧绕组更高。整体绕组温度基本围绕152℃波动,依据式(11)算出非晶合金变压器绕组在低压出口发生短路故障2s时的理论温度均值是151℃,显然,用公式计算所得的绕组理论均值与经仿真模

拟所得理论均值基本相同,从而证明仿真模型的可行性和合理性。

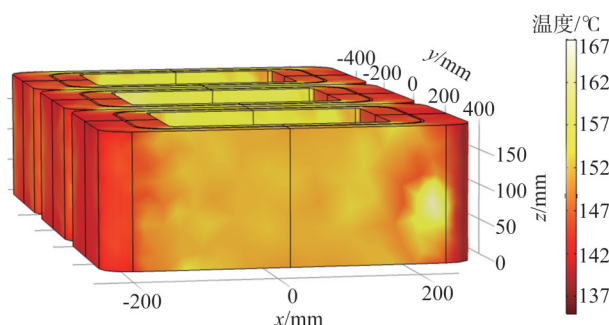


图3 矩形绕组整体温度分布图

Fig.3 Overall temperature distribution diagram of rectangular winding

先对非晶合金变压器高压侧发生出口短路故障的2 s时刻进行仿真分析,高压下矩形绕组的温度分布如图4所示。

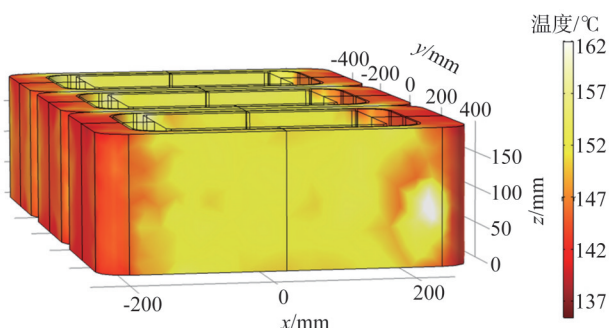


图4 矩形绕组在高压下温度分布图

Fig.4 Temperature distribution diagram of rectangular winding under high voltage

由图4可知,当非晶合金变压器处于高压条件时,其长轴端温度围绕152℃浮动,短轴端平均温度围绕147℃浮动,长轴和短轴交接的地方温度会更高。高压下矩形绕组温度随着轴向长度变化的分布特点如图5所示。

由图5可知,非晶合金变压器矩形绕组处于高压条件时,温度总体分布特点呈“钟形曲线”,即先升高后降低的趋势。绕组涡流损耗与绕组温度紧密关联,漏磁场的疏密又直接影响涡流损耗,漏磁线在靠近绕组中间位置时呈竖直线排布,产生纵向漏磁,辐

向漏磁基本为零,对应涡流损耗是纵向的;漏磁线在两边边缘部分方向改变,产生辐向漏磁,纵向漏磁基本为零,对应涡流损耗是水平方向的,非晶合金变压器绕组涡流损耗的分布特征决定了绕组高压条件下沿轴温度的分布特征。

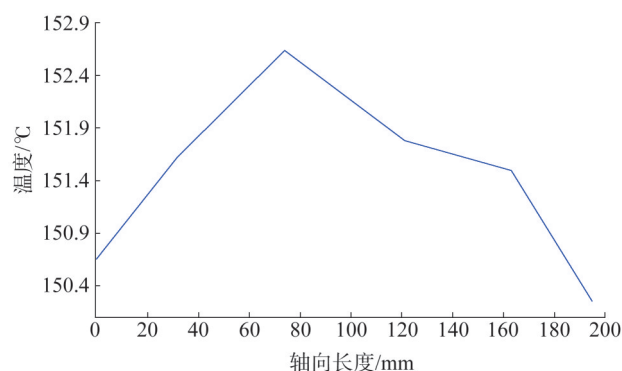


图5 矩形绕组在高压下温度沿轴向的变化趋势

Fig.5 The trend of temperature variation along the axial direction of rectangular winding under high voltage

仿真分析该变压器处于低压出口短路故障2 s时,低压状态下矩形绕组温度分布如图6所示。

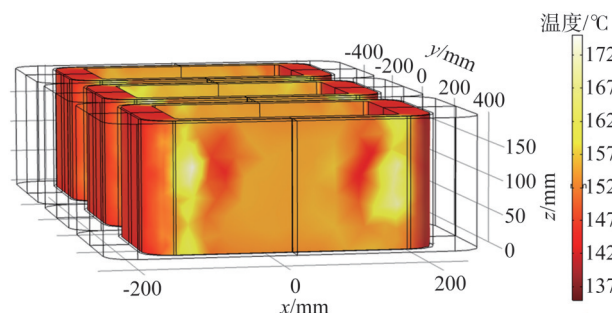


图6 矩形绕组在低压下整体温度分布图

Fig.6 Temperature distribution diagram of rectangular winding under low voltage

由图6可知,当非晶合金变压器绕组处于高压状态时的总体温度比处于低压状态时的总体温度略低,二者相比,低压状态下矩形绕组的长轴和短轴总体温度分别在154℃和152℃附近。发生出口短路故障后,低压状态下绕组会流过比高压状态下还大的短路电流,所以增加更多损耗,导致绕组温升更高。由于绕组长轴与短轴的交接处温度较高,再结合低压状态下比高压状态下温度更高,所以可推断,

在出口短路故障时低压状态下绕组长轴一端会出现热点温度。低压状态下矩形绕组温度沿轴向长度变化趋势如图7所示。

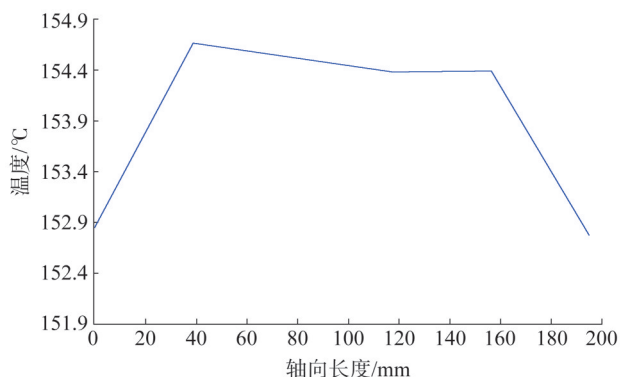


图7 矩形绕组在高压下温度沿轴向的变化趋势

Fig.7 The trend of temperature variation along the axial direction of rectangular winding under high voltage

