

山东电力技术

SHANDONG ELECTRIC POWER



广告

双高有源配电网态势感知与运行控制技术实验室

国网山东省电力公司主办

ISSN 1007-9904



2025.7

第52卷
2025年7月

山东电力技术

2025年 第52卷 第7期 (总第332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
瑞典开放获取期刊目录(DOAJ)收录期刊

山东电力技术

SHANDONG DIANLI JISHU

(月刊)

1974年创刊 2025年第7期
第52卷(总第332期)
2025年7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*104*zh*P* ¥18.00*8000*10*2025-7*n

《山东电力技术》入选 中国科技核心期刊



“微电网储能系统优化关键技术” 专栏

征稿启事



实现能源清洁低碳转型、保障电力系统安全稳定运行是当前能源发展的核心任务。微电网作为集成分布式电源、负荷及储能的关键载体，在提升能源利用效率、增强供电可靠性、促进可再生能源就地消纳、支撑电网灵活互动等方面发挥着日益重要的作用。储能系统是微电网实现上述功能的核心环节，其优化配置与高效运行直接决定了微电网的经济性、可靠性与灵活性。微电网储能优化涉及多时间尺度、多目标协调、多约束耦合等复杂问题，涵盖规划、运行、控制、市场等多个层面，亟须深入研究其关键技术。

为集中展示微电网储能系统优化技术领域的最新研究成果、创新方法和工程应用实践，探讨解决当前面临的挑战与热点问题，促进学术交流和科技进步，特邀请**重庆大学电气工程学院牛涛研究员、大连理工大学李辉副教授、合肥工业大学杨越副教授、郑州大学薛霖副教授担任特约主编**，拟针对“微电网储能优化关键技术”开设专栏，诚挚欢迎国内外相关领域的专家学者、工程技术人员踊跃投稿！

一、征稿方向（包括但不限于）

- 1、微电网储能系统容量配置与选址定容优化技术；
- 2、微电网储能系统动态特性建模与仿真技术；
- 3、考虑多时间尺度的微网储能运行优化策略；
- 4、微电网源-储-荷协同优化调度与控制技术；
- 5、微电网储能系统参与电力市场交易策略；
- 6、微电网储能系统提升供电可靠性与韧性的技术；
- 7、微电网储能系统功率协调与稳定控制技术；
- 8、微电网储能系统状态估计、故障诊断与寿命预测技术；
- 9、微电网混合储能优化配置与协调控制技术；
- 10、微电网储能关键设备（PCS、BMS等）优化控制与新型技术；
- 11、其他与微电网储能系统优化紧密相关的关键技术。

二、投稿要求

1、请从山东电力技术网站投稿，请在题名后标注“微电网储能系统优化关键技术”，网址：<http://sddljs.cbpt.cnki.net>

2、稿件详细要求请参照《山东电力技术》投稿须知及论文写作模板，投稿须知及论文写作模板请在山东电力技术网站下载。

3、稿件一经采用，本刊将按照《山东电力技术》期刊稿费发放标准向作者发放稿费，稿酬优厚。

4、征文截止时间 2025 年 10 月 31 日，其他不明事宜，请联系《山东电力技术》编辑部。电话：0531-67982997。

目次

源网荷储协调互动

- 考虑时空分布特性的异构柔性负荷模态研究 温志鹏, 宋显锦, 杨冰(1)
- 基于深度确定性策略梯度算法的乡村光-沼虚拟电厂低碳调度方法 王琛, 孙哲夫, 张自伟(14)
- V2G模式下电动汽车多目标需求响应调度策略 刘洋, 于海东, 刘文彬, 文祥宇, 刘明林(27)

电网运行与控制

- 雷击条件下柔性直流输电同杆并架线路相互影响仿真分析 ... 陈瑞, 郑少明, 刘博, 董鹏, 黄天啸(35)
- 面向MMC-HVDC换流站的构网型和跟网型控制无缝切换技术 孙孔明, 李宽, 冯忆文, 张远实(44)

能源互联网

- 考虑配电网承载力的建筑领域电能替代潜力测算 庞超, 丁一, 赵晨阳, 霍现旭(54)
- 基于L-M优化BP算法的多因素协同电力负荷预测 白卓, 郭啸, 孙华忠(68)

输变电

- 变压器短路实验下基于WOA-SVM的顶层油温声学反演方法
..... 杨超, 薛帅, 李承振, 郭昊鑫, 杨梦娇(76)
- 基于数字化映射的开关柜状态监测技术研究 霍凌宇, 苏国强, 和家慧, 刘合金, 张林利(86)
- 架空输电线路舞动风险定量评价方法研究 何勇军, 孙国磊, 张斌, 赵彬, 程剑(97)

CONTENTS

•Source-Grid-Load-storage Coordinated Interaction•

- Research on Heterogeneous Flexible Load Mode Considering Spatiotemporal Distribution Characteristics
..... WEN ZhiPeng, SONG XianJin, YANG Bing(1)
- Low-carbon Dispatching Method for Rural PV-biogas Virtual Power Plant Based on the Deep Deterministic Policy
Gradient Algorithm WANG Chen, SUN Zhefu, ZHANG Ziwei(14)
- Multi-objective Demand Response Scheduling Strategy for Electric Vehicles in V2G Mode
..... LIU Yang, YU Haidong, LIU Wenbin, WEN Xiangyu, LIU Minglin(27)

•Power Grid Operation and Control•

- Simulation Analysis of the Interaction of Flexible HVDC Transmission Lines Erected on Same Tower under
Lightning Conditions CHEN Rui, ZHENG Shaoming, LIU Bo, DONG Peng, HUANG Tianxiao(35)
- Seamless Switching Method between Grid-forming and Grid-following Control for MMC-HVDC Converter Stations
..... SUN Kongming, LI Kuan, FENG Yiwen, ZHANG Yuanshi(44)

•Energy Internet•

- Calculation of the Potential for Electric Energy Substitution in the Construction Field Considering the Carrying
Capacity of the Distribution Network PANG Chao, DING Yi, ZHAO Chenyang, HUO Xianxu(54)
- Multi-factor Collaborative Power Load Forecasting Based on L-M Optimized BP Algorithm
..... BAI Zhuo, GUO Xiao, SUN Huazhong(68)

•Power Transmission and Transformation•

- Acoustic Inversion Method for Top-oil Temperature in Transformers Based on WOA-SVM Under Short-circuit
Testing YANG Chao, XUE Shuai, LI Chengzhen, GUO Haoxin, YANG Mengjiao(76)
- Research on Switchgear Condition Monitoring Technology Based on Digital Mapping
..... HUO Lingyu, SU Guoqiang, HE Jiahui, LIU Hejin, ZHANG Linli(86)
- Research on Quantitative Evaluation Method for Galloping Risk of Overhead Transmission Lines
..... HE Yongjun, SUN Guolei, ZHANG Bin, ZHAO Bin, CHENG Jian(97)

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

考虑时空分布特性的异构柔性负荷模态研究

温志鹏¹, 宋显锦^{1*}, 杨冰²

(1. 山西大学电力与建筑学院, 山西 太原 030006; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 柔性负荷的负荷预测与模态分析是构建可再生能源电力系统的重要内容。将建筑空调、电动汽车负荷作为研究对象, 提出一种考虑不同时空特性的异构柔性负荷时空分布预测模型, 对异构柔性负荷模态进行分析。首先, 在负荷聚合商运营模式的基础上, 构建高比例可再生能源电力系统的分层式物理架构。其次, 结合出行链概念建立异构柔性负荷时空状态量, 对异构柔性负荷及其影响因素进行建模研究, 采用蒙特卡洛法计算得到负荷变化曲线。最后, 以某城市的实际数据建立交通网络图, 实现在不同条件下对异构柔性负荷的仿真计算。结果表明, 环境温度对其负荷模态影响较大, 冬、夏季异构柔性负荷之间呈现出较为明显的互补特性; 不同充电区域的异构柔性负荷具有明显差异, 电动汽车展现出远高于建筑空调的调节潜力; 用户充电偏保守可以较好地平滑异构柔性负荷充电时的负荷波动。

关键词: 异构柔性负荷; 出行链; 时空分布特性; 负荷模态; 蒙特卡洛

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)07-0001-13

Research on Heterogeneous Flexible Load Mode Considering Spatiotemporal Distribution Characteristics

WEN Zhipeng¹, SONG Xianjin^{1*}, YANG Bing²

(1. School of Electric Power and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: Load prediction and modal analysis of flexible load are important contents of building a renewable energy power system. In this paper, the load of building air conditioning and electric vehicle is taken as the research object, and a spatiotemporal distribution prediction model of heterogeneous flexible loads considering different spatiotemporal characteristics is proposed, and the heterogeneous flexible load mode is analyzed. Firstly, based on the operation mode of load aggregators, a hierarchical physical architecture of a high-proportion renewable energy power system is constructed. Secondly, combined with the concept of travel chain, the spatiotemporal states of heterogeneous flexible load is established, the heterogeneous flexible load and its influencing factors are modeled and studied, and the load change curve is calculated by Monte Carlo method. Finally, the transportation network diagram is established based on the actual data of a specific city, and the simulation and calculation of heterogeneous flexible loads under different conditions are realized. The results show that the ambient temperature has a great influence on its load mode, and the heterogeneous flexible loads in winter and summer show obvious complementary characteristics. Heterogeneous flexible loads vary significantly across different charging areas, and electric vehicles show much higher regulation potential than building air conditioners. Users exhibit conservative charging behavior, which can better smooth out the fluctuation of heterogeneous flexible load charging load.

Keywords: heterogeneous flexible loads; travel chains; spatiotemporal distribution characteristics; load mode; monte carlo

0 引言

近年来,随着我国“双碳”目标的提出,新能源在电力系统中的占比也逐步升高。截止到2023年6月,我国上半年新增装机容量达1.4亿kW,其中风力发电、光伏发电的新增装机容量在1亿kW以上,

占全国上半年新增装机容量比重的71%^[1-2]。与此同时,风电机组、光伏机组出力具有较强的间歇性、随机性、波动性,高比例并入电网需要配套更多储能、需求侧响应等柔性控制资源,成为当前新型电力系统研究的重要内容。

当前,新型电力系统中柔性资源应用^[3]的研究

可以分为电源响应^[4]、电网响应^[5]及负荷响应^[6]。其中,电源响应包括对多种能源互补特性的研究与对火电灵活性改造等技术;电网响应则包括先进控制技术、安全防御措施、新型系统结构及电网输电方式等方面的研究;负荷响应主要通过挖掘需求侧资源的调节潜力^[7]来保障电力供需平衡,实现系统稳定。

为充分发挥负荷侧柔性资源在新型电力系统中的作用,国内外学者对柔性负荷的分布开展了广泛的研究,主要包括电动汽车充电负荷与建筑空调负荷。在电动汽车充电负荷方面,其研究大都包括关于电动汽车出行需求的蒙特卡洛法^[8-9]和采用排队理论^[10]分析抵达充电站电动汽车充电功率的概率分析法。文献[11]考虑到用户行驶规律等因素,运用蒙特卡洛法建立了电动汽车充电模型,但并未考虑温度等外界条件对电动汽车充电负荷的影响;文献[12]考虑到温度与路况对电动汽车耗电量的影响,采用模糊数学理论对二者进行建模分析,并使用蒙特卡洛法对不同工况下的电动汽车负荷充电曲线进行计算,但针对温度与路况所建隶属度函数太过简单,导致最终结果可能与实际情况有较大差异;文献[13]根据电动汽车实测数据建立温度、交通能耗模型,却并未将日益增长的电动公交车充电负荷考虑进去;文献[14]利用最短路径模拟 Dijkstra 算法规划用户出行规律,模拟用户出行状况与电动汽车荷电状态(state of charge, SOC),但研究中只考虑给定的静态数据,忽略了信息交互下实时情况的变化;文献[15]提出了融合用户出行心理、交通路网和车辆充电特性的电动汽车充电负荷预测模型,但并未模拟汽车在路网中的行驶过程,对路网中的拥堵等因素考虑不周。在建筑空调虚拟储能建模^[16-17]方面,文献[18]基于空调负荷热力学模型及人体舒适度模型建立空调虚拟储能模型,不过其所用人体舒适度模型是简化后的热感觉投票值模型,太过笼统,与实际情况并不吻合;文献[19]通过调节空调内冷冻水的温度实现了空调充放电功率灵活控制,将中央空调模型等效为虚拟储能模型,避免了频繁启停空调制冷机所带来的损害,但其成本将大大增加;文献[20]将电动汽车与空调全部视为虚拟储能,并用蒙特卡洛法分析二者聚合模型特性,但却没有过多考虑外

界因素的影响。以上文献在对柔性负荷建模的过程中,并未深度挖掘变量间的耦合关系,也没有将足够的实际数据代入其中,导致最终结果与实际值偏差较大。

针对柔性负荷在电力规划中无法被精确聚合利用等问题,以不同工况下异构柔性负荷的负荷模态为重点,提出了一种考虑到不同时空特性的异构柔性负荷用电时空分布模型。采用出行链概念建立异构柔性负荷时空模型。通过对异构柔性负荷影响因素(温度、路况、热阻等)的建模,分析不同工况下异构柔性负荷曲线特性,为异构柔性负荷的控制策略研究奠定基础。

1 考虑异构柔性负荷的电网架构

高比例可再生能源电力系统主要由含分布式新能源的高度灵活可控电源、多元化演变的受端电网及与其他需求深度耦合的柔性资源构成。为提高负荷侧柔性资源的聚合应用,需要构建控制系统,系统架构如图1所示。

调度架构具体可分为系统调度层、分配协调层和聚合控制层,其中系统调度层的主体是系统调度机构,在接收到发电侧、用电侧与电力市场的运行情况,负责制定电站调节目标、反馈市场交易结果、优化用户用电模式;分配协调层主体是聚合商协调中心,负责将调节目标进行协调分配至各个聚合商处;聚合控制层主体是聚合商及以下的负荷设备,负责执行所分配到的调节目标。

2 异构柔性负荷建模计算

电动汽车充电负荷和建筑空调负荷,是当前柔性负荷研究应用的两类负荷。电动汽车具有移动储能特性,随着其规模的逐步增加,通过有序充电控制或者车网互动控制,将在负荷调节等方面发挥出更大的作用。建筑空调负荷具有天然的柔性调节能力,通过对建筑集群内的空调温度进行调节,可实现对电网负荷的有序控制,接下来分别对其进行建模分析。

2.1 考虑时空与温度影响的电动汽车负荷模型

2.1.1 电动汽车数学模型

电动汽车进行充电主要依靠于车内动力电池,

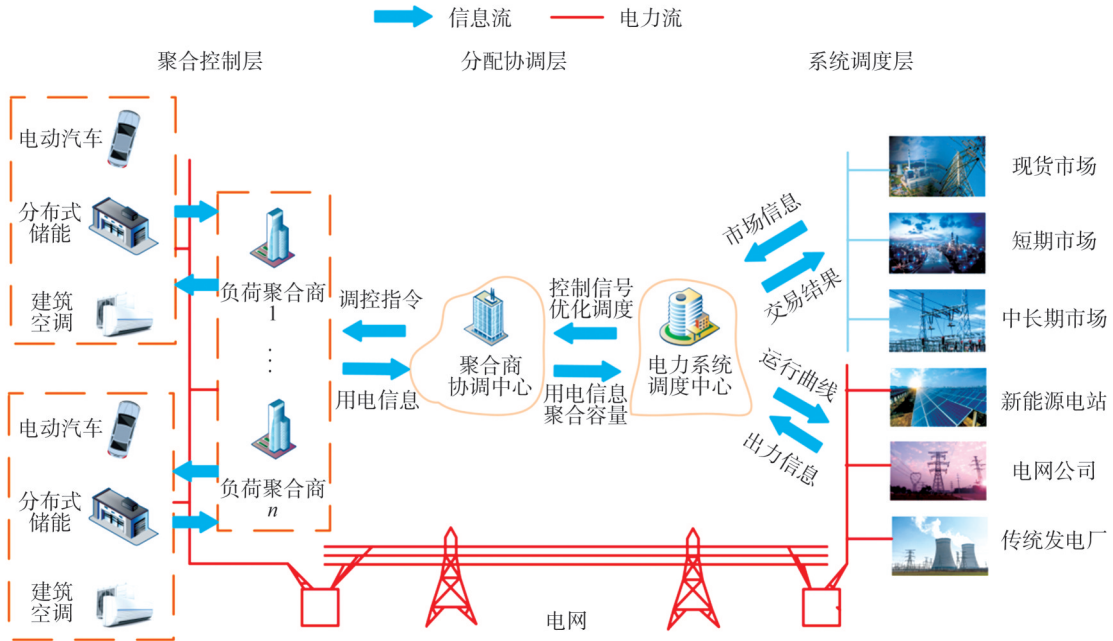


图1 考虑异构柔性负荷的电网控制架构

Fig.1 Grid control architecture considering heterogeneous flexible loads

其充电能量特性如图2所示。文中电动汽车以充电使用为主,不考虑其放电情况,因此电动汽车SOC在充电过程中呈现近似线性增长。

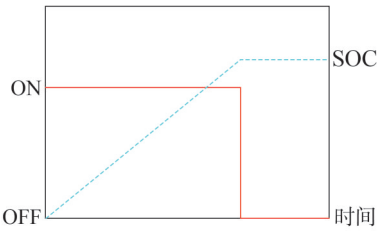


图2 电动汽车充电时能量耦合特性

Fig.2 Energy coupling characteristics during EV charging

电动汽车在充电时的能量模型可描述为

$$\begin{cases} E_n \cdot S_n(t+1) = E_n \cdot S_n(t) + P_{e,n}(t) \cdot \Delta t \\ P_{e,n}(t) = P_{cha,n}(t) \cdot \gamma_{cha} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_n 为第 n 辆电动汽车的动力电池额定容量; $S_n(t)$ 为 t 时刻第 n 辆电动汽车的 SOC; γ_{cha} 为电动汽车充电效率; $P_{cha,n}(t)$ 为第 n 辆电动汽车在 t 时刻充电功率; Δt 为电动汽车的一个充电时段; $P_{e,n}(t)$ 为第 n 辆电动汽车在 t 时刻的充电量。

实际上,影响电动汽车充电负荷的因素不仅有式(1)中的各项参数,还包括电动汽车的时空分布、

每公里耗电量及充电特性等,因此需要对其分别进行建模研究。

2.1.2 基于出行链的电动汽车时空分布

电动汽车用户的出行情况会对其充电负荷的时空分布产生直接影响,因此本文引入出行链概念,用以全面描述车辆出行的时空特征,如图3所示。

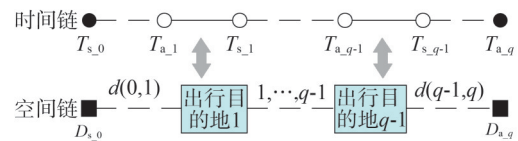


图3 出行链概念

Fig.3 Concept of travel chain

图3中时间链中的实心点表示用户从起始位置开始的出发时间与抵达第 q 个目的地的结束时间,分别以 $T_{s,0}$ 与 $T_{a,q}$ 表示;空心点表示用户各目的地的抵达与离开时间, $T_{a,1}$ 表示抵达第1个目的地的时刻, $T_{s,1}$ 表示离开第1个目的地的时刻;虚线表示居民行驶过程,实线表示居民停车时长。空间链中的实心方块表示用户的出行位置与结束位置; $d(q-1,q)$ 表示第 $q-1$ 个目的地与第 q 个目的地的路程。

不同类型的电动汽车出行时间和空间分布一般不同,本文主要考虑两类:电动私家车与电动公交车。根据我国居民出行调查,一般会将电动私家车目的地划分为3类:居民区(Home, H)、工作区(Work, W)、娱乐休闲区(Other, O)。本文以“家”为车辆一天往返行程的起迄点,忽略次要的出行目的,考虑最长含3个行驶目的地的主要出行链结构,典型种类如图4所示。

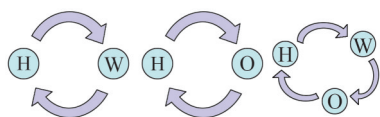


图4 典型出行链

Fig.4 Typical travel chain

根据我国用车调查数据显示,电动私家车各出行链比例设定如表1所示。

表1 出行链所占比例

Table 1 Proportion of travel chains

出行链	所占比例/%
H-W	47.4
H-O	20.9
H-W-O+H-O-W	31.7

由于电动公交车出行时间与出行路线较为固定,所以此出行链中并未考虑公交车占比。

2.1.3 考虑温度与路况的电动汽车每公里耗电量

每公里耗电量 ω 决定了电动汽车充电负荷,一些文献将其视为固定值,与实际情况不符。采用模糊数学理论,将交通路况与室外温度两个随机因素考虑在内,对每公里耗电量 ω 进行计算。

1) 交通路况。

参照文献[21]对城市道路服务水平的分级,将路况与不同服务等级对应,并依据各个城市道路服务等级所对应的自由流速度对归一化后的路况进行处理,结果如表2所示。其隶属度函数将以三角形形式呈现,如图5所示。

当路况不同时,随着行驶速度的变化,车辆每公里耗电量的变化公式为

$$\omega = (1 - v) \omega_0 \quad (2)$$

式中: ω_0 为自由流速度100%且不开空调时的电动汽车每公里耗电量; v 为不同路况下平均行驶车速占自由流速度的比例。假设 $\omega_0 = 0.1$ 时,电动汽车处于不同路况时(温度不变)每公里耗电量如表3所示。