由图7可知,低压绕组沿长轴端的温度同样是先升高后降低的分布特点,与高压绕组对比,二者区别是低压绕组温度更均匀,温度差距也更小。

进一步仿真分析低压出口出现短路故障2 s时,变压器矩形绕组温度沿长轴的变化趋势如图8所示。

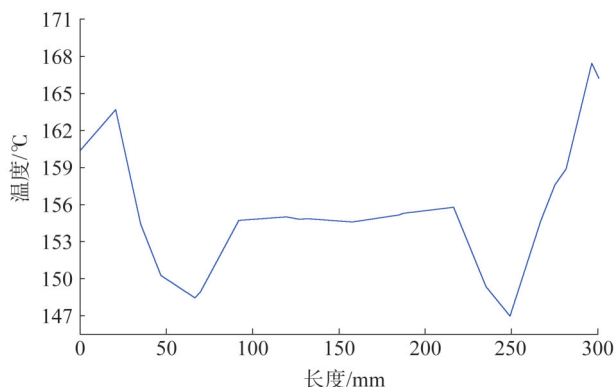


图8 矩形绕组在低压下温度沿长轴变化趋势

Fig.8 The temperature variation trend of rectangular winding along the long axis under compression

由图8可知,绕组低压状态下沿长轴的温度不是完全平均分布的,而是在长轴两端温度最高,往中间位置靠近时,温度开始下降,继续往中间靠近,温度再次上升并基本稳定,低压绕组热点温度最高可

达167℃,出现在长轴转角处^[8]。所以非晶合金变压器突发低压出口短路故障时,低压绕组长轴转角处的绕组绝缘及热稳定性更容易被破坏。

4 改进措施建议

通过以上仿真分析结果可以发现,由于非晶合金变压器绕组矩形结构的特殊性,在发生低压出口短路故障时绕组会存在受热不均和低压长轴热点温度太高的问题,可以通过以下方法来提升绕组耐热性进而缓解受热不均匀和温度太高的问题。

1)非晶合金变压器宜采取耐高温、绝缘性能良好的绝缘材料。

2)把绝缘且导热性好的材料提前放入绕组中,使热量能更好散发,进而提高绕组散热效率。

3)由于绕组长轴比短轴温度更高,从外部入手,在满足机械强度的条件下,把绕组线圈长轴转角处的垫块裁出通道,以达到线圈油道更顺滑的效果,从而使散热能力得到加强。

4)改善油道摆放方式,垂直放置上下铁轭油道,以倾斜角45°放置心柱与旁轭的油道,保证变压器油从里向外流。

5)如果在室内布置配电变压器,排除光照影响,考虑在变压器表面涂深色漆,加快变压器的散热速度,降低绕组在正常运行时的温度。

5 结论

以一台SBH15-M-400/10型非晶合金变压器为研究对象,对其低压出口短路故障后绕组温度分布特性进行了仿真分析,结果表明:

1)将温度理论计算值与模拟仿真值进行对比,发现理论计算和模拟仿真的结果高度相符,从而表明理论计算方法与仿真模型的准确性。

2)非晶合金变压器发生低压出口短路故障后,其绕组轴向中心的温度高于两端,表明涡流损耗对绕组温度分布有一定影响。

3)非晶合金变压器发生低压出口短路故障后,绕组沿长轴温度高于短轴温度,从绕组电压角度看,绕组处于高电压时的温度低于处于低电压时的温度,结合以上两点,热点温度出现在低压绕组长轴侧。

参考文献

- [1] 于少泽,咸日常,李海涛,等.SBH15型非晶合金变压器短路电动力分析及优化措施[J].科学技术与工程,2020,20(20):8187-8192.
YU Shaoze, XIAN Richang, LI Haitao, et al. Optimization of short-circuit electromotive force of SBH15 amorphous alloy transformer [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(20): 8187-8192.
- [2] 谭鑫,谢宝昌.风扇对中频变压器温升影响的三维仿真[J].科学技术与工程,2016,16(27):171-176.
TAN Xin, XIE Baoshang. 3-D temperature field simulation of medium-frequency transformer influenced by fans [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(27): 171-176.
- [3] 欧小波,周丹,林春耀,等.油浸式电力变压器老化及寿命评估研究综述[J].南方电网技术,2015,9(9):58-70.
OU Xiaobo, ZHOU Dan, LIN Chunyao, et al. Review of aging and life assessment of oil-immersed power transformer [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(9): 58-70.
- [4] 咸日常,董方旭,朱庆团,等.电力变压器低压绕组变形故障的累积效应分析[J].科学技术与工程,2018,18(31):30-35.
XIAN Richang, DONG Fangxu, ZHU Qingtuan, et al. Diagnosis of cumulative effect on deformation fault of power transformer lower-voltage winding [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(31): 30-35.
- [5] 刘传彝,侯世勇,许长华.电力变压器设计与计算(18)[J].变压器,2012,49(7):42-47.
LIU Chuanyi, HOU Shiyong, XU Changhua. Design and calculation of power transformer (18) [J]. Transformer, 2012, 49(7): 42-47.
- [6] 侯贵宏,黄青丹,陈于晴,等.计及高过载能力和植物绝缘油的配电变压器全寿命周期成本分析[J].南方电网技术,2018,12(7):60-69.
HOU Guihong, HUANG Qingdan, CHEN Yuqing, et al. Life cycle cost analysis of distribution transformer considering high overload capacity and vegetable insulating oil [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(7): 60-69.
- [7] 周利军,唐浩龙,王路伽,等.基于多面体网格剖分的油浸式变压器三维温度场及油流场仿真[J].高电压技术,2018,44(11):3524-3531.
ZHOU Lijun, TANG Haolong, WANG Lujia, et al. Simulation on three-dimensional temperature field and oil flow field of oil-immersed transformer based on polyhedral mesh [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3524-3531.
- [8] 于少泽.配电变压器抗短路能力分析及提升措施[D].淄博:山东理工大学,2021.
- [9] 刘国坚,王丰华.油浸式电力变压器温度场分布的计算分析[J].科学技术与工程,2015,15(32):36-41.
LIU Guojian, WANG Fenghua. Temperature field calculation and analysis of oil-immersed transformers [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(32): 36-41.
- [10] 廖才波,阮江军,逯怀东,等.油浸式变压器二维电磁-流体-温度场耦合分析方法研究[J].科学技术与工程,2014,14(36):67-71.
LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LU Huaidong, et al. 2-D coupled electromagnetic-fluid-thermal analysis of oil-immersed transformer [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(36): 67-71.
- [11] 毛晓燕,欧强,王静,等.变压器短路热效应与动稳定的综合分析[J].变压器,2019,56(7):29-32.
MAO Xiaoyan, OU Qiang, WANG Jing, et al. Comprehensive analysis of short-circuit thermal effect and dynamic stability of transformer [J]. Transformer, 2019, 56(7): 29-32.
- [12] 王伟,魏菊芳,王楠,等.冷却器运行对电力变压器绕组热点温度影响的仿真研究[J].高压电器,2019,55(3):84-90.
WANG Wei, WEI Jufang, WANG Nan, et al. Simulation research of the influence of cooler operation on the hot spot temperature of power transformer winding [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 84-90.
- [13] 王磊,王敏壕,王倩,等.非晶合金变压器多物理场仿真及能效分析[J].变压器,2018,55(9):32-38.
WANG Lei, WANG Minhao, WANG Qian, et al. Multi-physics field simulation and energy efficiency analysis of amorphous alloy transformer [J]. Transformer, 2018, 55(9): 32-38.
- [14] JIA X Y, LIN M, SU S W, et al. Numerical study on temperature rise and mechanical properties of winding in oil-immersed transformer [J]. Energy, 2022, 239: 121788.
- [15] YU X L, TAN Y B, WANG H T, et al. Thermal analysis and optimization on a transformer winding based on non-uniform loss distribution [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 226: 120296.
- [16] ROMMEL D P, DI MAIO D, TINGA T. Transformer hot spot temperature prediction based on basic operator information [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106340.
- [17] DOOLGINDACHBAPORN A, CALLENDER G, LEWIN P L, et al. Data driven transformer thermal model for condition monitoring [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 3133-3141.
- [18] 咸日常,袁建华,梁玉,等.电力变压器温升与冷却装置改造的技术经济分析[J].高压电器,2006,42(1):58-59.
XIAN Richang, YUAN Jianhua, LIANG Yu, et al. The economic and technical analysis of amelioration in power transformer temperature rising and cooling device [J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 58-59.
- [19] 刘刚,池骋,孙立鹏,等.油浸纸板分布对 ± 500 kV换流变压器饼式绕组温升的影响分析[J].科学技术与工程,2018,18(12):197-202.
LIU Gang, CHI Cheng, SUN Lipeng, et al. Influence analyses of the

- oil-immersed pressboard for disc-type winding temperature rise in ± 500 kV converter transformer [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(12): 197-202.
- [20] GUO J, FANG S H, ZHANG Y, et al. A novel method to check the axial tilt instability of the rectangular winding of the amorphous alloy transformer [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(1): 92-97.
- [21] 陶文栓. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社.
- [22] 曹燕朋. 干式非晶合金铁心配电变压器结构与装配[J]. 机电工程技术, 2011, 40(10): 115-118.
- CAO Yanpeng. Configuration and assemble of dry-type amorphous alloy core distribution transformers [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2011, 40(10): 115-118.
- [23] ISLAM M M, MUTTAQI K M, SUTANTO D. A saturated amorphous alloy core-based inrush current limiter to eliminate inrush currents and restrain harmonics during transformer energization [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(6): 6634-6645.
- [24] 王政, 赵恒伟, 刘乾承, 等. 基于多种试验综合诊断的变压器出口短路故障的实例分析[J]. 变压器, 2017, 54(11): 56-60.
- WANG Zheng, ZHAO Hengwei, LIU Qiancheng, et al. Case analysis of transformer outlet short circuit fault based on multiple test [J]. Transformer, 2017, 54(11): 56-60.
-
- 收稿日期: 2024-01-15
修回日期: 2024-04-30
- 作者简介:
- 刘兴华(1981), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力设备故障诊断;
- 李 飞(1988), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力设备故障诊断;
- 赵彦龙(1992), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护;
- 咸日常(1964), 通信作者(xianrc@163.com), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电力设备故障诊断;
- 陈 磊(1993), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力设备故障诊断。
- (责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.01.010

基于回归分析的人体工频电场畸变影响分析预测研究

巩泉泉^{1*}, 杨柳倩¹, 侯琛², 李玺², 张兆波¹

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要:为探究输电线路下人体周围工频电场分布规律,量化分析人体位于工频电场时对场强的畸变作用,文中以500 kV架空线路边导线工频电场为研究对象,通过便携式工频电场测量装置,检测在人体垂直和水平方向上不同部位和不同距离处的电场强度,得出输电线路下人体周围工频电场分布规律。结果表明,人体头部、肩部、上臂、腰部、臀部、膝部、脚部均对电场场强产生不同的畸变效果,且当距离人体大于100 cm时,人体对周围空气域内电场的畸变作用可以忽略不计。在此基础上,通过对人体水平方向和垂直方向上不同点位的电场场强检测结果进行回归分析,得出人体不同部位和距离电场中心不同位置对工频电场场强影响的修正方程,为提出工作人员防护措施奠定重要基础。

关键词:输电线路;工频电场;畸变作用;回归分析

中图分类号:TM933.23

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)01-0089-08

Research on Analysis and Prediction of Distortion Phenomena of Power Frequency Electric Field Around Human Body Based on Regression Analysis

GONG Quanquan^{1*}, YANG Liuqian¹, HOU Chen², LI Xi², ZHANG Zhaobo¹

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: In order to explore the distribution pattern of power frequency electric field surrounding the human body beneath transmission lines and quantitatively analyze the distortion effect of the human body on the field strength when it is situated within the power frequency electric field, this paper takes the power frequency electric field generated by the side conductor of a 500 kV overhead line as the research object. A portable power frequency electric field measurement device is used to detect the electric field strength at various positions and distances in the vertical and horizontal directions relative to the human body, thereby obtaining the distribution pattern of the power frequency electric field around the human body beneath transmission lines. The results show that the head, shoulders, upper arms, waist, buttocks, knees and feet of the human body all have different distortion effects on the electric field strength. When the distance between the measuring position and the human body is greater than 100 cm, the distortion effect of the human body on the electric field in the surrounding air domain can be ignored. On this basis, through regression analysis of the results of the electric field strength detection at different points in the horizontal and vertical directions relative to the human body, a correction equation is obtained for the impact of different parts of the human body and different positions from the electric field center on the power frequency electric field strength, laying an important foundation for proposing protective measures for workers.