表2 归一化路况

Table 2 Normalized road conditions

畅通 (A)	基本畅通 (B)	缓行 (C)	轻度拥堵 (D)	中度拥堵 (E)	重度拥堵 (F)
0.1	0.3	0.5	0.6	0.67	0.75

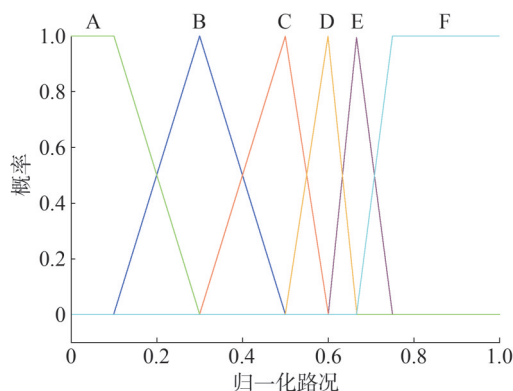


图5 交通路况隶属度函数

Fig.5 Traffic condition membership degree function

表3 每公里耗电量

Table 3 Electricity consumption per kilometer

耗电量	A级	B级	C级	D级	E级	F级
ω	0.11	0.14	0.2	0.25	0.3	0.4

2) 温度。

当外界气温过低或过高时,电动汽车用户会开启空调保持自身舒适。根据调研,电动汽车空调的开启会增加20%~40%的耗电量,本文以20%来计算。

为研究空调的开启概率,假设当乘客对车内温度不适应时会开启空调。在研究中常用预测不满意百分比(predicted percent dissatisfied, PPD)指标来衡量热舒适度^[22],表示为 α_{PPD} ,此时 α_{PPD} 代表车内空调开启概率。其表达式如下:

$$\alpha_{PMV} = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - p_a] - 0.42(M - W - 58.15) - 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - p_a) - 0.0014M(34 - t_{in}) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_{in}) \} \quad (3)$$

$$\alpha_{PPD} = 100 - 95e^{-(0.03353\alpha_{PMV}^2 + 0.2179\alpha_{PMV})} \quad (4)$$

式中: α_{PMV} 为人体热反应评价指标; M 为人体代谢强度; W 为人体做功强度; p_a 为水蒸气分压力; f_{cl} 为着装系数,是服装热阻 I_{cl} 的函数; $\bar{t}_r$ 为输入室内的平均辐射温度; h_c 为对流换热系数; t_{cl} 与 t_{in} 分别为服装表面温度与室内温度。

由式(3)和式(4)得到电动汽车用户开启空调概率与温度的关系如图6所示。

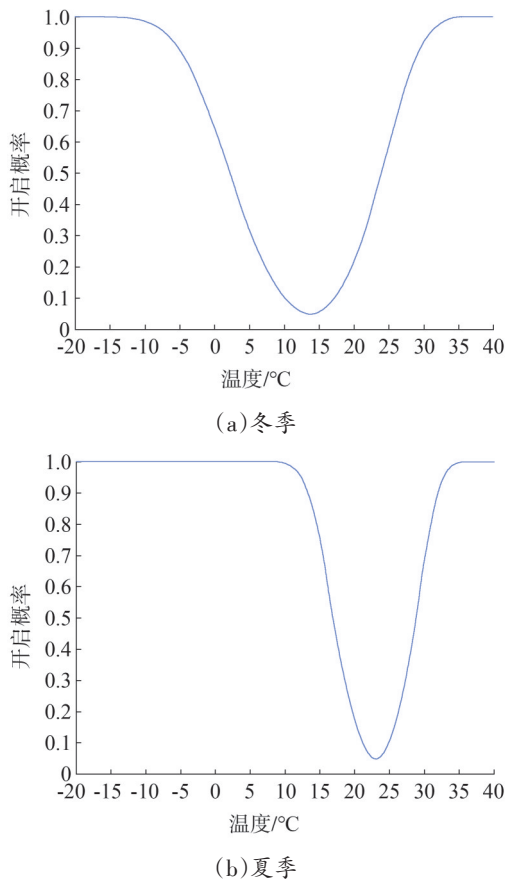


图6 冬夏季开启空调概率与温度关系

Fig.6 Relationship between the probability of turning on the air conditioner and the temperature in winter and summer

从图6可以看出,冬季人们所穿衣服较厚,在车

内温度 10~15 °C 时基本不会开启空调;而夏季人们所穿衣服较薄,在车内温度 20~25 °C 时基本不会开启空调,高于 25 °C 时人们开启空调概率大大增加。

3) 每公里耗电量。

将每公里耗电量划分为 5 个阶段:节省、一般、轻度耗能、中度耗能和极度耗能。每公里耗电量的隶属函数如图7所示,具体规则如表4所示。

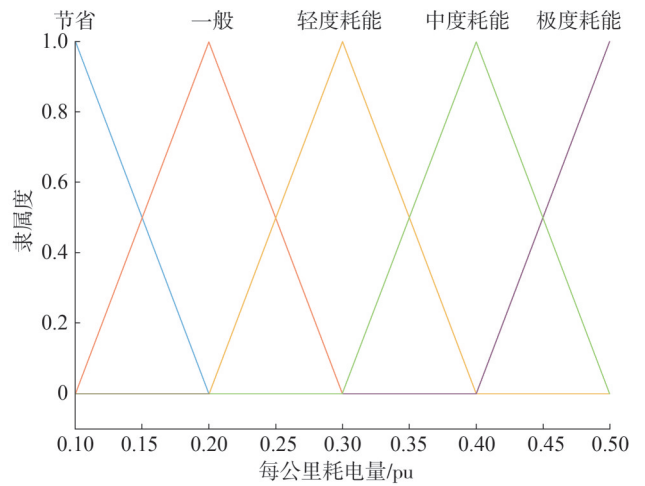


图7 每公里耗电量隶属度函数

Fig.7 Membership function of power consumption per kilometer

表4 模糊隶属度函数规则

Table 4 Rules for fuzzy membership functions

路况	空调开耗电量占比	空调关耗电量占比
畅通(A级)	节省 0.68	节省 0.9
	一般 0.32	一般 0.1
基本畅通(B级)	节省 0.32	节省 0.6
	一般 0.64	一般 0.4
缓行(C级)	一般 0.5	一般 1.0
	轻度耗能 0.5	
轻度拥堵(D级)	轻度耗能	一般 0.5
		轻度耗能 0.5
中度拥堵(E级)	轻度耗能 0.3	轻度耗能 0.5
	中度耗能 0.7	中度耗能 0.5
重度拥堵(F级)	中度耗能 0.2	极度耗能
	极度耗能 0.8	

2.1.4 考虑充电偏好的电动汽车充电特性

现有文献对电动汽车充电模式大都默认为保守

充电,即当电动汽车行驶到目的地后,其动力电池剩余电量低于最小SOC时才会为电动汽车充电。但电动汽车是否进行充电不仅取决于汽车剩余电量,还与用户充电偏好息息相关,带有相当的随机性。

通过汽车抵达目的地后的剩余电量及车主充电偏好来判断其是否进行充电。若电量在汽车设定的最大SOC与最小SOC之间,则根据车主充电偏好(0~100%)随机进行充电;若其SOC高于最大SOC,则不做任何处理;若经过下次行程后汽车电量低于最小SOC,则立即充电。假设电动汽车行驶到目的地时的充电条件如式(5)~式(7)所示。

$$S_{n,m+1,i} \geq S_{\min} \quad (5)$$

$$S_{n,m,i} \leq S_{\max} \quad (6)$$

$$S_{n,m+1,i} = S_{n,m,i} - \frac{\omega_{n,m+1} \cdot f(x)_{n,m+1}}{E_n} \quad (7)$$

式中: $S_{n,m,i}$ 、 $S_{n,m+1,i}$ 分别为第 n 辆电动汽车在第 m 次与第 $m+1$ 次出行抵达目的地后所进行的第 i 次充电后的电池SOC; $\omega_{n,m+1}$ 为第 n 辆电动汽车第 $m+1$ 次出行的每公里耗电量; $f(x)_{n,m+1}$ 为第 n 辆电动汽车第 $m+1$ 次出行的行驶里程; $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ 为电动汽车动力电池SOC上限、下限。

2.1.5 车辆充电时长与SOC

假设第 n 辆电动汽车开始充电时刻为 t_s ,下一次出行时刻为 t_c ,其充电时长 t_{cha} 和对应的SOC可被表示为:

$$t_{cha} = \begin{cases} 0, S_{n,m,i} \geq S_{\max} \\ \frac{(S_{\max} - S_{n,m,i}) \cdot E_n}{P_{cha,man} \cdot \gamma_{cha}}, t_{man} < t_c - t_s \\ t_c - t_{man}, t_{man} > t_c - t_s \\ t_c - t_{kuai}, t_{kuai} > t_c - t_s \\ \frac{(S_{\max} - S_{n,m,i}) \cdot E_n}{P_{cha,kuai} \cdot \gamma_{cha}}, t_{kuai} < t_c - t_s \end{cases} \quad (8)$$

$$S_{n,m,i+1} = \begin{cases} S_{n,m,i}, S_{n,m,i} \geq S_{\max} \\ 1, t_{man} < t_c - t_s \\ S_{n,m,i} + \frac{(t_c - t_s) \cdot P_{cha,man} \cdot \gamma_{cha}}{E_n}, t_{man} > t_c - t_s \\ S_{n,m,i} + \frac{(t_c - t_s) \cdot P_{cha,kuai} \cdot \gamma_{cha}}{E_n}, t_{kuai} > t_c - t_s \\ 1, t_{kuai} < t_c - t_s \end{cases} \quad (9)$$

式中: $S_{n,m,i+1}$ 为第 n 辆电动汽车在第 m 次出行抵达目的地后所进行的第 $i+1$ 次充电后的电池SOC;

$P_{cha,man}$ 、 $P_{cha,kuai}$ 分别为电动汽车慢充功率与快充功率; t_{man} 、 t_{kuai} 分别为电动汽车进行慢充的充满时间与进行快充的充满时间。快充与慢充的区别在于快充虽然充电速度快,但对电动汽车电池寿命影响较大,所以在保障自身用车行程情况下,应尽量减少快充次数;而慢充充电速度慢,对电动汽车电池寿命影响小,所以在保障自身用车行程情况下,日常充电应尽量使用慢充方法。

2.2 考虑时空分布的空调负荷模型

2.2.1 建筑空调负荷的时空分布

考虑到文中出行链对充电区域的划分,建筑空调可以被分为3类:居民空调、办公空调、工厂空调,分别处于充电区域的居民区、商业区与工业区中。应用在工厂中的中央空调,由于工厂环境的特殊性,空调在工作日将持续运行;应用在办公楼中的中央空调,使用模式以“一进门就开空调,离开时关空调”为主,使用时段集中在白天与傍晚;居民楼内居民开启空调时间一般在中午与傍晚下班回家后,使用模式以“感觉到热时便会开启空调”为主。

2.2.2 建筑空调数学模型的建立

建筑空调属于温控负荷(thermostatically controlled loads, TCLs),一般使用等效热力学模型来模拟建筑内温度的变化过程,如图8所示,其一阶热力学微分方程为:

$$C \frac{dT_{in}}{dt} + \frac{T_{in}}{R} = \begin{cases} Q_{ac} + \frac{T_{out}}{R}, O = 1 \\ \frac{T_{out}}{R}, O = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{ac}(t) = \frac{Q_{ac}}{\eta} \quad (11)$$