Keywords: transmission lines; power frequency electric field; distortion effect; regression analysis

基金项目:国网山东省电力公司电力科学研究院自主研发项目“便携式工频电磁场检测设备校准技术研究”(ZY-2023-07)。

Independent Research and Development Project of State Grid Shandong Electric Power Research Institute "Research on Calibration Technology of Portable Power Frequency Electromagnetic Field Testing Equipment" (ZY-2023-07).

0 引言

随着我国经济的快速发展,电力需求持续超预期增长,据国家能源局数据显示,2023年我国全社会用电量为9.224 1万亿kWh,同比增长6.7%。在此

背景下,我国电力建设迅速发展,以特高压为主的输变电建设工程技术日益完善,为用户的稳定用电奠定良好基础^[1-2]。但随着高压输电线、变电站等输配电系统的广泛分布和使用,输电过程中产生的工频电磁场对环境的影响日渐增大,导致公众和供电部门职业工作人员暴露在电磁场下的可能性和受暴露水平不断提高^[3-6],如不加以重视,将对相关人员健康产生严重影响。

近年来,公众对于变电站和超特高压输电线路建设对周围环境和人类健康可能带来的直接影响表示了显著担忧^[7-11]。谢莉等^[7]发现混合工频和直流电场存在叠加效应,强调在电场控制值的设计中必须综合考虑二者,以更有效地预防人体直接感受和暂态电击感受的潜在危害。李显等^[9]证明工频电场主要分布在关键设备区域,可能对人体健康造成危害,尤其在出线场、升压站和高压电输出区存在超标情况,这表明工频电场是这些电站主要的职业病危害因素之一。刘森等^[10]提出在户外式 220 kV 变电站运行中,需要强化个体防护,特别是在工频电场较大的巡检点位,同时应在主变压器附近采用隔声罩等降噪设施来减轻噪声影响,以有效应对工频电场、噪声等职业病危害。上述研究证明,当人体长期暴露在电磁场中,可能会损害中枢神经系统、心血管系统,使人出现头晕、头痛、失眠、记忆力衰退等情况。

控制工频电场对人体的健康危害,准确评估工频电场分布情况,并分析不同条件下供电公司作业人员日常工作时人体周围空间的工频电场畸变规律,在此基础上,制定行之有效的防护策略,增强公众及职业人员对变电站电磁环境的了解,减轻工作人员心理负担。通过机理建模分析和探头检测,实现工频磁场分布规律的准确识别,是现有工频磁场仿真分析的主要思路^[12-19]。张建功等^[12]使用 EFA-300 工频场强仪对锡盟—胜利 1 000 kV 特高压交流输变电工程进行实地测量,提出准确率更高的仪器校准方法,进一步提高测量精度,并降低不确定度。崔帅威^[13]利用里德堡原子的外电场敏感特性,实现了工频电场频率和强度的精确测量,最小可测电场强度为 3.16 V/cm,频率测量误差优于 0.2%。张业茂等^[15]提出不同湿度条件下工频电场测量的方法,提高了交流输变电工程中工频电场测量的准确性和效率。唐法庆^[16]提出了一种基于电

场计算和电磁场仿真的机械臂安全距离监测方法,通过建立输电线路设备模型并分析电场分布,计算高压带电体安全距离的临界电场值,并设计相应的装置进行监测。

现有研究为工频电场的准确测量奠定了较好的基础,但由于工频电场易受外界电力电子设备等相关因素的影响,致使利用检测设备对工频电场检测时所得场强结果误差较大。为量化识别工频电场受电介质极化和空间电荷存在等因素影响所引发的畸变作用,国内外学者多数采用回归分析或软件仿真等形式,建立电场场强的修正方程,进而得到更合理的场强检测结果^[20-24]。郑庆阳等^[20]推导出了球形电场测量传感器测量电场的基本公式,并根据 Ansoft Maxwell 电磁场仿真软件对球形电场传感器探头的畸变效应进行修正,得出球形探头尺寸做得尽量小可以减小探头的电场畸变效应的结论。张占龙等^[21]通过实例分析,在得出传感器感应电压与电场强度呈线性关系的基础上,利用影响因子矩阵对电场畸变进行了校正分析,有效降低了场强结果的平均误差。Shi 等^[22]结合有限元仿真计算,建立了 800 kV 直流环氧树脂芯 SF₆ 气体复合绝缘穿墙套管的有限元模型,有效改进工频电场畸变效应对测量精确度的影响。赵志斌等^[24]采用回归分析手段,对 1 000 kV 交流同塔双回输电线路邻近不同结构和材料建筑物时的工频电场场强结果进行修正,增强了场强结果的准确性。上述研究量化分析了传感器引发的工频电场畸变效应,并提出相应的修正手段,以得到更为准确的场强结果,但在便携式工频电磁场检测设备迅速发展的背景下,人工手持传感器进行场强检测已成为场强监测的主流手段,现有研究较少分析人体位于电场内对工频电场产生的畸变作用,致使人体周围空间的工频电场识别准确性较差,且无法结合人体情况制定针对性的防控策略。

因此,文中以 500 kV 架空线路为研究对象,通过便携式工频电磁场检测设备,综合分析在人体水平和垂直方向上不同部位及间距时工频电场的变化趋势,并通过回归分析拟合出人体不同位置及间距对工频电场影响的修正方程,为后续工频电场的精确测量和评估奠定了数据支撑,对提出工作人员防护措施具有重要意义。

1 理论方法

1.1 输电线路下工频电场计算方法

工频电场是指按照 50 Hz 或 60 Hz 随时间正弦变化的电荷产生的电场。该电场电力线呈现为始于正电荷、终于负电荷的非闭合曲线。其中,“点”结构的电场强度随距离平方的倒数衰减,“线”结构的电场强度随距离的倒数衰减。在实际应用中,工频电场的计算方法主要包括等效电荷法、模拟电荷法、矩量法、有限元法、边界元法等。本文所用便携式工频电磁场检测设备探头以模拟电荷法为内核,通过电场感应器和信号处理单元,检测电荷分布的实时变化数据,实现对不同位置工频电场的准确测量。

模拟电荷法作为一种求解电磁场场强的典型数值计算方法,常用于电磁场分析、天线设计等领域。该方法将导体表面上的电荷分布建模成一系列离散的电荷元,并通过求解电场或电流分布的积分方程来获取系统的电磁特性,其场强求解流程如下。

1) 电荷分布建模。

将导体表面上的电荷分布表示为一系列离散的电荷元, Q 为每个电荷元的电荷量, r 为电荷元位置,则电荷分布可以用一个电荷密度函数 $p(r)$ 描述,即

$$Q = \int p(r) dS \quad (1)$$

式中: S 为导体表面。

2) 积分方程构建。

结合电场或电流的分布,构建积分方程,具体表达式为

$$E = \int GTdS + ZE_{\text{incident}} \quad (2)$$

式中: E 为电场; T 为电流密度; G 为 Green 函数值; Z 为自由空间中的波阻抗; E_{incident} 为入射场。

3) 离散化。

将表面电荷和电流分布离散化,用一系列的电荷元和电流元近似表示,生成线性方程组。

4) 方程组求解。

通过求解得到的线性方程组,可以得到电荷元和电流元的数值解,从而得到电场或电流的数值解。

1.2 回归修正方法

回归修正是一种统计学和数据分析领域中常用

的方法,该方法可在构建回归模型的基础上引入附加项或调整系数,以修正模型的偏差或错误。该方法的核心目标是提高模型的拟合能力,使其更好地适应实际数据,其具体流程如下。

1) 回归模型构建。

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (3)$$

式中: y 为因变量; x 为自变量; $f(\cdot)$ 为响应关系; ε 为误差。

2) 修正项的引入。

修正项可以包括原始变量的平方项、交互项,或者其他可能影响因变量的变量。例如,在考虑非线性关系时,可以引入二次项或高次项,以适应数据中的曲线关系。

3) 模型的评估与比较。

引入修正项后,需要对修正后的模型进行评估,比较其拟合效果和模型的解释力,通常使用统计指标如拟合系数 R^2 、均方误差等进行比较。

2 不同部位及间距的工频电场

为准确识别人体位于 500 kV 架空线路边导线电场,对工频电场产生的畸变作用,采用便携式工频电磁场测量设备检测人体处于工频电场时水平和垂直方向上不同距离的电场场强,通过与无人存在时在相同位置检测的电场场强进行比较,量化分析人体对工频电场场强的影响。测点处的 500 kV 输电线路排列方式为水平排列,导线为四分裂,线间距为 10.0 m,线高为 25.0 m。测量设备量程 0.01 V/m~100 kV/m,分辨率 0.01 V/m;挑选身高(1.72 m±0.01 m)和体重(70 kg±2 kg)相近的 10 人进行测量,每人测量数据 10 组,戴安全帽、穿长袖工作服、穿绝缘鞋。检测时气温为 30~35 ℃,湿度为 45%~55%。

其中,水平方向分别检测位于人体头部、肩部、上臂、腰部、臀部、膝部、脚部时,水平距离分别位于距导线正下方 0、3 cm、5 cm、10 cm、20 cm、30 cm、50 cm、100 cm、200 cm、300 cm、400 cm、500 cm 处的场强大小;垂直方向检测人体位于导线正下方 0 时,在人体戴安全帽后分别距离安全帽顶部 0、3 cm、5 cm、10 cm、20 cm、30 cm、50 cm、60 cm、70 cm 处的场强大小,具体测量位置如图 1 所示。

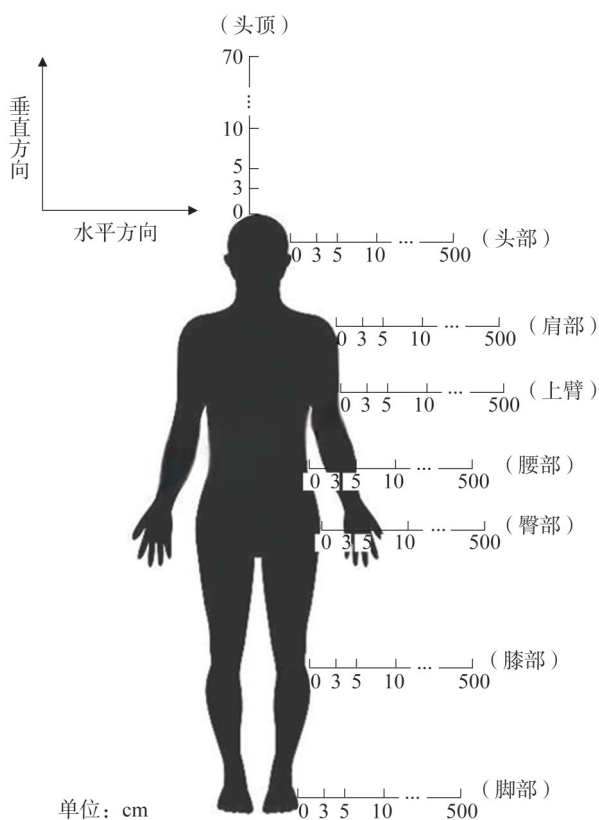


图1 水平和垂直方向上的不同距离检测位置

Fig.1 Different distance detection positions in horizontal and vertical directions

2.1 水平方向上人体对工频电场的影响

在有人和无人条件下,根据在人体不同部位且水平方向距离人体不同点位时的 500 kV 架空线路边导线平均电场场强检测结果,并结合实际数据情况,绘制工频电场场强对比图,如图 2 所示。在有人条件下,当便携式工频电磁场检测设备位于人体头部,水平距离向外分别偏离导线正下方 0、3 cm、5 cm、10 cm、20 cm 时,电场场强分别为 20 399.0 V/m、10 914.0 V/m、6 098.3 V/m、4 344.3 V/m 和 3 606.4 V/m,相较于无人条件下相同点位的场强结果 2 161.5 V/m、2 163.9 V/m、2 168.4 V/m、2 166.7 V/m 和 2 161.2 V/m,分别增长了 843.7%、404.4%、181.2%、100.5% 和 66.9%。肩部、臀部和脚部检测结果呈现出相似规律,当水平距离位于导线正下方 0 时,在有人条件下,肩部、臀部和脚部的检测结果相较于无人条件下分别增长了 826.6%、748.7% 和 373.6%。该检测结果表明,当人体存在电场时,人体对于工频电场场强

的影响是可量化的,并且这种影响在人体不同部位以及不同的水平距离是一致的,相比于无人条件下电场场强从高到低增长强度依次降低,其中,头部、肩部、臀部和脚部表现出明显的差异变化。这是因为人体是一种导体,当人体位于 500 kV 架空线路边导线电场时,人体表面感应的电荷会影响周围的电场分布,从而在初始电场的基础上产生额外的电场变化,形成了“畸变场”^[19]。