式中: T_{in} 、 T_{out} 分别为室内温度及室外温度; Q_{ac} 为空调制冷量; R 为建筑等效热阻; C 为建筑等效热容; O 为空调状态的二进制变量, $O=1$ 时表示空调处于打开状态, $O=0$ 时表示空调处于关闭状态; $P_{ac}(t)$ 为空调电功率; η 为空调热电转换系数。

2.2.3 建筑空调不同参数的取值

1) 热阻。

建筑中,由热均质层组成的建筑构件热阻计算方法^[23]为

$$R_r = \frac{\delta}{\lambda} \quad (12)$$

式中: R_i 为建筑热阻, $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$; δ 为材料厚度, m ; λ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 表征在稳态条件和单位温差作用下, 通过单位厚度、单位面积均质材料的热量。

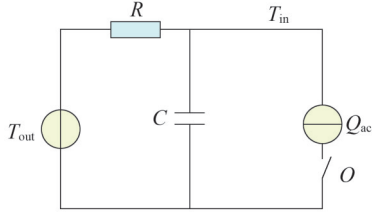


图8 一阶等效热力学模型

Fig.8.First-order equivalent thermodynamic model

根据实际调研结果, 高层住宅及办公楼一般使用钢筋混凝土框架剪力墙结构, 居民楼建筑热阻取值 $R_{r,jun} = N(3, 0.3^2)$, 办公楼建筑热阻取值 $R_{r,ban} = N(3, 0.3^2)$; 对工厂而言, 其建筑层数较低, 外墙主体材料一般是加气混凝土砌块或红砖, 热阻值相对较大, 其建筑热阻取值 $R_{r,chang} = N(5.1, 0.5^2)$ 。

2) 热容。

现有很多国家的标准、规范或指南都强调建筑有效热容的重要性, 然而却并没有给出有效热容在建筑中的具体数值, 同时也没有关于有效热容的具体设计方法。所以, 本文将按照文献[18]与文献[24]中所给热容值进行计算, 即热容取 $47 \text{ kJ}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2)$ 。

3) 能效比。

家用空调可分为单冷式空调与热泵式空调, 其中单冷式空调仅具备制冷功能, 热泵式空调同时具备制热与制冷两种功能。根据文献[25]显示, 我国北方城镇地区的居民楼在冬季大都由集中供热系统进行供暖。因此, 北方居民在冬天几乎不会使用空调, 可将居民室内空调全部认定为单冷式空调。

我国北方的办公建筑冬天需要的供暖热量与夏天需要空调排出的热量基本接近, 因此其大多采用集中空调供热手段。将办公楼与工厂内空调认定为热泵式空调。各建筑内空调具体能效比由文献[26–28]获得。

3 异构柔性负荷时空分布计算

建立各个模型后, 图9给出异构柔性充电负荷时空分布具体计算流程。

对电动汽车及建筑空调的充电条件做如下设定。

3.1 电动汽车

电动私家车。在私家车抵达目的地后, 若其剩余电量满足充电条件, 且进行慢充后可以支持下一次行程的能耗, 可依据车主自身充电偏好对电动汽车进行慢充处理, 并在下一次出行之前结束充电; 若慢充无法满足下一次行程需求, 则进行快充处理。

电动公交车。电动公交车出行的时间与地点较为固定, 且在起讫站都建有快充桩以供电动公交车使用。当公交车抵达起讫站后, 若其剩余电量满足充电条件, 则公交车司机会利用休息时间进行快充处理, 休息时间一般为 $15 \sim 20 \text{ min}$ 。在夜晚电动公交车收车后, 为保持电池寿命, 所有公交车进行慢充, 直至第二天出车时刻。

3.2 建筑空调

由于空调负荷具备一定的热储备能力, 可将其等效为虚拟储能。在空调处于制冷过程中, 稳态时, 空调制冷量等于建筑对外界的传热量, 空调电功率计算如式(13)所示。

$$P_{ac,0}(t) = \frac{T_{out} - T_{in}}{\eta \cdot R} \quad (13)$$

动态时, 空调电功率计算如式(14)所示。

$$P_{ac,s}(t) = \begin{cases} 0, & T_{in} > T_{set} \\ P_{rate}, & T_{in} < T_{set} \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_{rate} 为空调额定功率; T_{set} 为空调设定温度。

式(13)和(14)表示建筑空调在制冷时会以3种模式运行: 当室内温度 T_{in} 大于空调设定温度 T_{set} 时, 空调不工作, 功率为0; 当室内温度 T_{in} 小于空调设定温度 T_{set} 时, 空调以额定功率 P_{rate} 运行; 当室内温度 T_{in} 等于空调设定温度 T_{set} 时, 空调以稳态功率 $P_{ac,0}$ 运行。

当空调处于制热过程中, 稳态时, 空调制热量等于外界对建筑的传热量, 空调电功率计算如式(15)所示。

$$P_{ac,0}(t) = \frac{T_{in} - T_{out}}{\eta \cdot R} \quad (15)$$

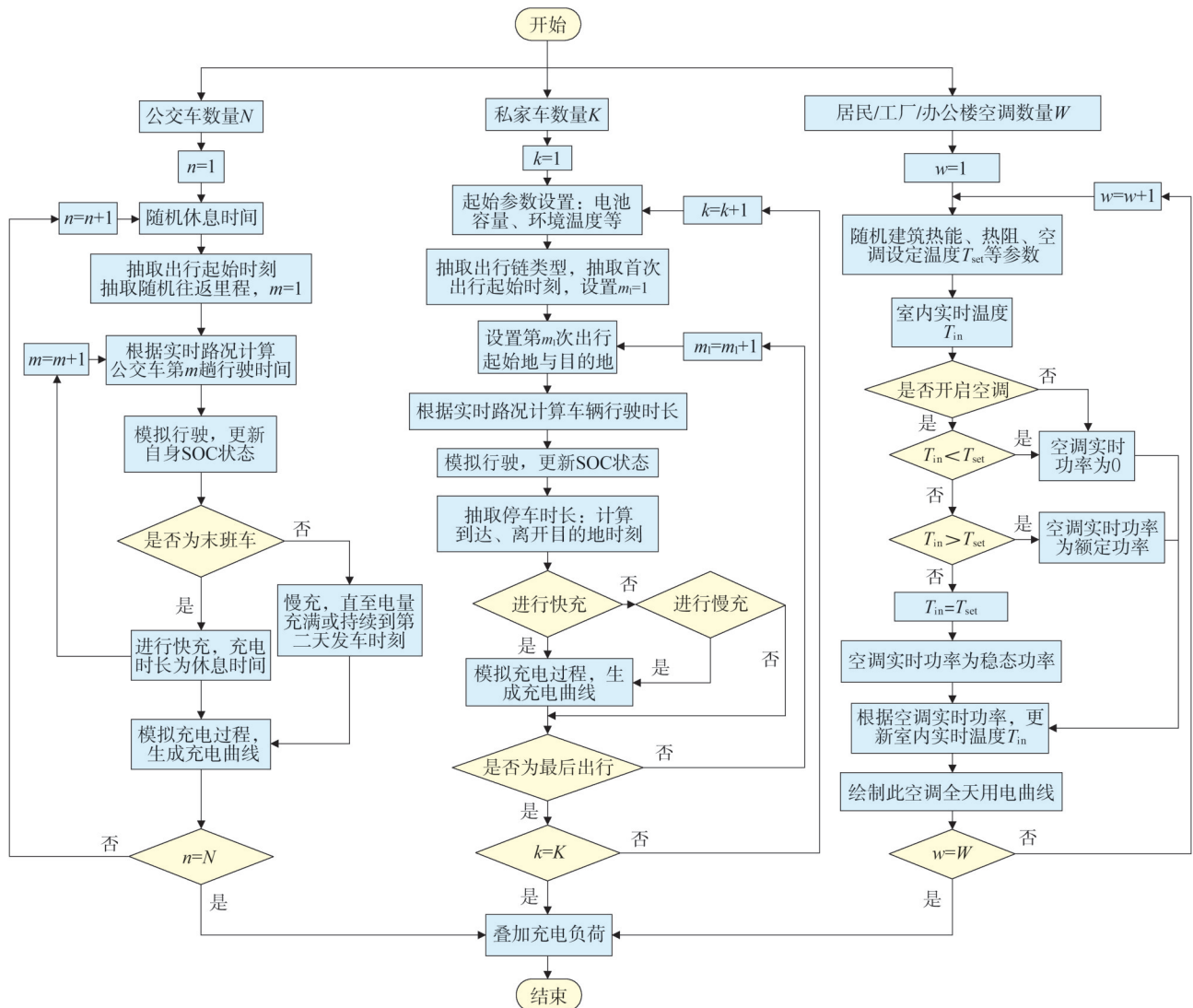


图9 充电负荷时空分布计算流程图

Fig.9 Flow chart of spatiotemporal distribution calculation of charging load

动态时,空调电功率计算如式(16)所示。

$$P_{ac_s}(t) = \begin{cases} 0, & T_{in} > T_{set} \\ P_{rate}, & T_{in} < T_{set} \end{cases} \quad (16)$$

4 算例与结果

4.1 交通网络

以太原市城区主要交通道路与充电区域划分为例,考虑路网中主要道路,抽象为如图10所示的含73个节点的交通网络图,图中蓝色部分为河流。不同功能区的节点如表5所示。

由于文中还考虑到电动公交车的充电负荷,经过对太原市中各个公交停车场的调研,将节点2、3、

11、25、26、39、48、56、71、73作为各个电动公交车的充电节点。

此外,为体现电动私家车用户在行驶中空间移动的随机性,对图中各个节点路径采用最短路径模拟Dijkstra算法,模拟电动汽车行驶过程。各节点之间距离皆为实测数据。

4.2 参数设置

4.2.1 电动汽车参数设置

根据《太原市国土空间总体规划(2021—2035年)》及《节能与新能源汽车技术路线图2.0》描述,到2035年,太原城镇人口将达到670万人,电动私家车数量预计达到80万辆,电动公交车数量将达到1万

台左右。太原市内电动汽车参数如表 6 所示。其中,不同额定电池容量对应的电动私家车,其每公里耗电量(不考虑温度与路况)会有所变化,如式(17)所示。

$$\begin{cases} \omega = 0.1, & 40 \leq E_n \leq 50 \\ \omega = 0.12, & 50 \leq E_n \leq 60 \\ \omega = 0.14, & 60 \leq E_n \leq 75 \end{cases} \quad (17)$$