当人体位于工频电场时,除人体不同位置会对电场强度产生较大的影响,在水平方向上,也会使场强的衰减程度产生较大的变化。图 2 为便携式工频电磁场检测设备位于人体不同位置时,随着距导线正下方水平距离增加,电场场强的变化情况。结果表明,随着人体逐渐远离导线正下方,检测所得的工频电场场强呈随距离增加而缩小的趋势,且在有人的条件下,工频电场场强随着水平距离的增加,缩减速率较快。例如,在人体肩部位置且水平距离位于导线正下方 0 时,工频电场场强为 19 911.0 V/m,而水平距离位于导线正下方 500 cm 时,工频电场场强为 1 875.4 V/m,下降比例为 90.58%。而在无人条件下,在人体肩部位置且水平距离位于导线正下方 0 和 500 cm 时的工频电场场强分别为 2 148.8 V/m 和 1 728.9 V/m,下降比例仅为 19.54%。

2.2 垂直方向上人体对工频电场的影响

水平方向上工频电场场强波动研究表明,在有人和无人的条件下,工频电场的场强均在水平方向上呈现出随距离增加而降低的趋势。与水平方向相比,垂直方向在有人和无人条件下,工频电场场强随垂直高度的增加呈现出不同的变化形式。表 1 为在有人和无人条件下,距离安全帽顶部不同位置的平均电场场强检测结果,其中,当人体位于 500 kV 架空线路边导线正下方时,随着检测位置与安全帽上方距离的增加,工频电场的场强逐渐降低,且在 10 cm 内降低速率较快,而 10~70 cm 降低速度趋于平缓。例如,当位于距离安全帽 0 和 10 cm 时,工频电场场强分别为 15 524.0 V/m 和 3 102.0 V/m,降幅为 80.02%;而在距离安全帽 20 cm 和 70 cm 的位置时,工频电场场强分别为 1 943.0 V/m 和 975.2 V/m,降幅仅为 59.07%。结果显示,在无人条件下工频电场场强随距离变化所表现出的规律与在有人条件下的规律相反。在无人条件下,工频电场场强随垂直高度

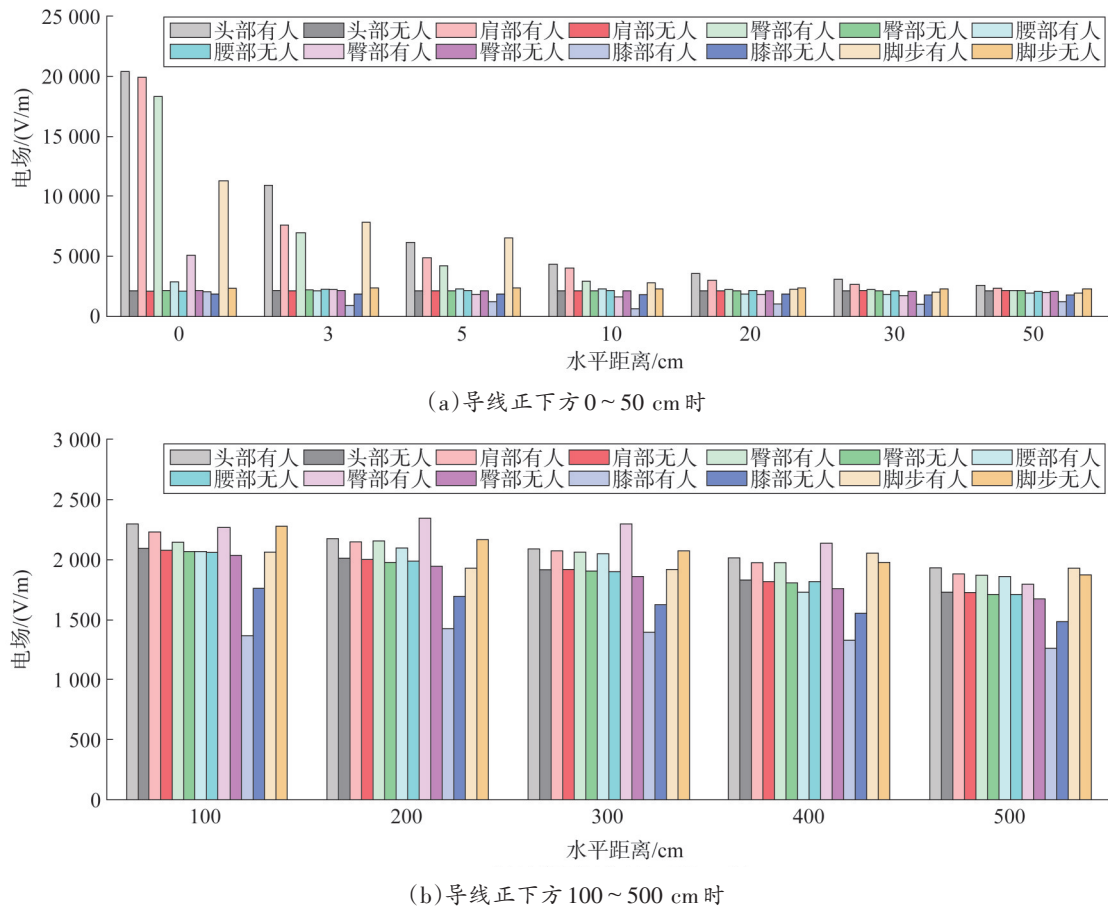


图2 有人和无人时位于人体不同位置及距离的工频电场场强对比图

Fig.2 Comparison of power frequency electric field strength at different positions and distances of the human body with and without people

的增加,呈现出增高的趋势,且增长速率平缓。例如,当垂直距离为 0 和 70 cm 时,工频电场场强分别为 2 466.2 V/m 和 2 889.1 V/m,增幅为 17.15%。

表 1 垂直方向上距离安全帽不同位置的平均电场场强
Table 1 The average electric field strength at different positions from the safety helmet in the vertical direction

垂直距离/cm	电场/(V/m)	
	有人	无人
0	15 524.00	2 466.20
3	9 851.00	2 656.40
5	5 247.00	2 680.50
10	3 102.00	2 715.20
20	1 943.00	2 749.50
30	1 624.00	2 784.40
50	1 352.00	2 819.30
60	1 049.00	2 854.20
70	795.24	2 889.10

3 基于回归分析的工频电场检测修正

上述研究结果表明,人体位于工频电场时,在垂直方向和水平方向会对电场场强产生较大影响。因此,随机选择志愿者 10 人,分别检测志愿者位于 500 kV 架空线路边导线正下方,检测在水平方向和垂直方向上不同距离的工频电场强度。在此基础上,结合无人条件下相同检测位置的实际场强结果,修正分析有人条件下的检测结果。

由图 2 可知,距离人体不同部位 100 cm 以内时,周围工频电场的比值随水平距离的增大而快速降低。而当位于人体的水平距离大于 100 cm 时,工频电场值随水平距离的增大而趋于稳定,此时有人和无人时的电场比值稍大于 1 且变化不大,即人体对附近的电场影响较小。因此,本文采用反比例函数形式,令有人和无人状态下工频电场强度比值为 Y ,

距人体不同部位的间距为 X , 对人体位于工频电场下的畸变结果进行拟合修正, 并结合回归系数估计值、标准误差值和拟合系数 R^2 值来定量衡量人体不同位置和间距与工频电场强度比值间的相关关系和拟合效果, 具体结果如表 2 所示。其中安全帽顶部的测量数据代表垂直方向上的工频电场拟合情况, 而头部、肩部、上臂、腰部、臀部、膝部和脚部的测量数据则反映了水平方向上的工频电场强度拟合情况。

表 2 人体不同位置和间距与工频电场强度比值的分析结果

Table 2 Analysis results of the ratio of power frequency electric field intensity at different positions and distances of the human body

测量部位	拟合回归方程	回归系数估计值	标准误差	R^2
安全帽顶部	$1/Y=0.043\ 736X+0.270\ 857$	0.044	0.003	0.964
头部	$1/Y=0.001\ 146\ 6X+0.494\ 723\ 6$	0.001	0	0.452
肩部	$1/Y=0.001\ 02X+0.557\ 620\ 0$	0.001	0	0.385
上臂	$1/Y=0.000\ 736\ 9X+0.661\ 184\ 0$	0.001	0	0.197
腰部	$1/Y=-0.000\ 117\ 2X+1.010\ 700\ 0$	0	0	0.031
臀部	$1/Y=-0.000\ 389\ 5X+1.010\ 827\ 5$	0	0	0.080
膝部	$1/Y=-0.001\ 397\ 7X+1.699\ 868\ 3$	-0.001	0.001	0.239
脚部	$1/Y=-0.000\ 780\ 4X+0.755\ 421\ 1$	0.001	0.001	0.145

由表 2 可知, 安全帽顶部的拟合方程拟合系数 R^2 为 0.964, 因此垂直方向上的工频电场畸变作用的修正效果最佳, 可为垂直方向上电场场强的精确仿真奠定较好的基础。在水平方向上, 相较于垂直方向的安全帽顶部, 其余测量部位相对于工频电场强度比值的回归分析展现出较低的拟合优度。具体而言, 肩部、上臂、腰部、臀部、膝部及脚部的拟合系数 R^2 显著低于 1, 这表明在水平方向上, 这些人体突出部位的电场强度比值与距离的线性关系并不明显, 因此在水平方向上的拟合效果不佳, 原因为人体突出位置积累了大量的感应电荷, 电场强度最强^[25], 垂直方向上人体头部可以被近似为一个简单的半球体形状, 受其他部位及地面的干扰较小, 随着距离增加, 工频电场强度按反比例衰减的规律较强。而水平方向上, 人体各部位之间距离较近, 突出位置产生

的感应电荷交互影响, 包括受到地面的影响, 可能会叠加多个来自不同方向的电场分量, 使得水平方向上拟合效果较差。

4 结束语

在电网设备激增、工频电磁场遍布的背景下, 识别人体位于工频电场对场强产生的畸变作用, 实现电场场强的准确仿真分析, 并制定针对性的人体电磁场暴露保护措施。文中以 500 kV 架空线路为研究对象, 综合分析在有人场景下, 便携式工频电磁场检测设备处于人体不同部位及间距时工频电场的变化趋势。研究结果表明, 人体的头部、肩部和脚部等突出部位对工频电场的畸变影响最大。在此基础上, 对有人和无人状态下工频电场强度比值以及与人不同部位的间距进行拟合修正, 并结合回归系数估计值、标准误差值和拟合系数来定量衡量修正效果, 为提出工作人员防护措施奠定重要基础。

受采样数据等客观因素的限制, 文中仅采用反比例函数的形式对因变量(有人和无人状态下工频电场强度比值)和自变量(距人体不同部位的间距)进行拟合分析, 所得结果虽能较好地指导垂直方向上的场强修正, 但在水平方向上的拟合效果不佳。后续研究可进一步探究导致场强畸变的客观因素, 设置更合理的自变量和因变量值, 并采用更先进的拟合手段, 对位于水平方向上人体其他部位的畸变作用进行更深入分析研究。此外, 后续研究可重点考虑探头大小对工频电场畸变作用的影响, 并将修正方程应用到实际案例中, 结合实际生产运行数据, 对拟合方程进行进一步的更新完善, 以提高所得拟合方程的合理性和准确性。

参考文献

- [1] 刘鹏, 张军, 谢梁, 等. 4000 m 高海拔地区特高压变电站导线电晕特性与选型研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2919-2928.
LIU Peng, ZHANG Jun, XIE Liang, et al. Study on corona characteristics and selection of UHV substation conductors in 4000 m high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2919-2928.
- [2] 华雪莹, 邢琛, 徐鹏, 等. 500 kV 输电线路附近民房工频电场的测试与分析[J]. 能源与环境, 2023(4): 34-36.
HUA Xueying, XING Chen, XU Peng, et al. Measurement and analysis of power frequency electric field of residential buildings