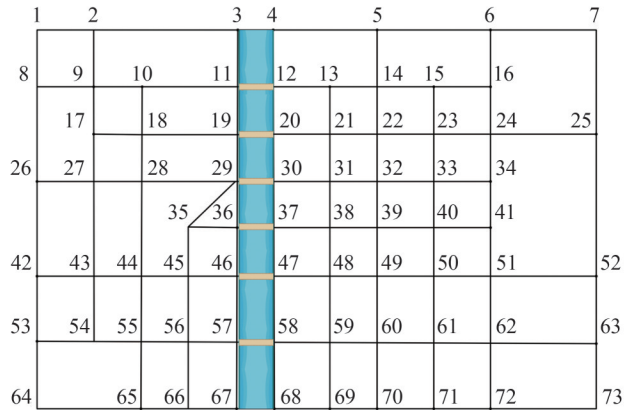


图 10 太原市城区交通网络图

Fig.10 Diagram of urban transportation network in Taiyuan City

表 5 不同功能区节点

Table 5 Different functional area nodes

居民区	工作区		娱乐休闲区
	工业区	商业区	
2/3/5/6/7/8/10/13/15/ 24/25/27/35/37/40/41/ 42/44/47/49/51/53/54/ 57/59/61/62/63/65/66/ 69/73	1/17/ 18/26/ 52/64	14/16/21/23/28/ 31/32/34/36/39/ 45/46/50/55/56/ 60/68/52/70/ 72/48	4/9/11/12/19/ 20/22/29/30/ 33/38/43/ 58/67

4.2.2 建筑空调参数设置

根据 2022 中国统计年鉴及第七次人口普查数据,2021 年太原市家庭户达到 185 万户,每百户家庭空调拥有量为 40 台。预计到 2035 年,全太原市空调数量总和为 90 万台,其中居民空调 48 万台,办公楼空调 39 万台,工厂空调 3 万台。

基于文中对空调影响因素的分析与某地配电网实际数据,不同种类空调参数如表 7 所示。本文中四季气温选择近几年最接近不同季节平均气温的典

型周,交通路况为典型周当日的实时路况。

表 6 电动汽车参数

Table 6 Parameters of electric vehicles

参数	电动私家车数值	电动公交车数值
额定电池容量/kWh	40~75	324
SOC 上限	0.8	1
SOC 下限	0.3	0.3
快充功率/kW	60/100/120	120
慢充功率/kW	7	20
充电效率	0.95	0.95
每公里耗电量/kW	0.1/0.12/0.14	1
起始 SOC 状态	0.7~0.9	1
发车时间		05:30—06:30
线路里程/km		13~17

表 7 建筑空调参数

Table 7 Building air conditioning parameters

参数	居民楼	办公楼	工厂
热阻/(℃/kW)	$N(3, 0.3^2)$	$N(3, 0.3^2)$	$N(5.1, 0.5^2)$
热容/kJ/(℃·m ²)	$N(690, 10^2)$	$N(690, 10^2)$	$N(2\ 600, 30^2)$
额定制冷量/kW	2.2~4.5	3~5	7.1~17
空调设定温度/℃(夏)	24~28	24~28	20~23
空调设定温度/℃(冬)		18~24	18~22

4.3 电动汽车与建筑空调负荷模态

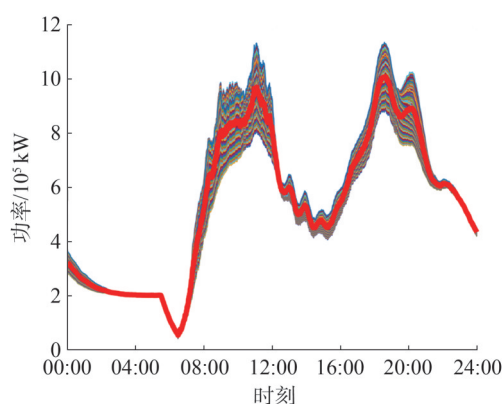
1) 电动汽车负荷模态。

在电动汽车充电概率随机的情况下,不同季节的电动汽车充电负荷模态变化趋势相似,以春秋季节为例进行仿真,如图 11 所示。

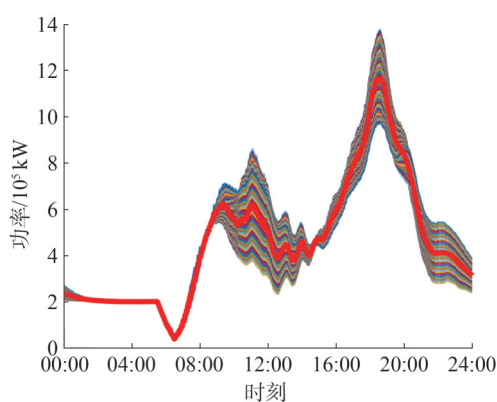
仿真结果表明,电动汽车负荷全天会出现 1~2 个负荷峰值,主要原因有两点,一是私家车用户上午在工作单位或夜间回家进行充电;二是随着电动公交车运营时间的增加及动力电池电量的快速下降,越来越多的公交车选择在休息时刻进行快充处理,选择充电的公交车数量越多,负荷峰值越高。

2) 建筑空调负荷模态。

由于春秋季节温度适宜,大部分建筑空调不会开启,所以只考虑夏冬季的空调负荷。



(a) 春秋季电动汽车负荷1



(b) 春秋季电动汽车负荷2

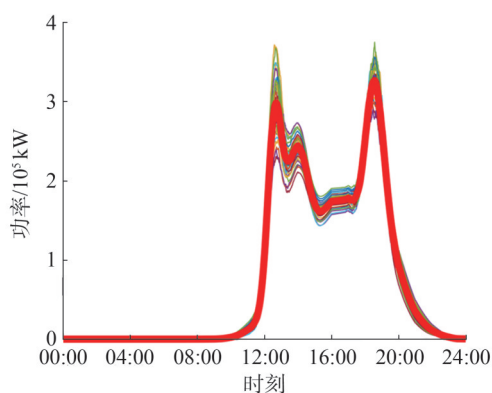
图11 春秋季电动汽车负荷模式

Fig.11 Load modes of electric vehicles in spring and autumn

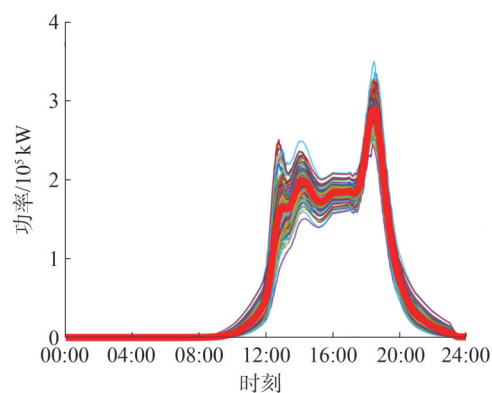
夏冬季空调负荷模式如图12所示。

图12(a)和图12(b)为夏季空调负荷,仿真结果表明,夏季建筑空调负荷全天会出现一到两个峰值,分别位于12:00—13:00与18:30—19:30。图12(b)相较图12(a)而言,在12:00—13:00并未出现一个相对尖锐的峰值,主要原因是因为室外温度或空调设定温度变化影响。图12(b)中居民在回家开启空调时,空调设定温度不低于室内温度,使得空调以额定功率运行的时间很短或直接以稳态功率运行。这导致该曲线第一个峰值区域较为平坦。

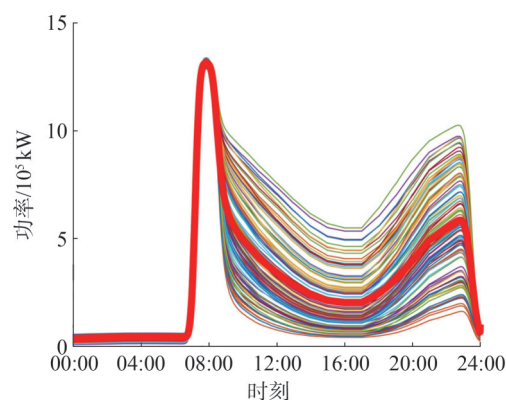
图12(c)为冬季空调负荷,负荷曲线峰值一般出现在07:30—08:30,主要受办公楼开启空调时间影响。这是由于清晨室外温度过低,同时空调制热能效比远小于制冷能效比,导致在开启办公楼空调后,空调负荷急剧升高,最终在08:00左右形成负荷峰值。



(a) 夏季空调负荷1



(b) 夏季空调负荷2



(c) 冬季空调负荷

图12 夏冬季建筑空调负荷模式

Fig.12 Load modes of building air conditioning in summer and winter

从图11、图12可知,不同情景将导致不同的电力需求分布形式,且夏、冬季的负荷模式呈现出较为明显的互补形式。

4.4 不同影响因子下异构柔性负荷曲线

1) 不同季节下电动汽车负荷曲线变化。

当电动汽车用户进行随机充电且充电概率为

50%时,在不同季节工作日的负荷曲线如图13所示。图中春秋季节日期选择2024年10月15日00:00至10月22日00:00;夏季日期选择2024年7月5日00:00至7月12日00:00;冬季日期选择2024年1月22日00:00至1月29日00:00。

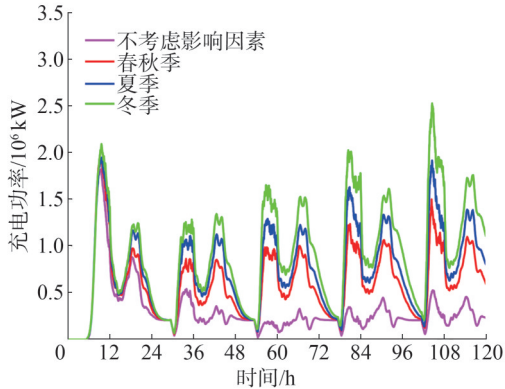


图13 不同工作日内电动汽车充电负荷
Fig.13 Charging load of EV under different working days

从图13可以看出,在考虑到温度与路况后,电动私家车的充电需求向上午及傍晚时刻转移。且随着时间的推移,其充电负荷需求偏差越大。在工作日第5天,峰值负荷的差异最高为412%,证实了在电动汽车模型中考虑温度与交通状况的必要性。

根据图中不同季节下电动汽车充电负荷的对比,4个季节中冬季的充电负荷需求最大,春秋季需求最小。这是由于春秋季节天气适宜,用户开车过程中开启空调概率小,而冬季天气严寒,导致空调的使用频率和能耗较高的缘故。

2)不同充电偏好下电动汽车负荷曲线变化。

当电动汽车用户的充电偏好不同时,电动汽车负荷在夏季工作日的负荷曲线如图14所示,其夏季日期选择与图13一致。

由图14可以看出,电动汽车进行保守充电时,工作日第5天的夏季日负荷为1140.54 GW,电动汽车进行随机充电时,日负荷为1480.21 GW,相较保守充电增长了29.39%;峰值时间由18:41变为08:23;峰值负荷由621.42 MW增长到1826.55 MW,增长了193.93%。

所以,用户的充电偏好会改变峰值时间与峰值负荷。当用户更偏向于主动充电时,其日负荷量更

高,负荷峰值出现时间更早,负荷波动更加明显。

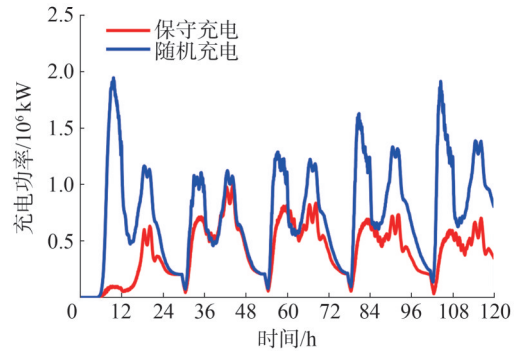


图14 不同充电偏好下电动汽车充电负荷
Fig.14 Charging load of EV under different charging preferences