- near 500 kV transmission lines[J].Energy and Environment,2023 (4):34-36.
- [3] 邓学群,张悦,魏东,等.1 000 kV 特高压输电线路电磁环境影响预测与评价[J].能源与节能,2023(4):99-102.
DENG Xuequn, ZHANG Yue, WEI Dong, et al. Prediction and evaluation of electromagnetic environment impact of 1000 kV UHV transmission line[J].Energy and Energy Conservation, 2023 (4):99-102.
- [4] 张寿强.相间距对架空输电线路电磁环境的影响[J].自动化应用,2023(24):171-174.
ZHANG Shouqiang. Influence of phase spacing on electromagnetic environment of overhead transmission lines [J]. Automation Application, 2023(24):171-174.
- [5] 张跃,苏淮北,何明鹏,等.工频双极性方波电场下环氧树脂的空间电荷特性[J].中国电机工程学报,2023,43(13):5294-5301.
ZHANG Yue, SU Huaibei, HE Mingpeng, et al. Space charge characteristics of epoxy resin under power frequency bipolar square wave electric field[J].Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (13):5294-5301.
- [6] 刘哲,覃喜,刘燕平,等.考虑工频过电压的海上风电场无功配置优化方案[J].上海电力大学学报,2023,39(3):264-270.
LIU Zhe, QIN Xi, LIU Yanping, et al. Reactive power allocation optimization scheme for offshore wind farm considering power frequency overvoltage [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2023, 39(3):264-270.
- [7] 谢莉,陆家榆,杨勇,等.交直流输电线路混合电场的人体感受试验及设计控制值研究[J].中国电机工程学报,2024,44(2):776-789.
XIE Li, LU Jiayu, YANG Yong, et al. Study on human perception experiments and design limits of the hybrid electric field of parallel HVAC and HVDC transmission lines[J].Proceedings of the CSEE, 2024,44(2):776-789.
- [8] 姚伦芳.日常生活环境中的电磁辐射调查与评价[J].环保科技,2023,29(5):54-59.
YAO Lunfang. Investigation and evaluation of electromagnetic radiation in daily living environment[J].Environmental Protection and Technology, 2023, 29(5):54-59.
- [9] 李显,侯晓,张麟征,等.发电企业职业病危害因素与防护策略探讨[J].中国职业医学,2023,50(2):235-241.
LI Xian, HOU Xiao, ZHANG Linzheng, et al. Exploring occupational hazards and protective strategies in power generation enterprises [J]. China Occupational Medicine, 2023, 50 (2) : 235-241.
- [10] 刘森,李红彦,徐华雷,等.某220kV变电站职业危害因素检测与评价[J].吉林电力,2023,51(1):43-46.
LIU Sen, LI Hongyan, XU Hualei, et al. Detection and evaluation of occupational hazard factors in a 220kV substation[J].Jilin Electric Power, 2023, 51(1):43-46.
- [11] CECH R, LEITGEB N, PEDIADITIS M. Current densities in a pregnant woman model induced by simultaneous ELF electric and magnetic field exposure [J]. Physics in Medicine and Biology, 2008,53(1):177-186.
- [12] 张建功,鲁浩男,万皓,等.特高压交流输电工程工频电场测量及不确定度分析[J].水电能源科学,2023,41(6):202-205.
ZHANG Jianguo, LU Haonan, WAN Hao, et al. Power frequency electric field measurement and uncertainty analysis of UHV AC power transmission and transformation project[J].Water Resources and Power, 2023, 41(6):202-205.
- [13] 崔帅威.基于里德堡原子光谱特性的工频电场测量[D].太原:山西大学,2023.
- [14] 刘淮通.用于架空输电线路电压反演的工频电场测量方法研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [15] 张业茂,刘健桦,万保权,等.201910238077.5[P].2019-06-21.
- [16] 唐法庆.基于工频电场测量方法的机械臂安全距离监测[D].北京:华北电力大学,2018.
- [17] 刘跟生,江红,沈竞为,等.500kV变电站作业场所工频电磁场强度分析[J].环境与职业医学,2011,28(11):661-663.
LIU Gensheng, JIANG Hong, SHEN Jingwei, et al. Analysis on power frequency electric and magnetic field intensity at workplace of 500 kV substations [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2011, 28(11):661-663.
- [18] 吴婷婷,锁景媛,陶凤源.某500kV变电站电磁环境测量及结果分析[J].机电信息,2013(24):3-4.
WU Tingting, SUO Jingyuan, TAO Fengyuan. Electromagnetic environment measurement and result analysis of a 500kV substation [J]. Mechanical and Electrical Information, 2013 (24) : 3-4.
- [19] 张广洲,朱银军,张业茂,等.输电线路工频电场分布特性与计算方法辨析[J].高电压技术,2011,37(10):2581-2586.
ZHANG Guangzhou, ZHU Yinjun, ZHANG Yemao, et al. Calculation methods and distribution characteristics of power frequency electric field of transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(10):2581-2586.
- [20] 郑庆阳,阮召安.球形电场传感器测量原理及其电场畸变效应分析[J].农村电气化,2018(8):25-27.
ZHENG Qingyang, RUAN Zhaoan. Measurement principle and electrical field distortion effect analysis suited to spherical electrical field measurement sensor[J].Rural Electrification, 2018 (8):25-27.
- [21] 张占龙,胡平,李敬雄,等.均匀场域中工频电场畸变效应分析[J].重庆大学学报,2012,35(4):19-25.
ZHANG Zhanlong, HU Ping, LI Jingxiong, et al. Analysis of power frequency electric field distortion effect on uniform electric field [J].Journal of Chongqing University, 2012, 35(4):19-25.
- [22] SHI Y F, XIE G S, WANG Q Y, et al. Simulation analysis and

calculation of electric field distribution characteristics of UHV wall bushing[J].Energy Reports,2021,7:110-117.

- [23] YANG B,WANG S H,WANG Q,et al.Simulation and analysis for power frequency electric field of building close to power transmission lines[C]//2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC).IEEE,2014:451-454.
- [24] 赵志斌,董松昭,谢辉春.特高压交流同塔双回输电线路邻近建筑物时畸变电场研究[J].高电压技术,2012,38(9):2171-2177.
ZHAO Zhibin,DONG Songzhao,XIE Huichun.Distorted electric field of the building near UHVAC double circuit transmission lines on the same tower[J].High Voltage Engineering,2012,38(9):2171-2177.
- [25] 余梦婷,汪金刚,李健.人体对高压工频电场测量影响与试验研究[J].电测与仪表,2013,50(6):24-27.
YU Mengting,WANG Jingang,LI Jian.The experimental study on the human body influence on measurement of high voltage power

frequency electric field [J].Electrical Measurement & Instrumentation,2013,50(6):24-27.

收稿日期:2024-01-05

修回日期:2024-03-05

作者简介:

巩泉泉(1984),通信作者(61908058@qq.com),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力职业卫生与环保;

杨柳倩(1994),女,博士,工程师,主要研究方向为电力职业卫生与环保;

侯琛(1985),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力职业卫生;

李玺(1993),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力环境保护;

张兆波(1980),男,工程师,主要研究方向为电力职业卫生与环保。

(责任编辑 车永强)



关注《山东电力技术》