3)不同功能区域下异构柔性负荷曲线变化不同节点所含的异构柔性负荷数量如表8所示。表中除居民区私家车数量为确定值外,其他功能区域的私家车数量皆为随机值。

表8 不同节点异构柔性负荷数量

Table 8 Number of heterogeneous flexible loads at different nodes

功能区	节点	私家车/辆	公交车/辆	空调/台
居民区	2	20 000	800	15 000
	5	16 000	0	18 000
工业区	1		0	8 000
	14		0	14 000
商业区	56		1 000	16 000
娱乐休闲区	4		0	0

以夏季为例,则不同功能区域下的部分节点一天的负荷波动情况如图15所示。

图15是不同节点下的充电负荷日变化情况,对不同功能区域的节点而言,其各自的异构柔性负荷曲线具有不同的特点,充电位置的变动会影响日充电负荷的大小、时间与形状。在具备电动公交车停保场的节点,由于电动公交车的充电特性,其负荷曲线呈波浪状缓慢上升(节点2)或保持波动(节点56)。

通过以上观察分析,可知在同一地区,若存在公

交车充电节点,则该地区充电负荷波动性较大;当电动私家车与建筑空调数量接近时,该地区负荷曲线更接近电动私家车,说明电动私家车具有远高于建筑空调的调节潜力。

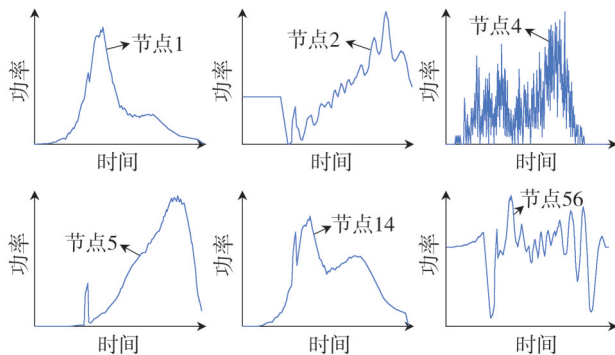


图15 不同节点的负荷波动情况

Fig.15 Load fluctuations of different nodes

5 结论

考虑到异构柔性负荷的时空分布特性,提出了一种考虑不同功能异构柔性负荷用电区域的用电功率预测方法,并在不同工况下对其负荷模态进行研究,通过算例仿真,得到如下结论:

1)通过对路网模型的建立,异构柔性负荷具有明显的区域分布特性,不同功能区用电负荷存在明显差异,且各节点负荷高峰时刻与电动汽车用户活动规律相似,表明电动汽车具有远高于建筑空调的调节潜力。当电力系统进行削峰填谷时,可利用这一特性,优先调用调节潜力大的负荷资源,尽快完成预计目标,保持电力系统的稳定性。

2)异构柔性负荷具有季节特性,其变化受外界温度、用户充电偏好的影响较大,环境温度过低或过高都会导致柔性负荷高峰时间增多,在计算调控时需重点考虑。为了尽可能保持充电负荷的平稳,电网可以通过制定分时电价等政策来改变用户的充电偏好,使其更偏向于保守充电,减小系统负荷峰谷差,起到削峰填谷的作用。

3)夏季,电动汽车负荷与建筑空调负荷具有较强的互补特性。冬季,电动汽车负荷与建筑空调负荷用电时间高度重合,尤其是在清晨上班时间与夜间下班时间,二者叠加会导致电力系统波动更加剧烈。所以,电力系统需加强柔性负荷管理,通过需求

响应等手段合理规划二者响应时间,达到供需平衡的目的。

参考文献

- [1] 林楚.2023年上半年我国电力供需形势总体平衡[N].机电商报,2023-08-07(A07).
- [2] 张蕴.中国光伏装机规模连续10年位居全球第一[N].科技日报,2023-07-24(001).
- [3] 任大伟,侯金鸣,肖晋宇,等.支撑双碳目标的新型储能发展潜力及路径研究[J].中国电力,2023,56(8):17-25.
REN Dawei, HOU Jinming, XIAO Jinyu, et al. Research on development potential and path of new energy storage supporting carbon peak and carbon neutrality [J]. Electric Power, 2023, 56 (8):17-25.
- [4] 于凤娇,王典,李润宇.计及需求侧响应的分布式电源并网优化策略[J].东北电力大学学报,2022,42(2):92-103.
YU Fengjiao, WANG Dian, LI Runyu. Optimization strategy for grid connection of distributed generation considering demand side response [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(2):92-103.
- [5] 唐黄正,朱志伟.智能电网对于现代电力系统的需求与响应研究[J].科技资讯,2022,20(19):61-64.
TANG Huangzheng, ZHU Zhiwei. Research on the demand and response of smart grid to modern power system [J]. Science & Technology Information, 2022, 20(19):61-64.
- [6] 许春蕾.以消纳风电为目标的需求侧负荷响应控制策略[D].北京:华北电力大学,2020.
- [7] ALIZADEH M, SCAGLIONE A, APPLEBAUM A, et al. Reduced-order load models for large populations of flexible appliances [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4):1758-1774.
- [8] 任明远,姜明军,宋玉峰,等.基于蒙特卡洛法的城市电动汽车充电负荷预测[J].电气应用,2023,42(4):18-23.
REN Mingyuan, JIANG Mingjun, SONG Yufeng, et al. Research on charging load forecasting of urban electric vehicle based on Monte Carlo method [J]. Electrotechnical Application, 2023, 42 (4): 18-23.
- [9] 李楠,马宏忠.基于综合预测模型和蒙特卡洛的电动汽车保有量及负荷预测方法研究[J].电机与控制应用,2022,49(12):74-80.
LI Nan, MA Hongzhong. Research on electric vehicle ownership and load prediction method based on comprehensive prediction model and Monte Carlo [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(12):74-80.
- [10] 臧海祥,舒宇心,傅雨婷,等.考虑多需求场景的城市电动汽车充电站多目标规划[J].电力系统保护与控制,2021,49(5):67-80.
ZANG Haixiang, SHU Yuxin, FU Yuting, et al. Multi-objective

- planning of an urban electric vehicle charging station considering multi demand scenarios[J].Power System Protection and Control, 2021,49(5):67-80.
- [11] 王娟,陈明,支刚,等.电动汽车充电负荷的蒙特卡洛预测方法[J].云南电力技术,2024,52(4):10-14.
WANG Juan, CHEN Ming, ZHI Gang, et al. Monte Carlo prediction method for electric vehicle charging loads [J]. Yunnan Electric Power, 2024, 52(4): 10-14.
- [12] 李娇,杨伟.考虑出行路径决策的电动汽车充电负荷时空预测方法[J].电力电容器与无功补偿,2023,44(4):62-71.
LI Jiao, YANG Wei. Spatial-temporal forecast method of electric vehicles charging load considering decision-making of trip path [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(4): 62-71.
- [13] 张谦,王众,谭维玉,等.基于MDP随机路径模拟的电动汽车充电负荷时空分布预测[J].电力系统自动化,2018,42(20):59-66.
ZHANG Qian, WANG Zhong, TAN Weiyu, et al. Spatial-temporal distribution prediction of charging load for electric vehicle based on MDP random path simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 59-66.
- [14] 刘珂嘉,李玉梅,孙满晶.基于多源信息的电动汽车充电负荷预测[J].机电信息,2023(15):1-5.
LIU Kejia, LI Yumei, SUN Manjing. Electric vehicle charging load forecasting based on multi-source information[J]. Mechanical and Electrical Information, 2023(15): 1-5.
- [15] 吴赋章,杨军,林洋佳,等.考虑用户有限理性的电动汽车时空行为特性[J].电工技术学报,2020,35(7):1563-1574.
WU Fuzhang, YANG Jun, LIN Yangjia, et al. Research on spatiotemporal behavior of electric vehicles considering the users' bounded rationality [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1563-1574.
- [16] ZHANG M, BAO Y Q. Voltage control strategy for distribution network with thermostatically controlled loads equivalent energy storage model considering minimum-on-off time [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 133: 107268.
- [17] SONG Y G, CHEN F J, XIA M C, et al. The interactive dispatch strategy for thermostatically controlled loads based on the source-load collaborative evolution [J]. Applied Energy, 2022, 309: 118395.
- [18] 王怡岚,童亦斌,黄梅,等.基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J].电网技术,2017,41(2):394-401.
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response [J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394-401.
- [19] 郭旭歆,高赐威,王朝亮,等.基于中央空调虚拟储能模型的调峰策略研究[J].电力需求侧管理,2022,24(4):42-46.
GUO Xuxin, GAO Ciwei, WANG Chaoliang, et al. Peak adjustment strategy based on central air conditioning virtual energy storage model [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 42-46.
- [20] 汪希玥,徐箭,廖思阳,等.考虑虚拟储能特性的柔性负荷调控裕度评估方法[J].华电技术,2021,43(9):37-45.
WANG Xiyue, XU Jian, LIAO Siyang, et al. Flexible load regulation margin evaluation method considering virtual energy storage characteristics [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 37-45.
- [21] 黄博,胡博,谢开贵,等.计及交通事故影响的电动汽车路径规划和充电导航策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(19):47-59.
HUANG Bo, HU bo, XIE Kaigui, et al. Electric vehicle path planning and charging navigation strategies considering the impact of traffic accidents [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 47-59.
- [22] 全国人类工效学标准化技术委员会.热环境的人类工效学 通过计算PMV和PPD指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释:GB/T 18049—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [23] 全国绝热材料标准化技术委员会.建筑构件和建筑单元 热阻和传热系数 计算方法:GB/T 20311—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [24] 卢一杭.建筑有效热容动态预测模型及其在典型热过程中的应用分析[D].上海:东华大学,2022.
- [25] 周文静.北方地区办公建筑固体电蓄热采暖应用研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [27] 徐伟,邹瑜,陈曦,等.国家标准《公共建筑节能设计标准》GB50189—2015[J].建设科技,2018(16):39-45.
XU Wei, ZOU Yu, CHEN Xi, et al. National standard "design standard for energy efficiency of public building" GB50189—2015 [J]. Construction Science and Technology, 2018(16): 39-45.
- [28] 中国机械工业勘察设计协会.机械工业厂房建筑设计规范:GB 50681—2011[S].北京:中国计划出版社,2012.

收稿日期:2024-07-18

修回日期:2024-12-20

作者简介:

温志鹏(1998),男,工学硕士,主要研究方向为柔性电力负荷建模与应用;

宋显锦(1971),通信作者(3105237094@qq.com),男,工学博士,副教授,从事电工理论与新技术和无线电能传输及应用研究;

杨冰(1987),男,工学博士,高级工程师,从事高比例可再生能源电力系统柔性调节技术研究。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.07.002

基于深度确定性策略梯度算法的乡村光-沼虚拟电厂 低碳调度方法

王琛*, 孙哲夫, 张自伟

(国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222000)

摘要:我国乡村地区生物质能产出与分布式光伏发电已经成为乡村能源结构中重要的组成部分,如何因地制宜发展乡村生物质资源,紧密贴合乡村自然条件、资源禀赋以及实际用能需求,拔高乡村光-沼耦合利用能效是亟待解决的问题。基于提升乡村地区光-沼虚拟电厂的低碳经济性运行需求,首先,给出沼气能源系统动力学量化模型,建立沼气能源系统耦合分布式光伏发电系统的动态模型;考虑乡村地区沼气能源系统和光伏机组出力的多重不确定性,建立光-沼能源供能主体不确定性集合;考虑光-沼虚拟电厂低碳运行成本,以日前调度为基础,提出基于深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient, DDPG)算法的两阶段低碳调度方法,以虚拟电厂低碳运行成本和调度成本最小为优化目标,对乡村地区光-沼虚拟电厂中的分布式光伏及沼气资源的整合利用方案进行修正。最后,通过算例结果验证所提光-沼虚拟电厂低碳调度方法的合理性和有效性。

关键词:低碳调度;光-沼耦合;虚拟电厂;数据驱动;多重不确定性

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)07-0014-13

Low-carbon Dispatching Method for Rural PV-biogas Virtual Power Plant Based on the Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm

WANG Chen*, SUN Zhefu, ZHANG Ziwei

(State Grid Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222000, China)

Abstract: The biomass energy production and distributed photovoltaic (PV) power generation in rural areas of China have emerged as vital components of the rural energy structure. How to develop rural biomass resources according to local conditions, closely fit the natural conditions, resource endowments, and actual energy needs of rural areas, and improve the energy efficiency of rural PV-biogas coupling utilization is an urgent problem to be solved. In this paper, firstly, the dynamic quantitative modeling of biogas energy system is carried out, a dynamic model of biogas energy system coupled with distributed PV power generation system is established based on improving the low-carbon economic operation demand of PV-biogas virtual power plant in rural areas. Considering the multiple uncertainties of biogas energy system and photovoltaic unit output in rural areas, an uncertainty set is established for PV-biogas energy supply entities. Furthermore, considering the low-carbon operation cost of the PV-biogas virtual power plant, based on the day-ahead scheduling, a data-driven real-time scheduling method based on the deep deterministic policy gradient (DDPG) algorithm is proposed. With the minimum low-carbon operation cost and scheduling cost of the virtual power plant as the optimization goal, the centralized and distributed PV and biogas resources in the PV-biogas virtual power plant in rural areas are integrated. Finally, the rationality and effectiveness of the proposed low-carbon scheduling method for PV-biogas virtual power plant are verified by the example results.

Keywords: low carbon scheduling; PV-biogas coupling; virtual power plant; data-driven; multiple uncertainties

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023168)。
Science and Technology Foundation of State Grid Jiangsu Electric Power Company (J2023168)。

0 引言

近年来,随着分布式可再生能源在乡村地区不

断普及,其间歇性和不确定性对电力系统的安全稳定运行和经济性带来新的挑战^[1]。我国乡村地区需求侧的分布式资源十分丰富^[2],分布式光伏及配套储能设备、数据管理等分布式资源虽可以利用其柔性调节潜力为电网提供辅助调节服务^[2-3],但由于单独模块体量较小、位置分散,难以接受上级电网主管单位的直接调度,因此,乡村地区分布式发电资源的调节潜力无法得到合理、有效的利用。对需求侧分布式资源的聚合从而实现集中调度越来越受到关注。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)可以整合大规模的分布式资源并进行集中调度^[4],实现资源的合理优化配置及利用。

随着“双碳”目标的提出,对新型电力系统中分布式能源、储能系统、可控型负荷等多种资源的整合及协调优化管理提出了新的要求,在此背景下,虚拟电厂将发挥更大的作用^[5]。在碳交易市场方面,文献[6]提出基于碳市场风险的虚拟电厂低碳调度策略,并构建了碳市场的次日碳价预测模型。文献[7]提出阶梯式碳价的区间优化方法,构建了一种基于阶梯式碳价的多虚拟电厂联合优化运行模型。文献[8]基于虚拟电厂内部多种不确定性因素,考虑碳-电交易耦合性,提出了计及碳减排贡献因素的虚拟电厂联盟收益分配方法。文献[9]构建含有新型双碳量模型的虚拟电厂日前-实时双阶段低碳经济调度模型。文献[10]引入储能“荷碳率”概念和调度环节内碳排放守恒原则,建立了扩展碳排放流模型,并建立以碳为主导的园区内定价机制。然而,上述研究较单一地从荷侧碳排放视角开展研究,忽略了虚拟电厂对源侧与荷侧的实质调控能力。

虚拟电厂作为负荷侧分布式资源的调控平台,对区域分散资源的整合、协调能力十分重要。文献[11]提出一种在多重不确定性环境下考虑阶梯型碳交易的 VPP 低碳经济调度模型,构建了风电-碳捕集虚拟电厂,将出力间歇且波动的风电机组和碳捕集机组整合,以实现内部低碳协同优化。文献[12]提出基于风光不确定性的电气互联虚拟电厂的调度优化模型,在实现分布式能源互补利用的同时验证了虚拟电厂近零碳运营方案可行性。文献[13]构建虚拟电厂精细化需求响应模型,利用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络计算需求响应

效益系数,将精细化需求响应模型与虚拟电厂优化调度模型相结合。文献[14]设计了基于可调空间统一建模的分层深度强化学习分层算法,实现 VPP 的实时经济调度。文献[15]考虑一种将备份小容量电池储能系统参与频率调节市场,并给出了基于 VPP 的聚合策略。

在虚拟电厂低碳经济调度策略方面。文献[16]考虑虚拟电厂的经济性和低碳性运营问题,提出了基于阶梯碳交易的电转气虚拟电厂低碳经济调度模型。文献[17]考虑条件风险价值评估风险,提出了一种考虑碳-绿证交易机制的虚拟电厂分布鲁棒低碳经济调度策略。文献[18]考虑系统源荷两侧低碳匹配问题,提出了一种考虑充放电策略的换电站与风电-碳捕集虚拟电厂协调低碳调度方法。文献[19]提出考虑变热价-综合需求响应的虚拟电厂优化调度模型,建立了一种包含多种负荷类型的综合需求响应结构。文献[20]考虑可再生能源不确定性和灵活性,针对市场输电系统运营商(transmission system operator, TSO)和配电系统运营商(distribution system operator, DSO)之间不协调问题,提出了一种考虑 TSO-DSO 协调的虚拟电厂最优市场参与模型。文献[21]设计一种基于农村虚拟电厂的电力零售新模式(virtual power plant-based electricity retailers, VPP-ER),提出了考虑电-碳协同优化的 VPP-ER 双层购销交易模型。上述文献研究了 VPP 内部分布式资源的协调问题,但是大多未考虑多元能源不确定性下的 VPP 供能可靠性问题,尤其是在分布式可再生能源集中的乡村地区,乡村源侧及荷侧分布式资源的供能支撑潜力尚未得到充分发挥,如何因地制宜发展乡村地区沼气资源,提高乡村地区光-沼耦合利用能效是亟待解决的问题。

乡村地区沼气和光伏资源受到自然因素的影响,其出力存在间歇性、季节性及随机性等特点,导致区域系统功率频繁波动,难以保障用户用能的稳定性和安全性^[22]。因此,合理的光-沼能源调度手段,在最大化区域内清洁能源利用的同时,提高虚拟电厂供能稳定能力十分必要^[23]。基于提升乡村地区光-沼虚拟电厂的低碳经济性运行能力需求,建立沼气能源系统耦合分布式光伏发电系统的动态模型,探究光-沼能源供能主体柔性能源产出形式。考

虑光-沼虚拟电厂运行成本,以日前调度为基础,提出基于深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient,DDPG)算法的数据驱动实时调度方法,以虚拟电厂低碳运行成本和非可再生能源调度成本最小为优化目标,对乡村光-沼虚拟电厂中的集中式及分布式光伏及沼气资源的整合利用方案进行自适应修正,以解决乡村地区光伏和沼气资源的多重不确定性,导致的源荷运行不匹配、不稳定的问题。最后,通过算例验证所提光-沼虚拟电厂低碳调度方法的有效性。

1 乡村光-沼虚拟电厂

针对乡村地区分布式光伏、生物质能的资源禀赋的特点,通过挖掘沼气产出核心能量传输模型,研究乡村生物质能与分布式光伏的能量深度协同机理,将分布式资源进行充分整合^[24]。

基于乡村能源实际发展应用情况,建立的光-沼虚拟电厂包含沼气能源系统模块(biomass energy system, Bio-ES)、热锅炉(heat boil, HB)、分布式光伏模块(distributed photovoltaic, D-PV)、集中式光伏模块(centralized photovoltaic, C-PV)、蓄电池储能模块(energy storage system, ESS),集中式热储能模块(centralized thermal energy storage, C-HES)、分布式储热模块(distributed thermal energy storage, D-HES)。光-沼虚拟电厂中沼气能源系统、集中式及

分布式光伏机组、外部电网供应用户电负荷需求,沼气发电系统电热联产热能输出、外部热网供应用户热负荷需求。其中,热能传输网络中含有集中式及分布式热储能模块,集中式及分布式光伏机组配有电储能模块。建立的基于数据驱动的光-沼虚拟电厂如图1所示。

1.1 Bio-ES 动力学量化模型

Bio-ES 燃沼发电、厌氧发酵制沼与物料投放等环节可抽象为统一模块建模。沼气燃气轮机的输气速率由厌氧发酵产气速率决定,表示为

$$v_{tr,t} = \mu_{tr} v_{s,t} \quad (1)$$

式中: μ_{tr} 为线性比例系数; $v_{tr,t}$ 为采样时刻 t 处输气速率; $v_{s,t}$ 为采样时刻 t 处底物平均降解速度,即产气速率。

沼气能源系统燃沼发电、产热环节中输气管道内气体流动的热动力学模型可通过质量守恒方程和动量守恒方程进行描述,可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial p_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_{tr}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \rho_g v_{tr}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_{tr}^2}{\partial z} + \frac{\partial p_g}{\partial z} + s \rho_g \sin \varphi + \frac{\lambda \rho_g v_{tr}^2}{2D_g} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_{tr} 为输气速率的拟合函数; p_g 为发电机组出力函数; ρ_g 为气体密度; D_g 为数值参数; φ 为拟合参数相角; λ 和 s 为参数; z 为拟合函数自变量。

将气体流速代入气体质量方程,可得到完整的

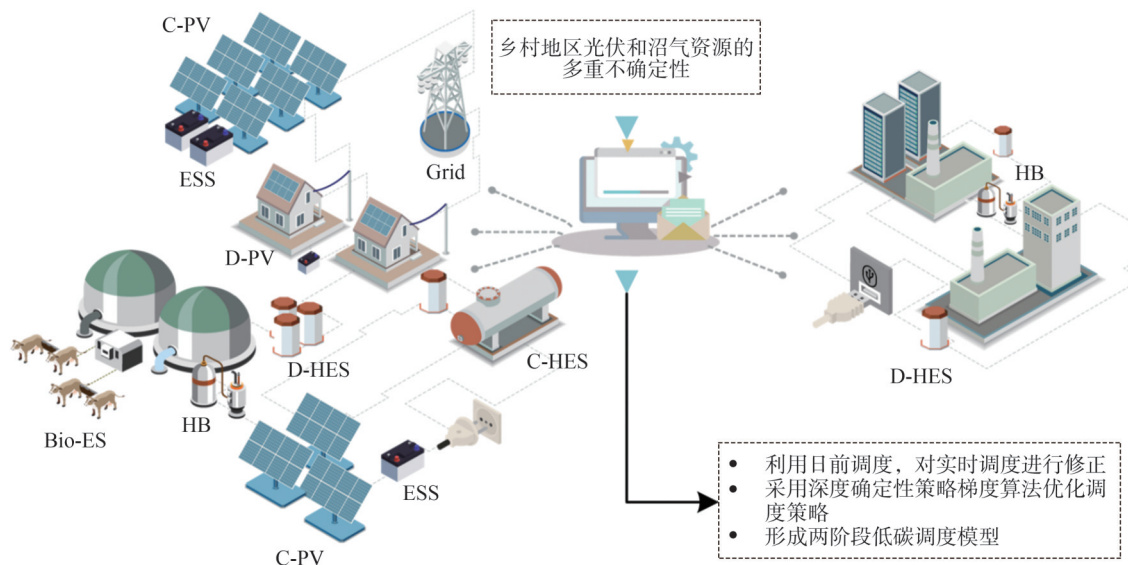


图1 乡村光-沼虚拟电厂架构示意图

Fig.1 Rural PV-biogas virtual power plant architecture schematic diagram

沼气能源系统的热力传输模型为

$$\begin{cases} m_g = \rho_g v_{tr} A_g \\ A_g \frac{\partial p_g}{\partial t} + RT_g \frac{\partial m_g}{\partial z} = 0 \\ \frac{1}{A_g} \frac{\partial m_g}{\partial t} + \frac{\partial p_g}{\partial z} + \frac{\lambda \rho_g v_{tr}}{2D_g} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: m_g 为单位时间输气管道输气流量; A_g 为输气管道横截面积; R 为转换系数; T_g 为输气管道传输热量函数。

沼气能源系统内的热传导方程可写为

$$\begin{cases} h_g = c_g m_g T_g \\ \frac{\partial T_g}{\partial z} = -\frac{\lambda_g}{c_g^2 m_g^2} h_g^2 - \frac{\rho_g A_g}{c_g m_g^2} \frac{\partial h_g}{\partial t} \\ \frac{\partial h_g}{\partial z} = -\lambda_g T_g - c_g \rho_g A_g \frac{\partial T_g}{\partial t} \end{cases} \quad (4)$$

式中: h_g 为单位时间热传导量; c_g 为导热系数。

基于广义相量建模方法理论,沼气能源系统内的电能传输模型可采用同样的建模原理,将电力线路等效为热力学网络模型,则沼气能源系统电能传输模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial z} = -\alpha_1 \zeta - \beta_1 \frac{\partial \zeta}{\partial t} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial z} = -\alpha_2 \psi - \beta_2 \frac{\partial \psi}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 为管道特性相关数值参数; ψ, ζ 为传输模型端口拟合函数。

通过傅里叶变换消除时间导数,并利用两端口等效性消除空间导数,建立两端的广义量和集约量之间的代数关系为

$$\begin{bmatrix} \psi \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_0 \\ \zeta_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: ψ_0, ζ_0 为传输模型端口基础值; A, B, C, D 为传输矩阵参数。

进而将沼气能源系统电能传输模型方程逆转为时域函数,表示为

$$\begin{cases} \psi(t) = \sum_{n=1}^{N_g} \text{Re}(\psi_n) \cos(\omega_n t) - \text{Im}(\psi_n) \sin(\omega_n t) \\ \zeta(t) = \sum_{n=1}^{N_g} \text{Re}(\psi_n) \sin(\omega_n t) - \text{Im}(\psi_n) \cos(\omega_n t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: N_g 为沼气燃气轮机机组数; $\text{Re}(\cdot)$ 为数值实部; $\text{Im}(\cdot)$ 为数值虚部; ω_n 为第 n 个机组角频率; ψ_n 、

ζ_n 分别为第 n 个机组传输模型的两个端口值。

基于沼气能源系统电力网络和热力网络的双端口等效在与上述电网络、热网络模型中,考虑将沼气能源系统燃气轮机的灵活性定义为在时间范围内的所有容许功率分布集合,共同构成实时调度中的不确定模糊集合。

可得,沼气能源系统出力不确定模糊集合为

$$K_i = \left\{ \left[\zeta_i(k) \right] \in \mathbf{R} \mid \psi_i(k) = a_i \psi_i(k-1) + Y_i \zeta_i(k) \right\} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \min(\psi_i) \leq \psi_i(k) \leq \max(\psi_i) \\ \min(\zeta_i) \leq \zeta_i(k) \leq \max(\zeta_i) \end{cases}$$

式中: ψ_i, ζ_i 为节点 i 传输模型端口拟合函数; k 为出力不确定模糊集合列数; a_i, Y_i 分别为节点 i 上沼气燃气轮机机组出力参数; $\mathbf{R}$ 为实数集合。

1.2 蓄电池储能模块运行约束

乡村地区广泛存在分布式光伏及集中式光伏安装节点不均匀、不规律的情况,须配备有相应的蓄电池储能单元。在本文所提光-沼虚拟电厂中,为充分发挥光伏的供能潜力,面向用户负荷需求时,可通过对蓄电池的暂时存储和能量再分配,达成对非峰值和峰值电负荷的合理供应。

蓄电池模块运行约束为

$$\begin{cases} \beta_{\text{sto},i,\min} \leq \beta_{\text{sto},i,t} \leq \beta_{\text{sto},i,\max} \\ P_{\text{sto},i,\min} \leq P_{\text{sto},i,t} \leq P_{\text{sto},i,\max}, i \in N, \forall t \in T \\ 0 \leq P_{\text{sto},i,t} \leq P_{\text{stod},i,\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\beta_{\text{sto},i,\min}$ 为 t 时刻电力网络中节点 i 处分布式蓄电池模块储量占比; $\beta_{\text{sto},i,\max}, \beta_{\text{sto},i,\min}$ 分别为节点 i 的分布式蓄电池模块储量占比的上限和下限; $P_{\text{sto},i,t}$ 为 t 时刻节点 i 处分布式蓄电池模块内电能当量; $P_{\text{sto},i,\max}, P_{\text{sto},i,\min}$ 分别为节点 i 处电储能模块电能当量的上限和下限; $P_{\text{stod},i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的分布式电储能模块输出电量; $P_{\text{stod},i,\max}$ 为节点 i 的分布式电储能模块输出电量的上限。

1.3 热储能模块运行约束

热能的传输与储存方式与电池具有一定相似特征,接入含有热储能系统的工业园区及用户区时,可通过热储能设备对热能短暂存储或重新分配,以达成对非峰值和峰值热负荷的合理供应。

热力网络中存在有部分容量较小、分布松散的热储能模块,该模块在热能传输中作为暂态流模块

出现,可作为对热网络供给能力的补充,具有平移、调节的作用。热力网络模型集中式热储能模块运行约束如式(10)所示,分布式热储能模块运行约束如式(11)所示。

$$\begin{cases} H_{\text{sto},\min} \leq H_{\text{sto},t} \leq H_{\text{sto},\max} \\ Q_{\text{sto},\min} \leq Q_{\text{sto},t} \leq Q_{\text{sto},\max} \\ 0 \leq Q_{\text{sto},t} \leq Q_{\text{sto},t} \\ H_{\text{sto},\min} \leq H_{\text{sto},t} \leq H_{\text{sto},\max} \\ Q_{\text{sto},t+1} = Q_{\text{sto},t} + \frac{H_{\text{sto},t}\Delta t}{\mu_{\text{sto}}} - \frac{H_{\text{sto},t}\Delta t}{\mu_{\text{sto}}} \end{cases}, \forall t \in T \quad (10)$$

式中: $H_{\text{sto},t}$ 为 t 时刻热力网络中集中式热储能模块储热量; $H_{\text{sto},\max}$ 、 $H_{\text{sto},\min}$ 分别为集中式热储能模块储热量的上限和下限; $Q_{\text{sto},t}$ 为集中式热储能模块内 t 时刻热能当量; $Q_{\text{sto},\max}$ 、 $Q_{\text{sto},\min}$ 分别为集中式热储能模块热能当量的上限和下限; $Q_{\text{sto},t}$ 为集中式热储能模块内 t 时刻热能输出当量; $H_{\text{sto},t}$ 为集中式热储能模块 t 时刻热储能模块输出热量; μ_{sto} 为集中式热储能模块的能量转换系数。

$$\begin{cases} 0 \leq H_{\text{sto},j,t} \leq H_{\text{sto},j,\max} \\ 0 \leq Q_{\text{sto},j,t} \leq Q_{\text{sto},j,\max} \\ 0 \leq Q_{\text{sto},j,t} \leq Q_{\text{sto},j,t} \\ 0 \leq H_{\text{sto},j,t} \leq H_{\text{sto},j,\max} \\ \Delta Q_{\text{sto},j,t+1} = \frac{H_{\text{sto},j,t}\Delta t}{\mu_{\text{sto},j}} \end{cases}, j \in J, \forall t \in T \quad (11)$$

式中: $H_{\text{sto},j,t}$ 为 t 时刻热能节点 j 的分布式热储能模块储热量; $H_{\text{sto},j,\max}$ 为热能节点 j 分布式热储能模块储热量上限; $Q_{\text{sto},j,t}$ 为 t 时刻热能节点 j 分布式热储能模块内热能当量; $Q_{\text{sto},j,\max}$ 为热能节点 j 分布式热储能模块热能当量上限; $Q_{\text{sto},j,t}$ 为 t 时刻热能节点 j 的分布式热储能模块热能输出当量; $H_{\text{sto},j,t}$ 为 t 时刻热能节点 j 的分布式热储能模块输出热量; $H_{\text{sto},j,\max}$ 为热能节点 j 分布式热储能模块输出热量上限; $\Delta Q_{\text{sto},j,t+1}$ 为预测 $t+1$ 时刻热能调度需求量; $\mu_{\text{sto},j}$ 为热能节点 j 处的分布式热储能模块的能量转换系数; Δt 为时间间隔。

考虑热储能的输出时延约束,确保热储能的输出功率在时延 τ_{BE} 后生效,引入 t 时刻节点 j 热储能输出状态辅助变量 $H_{\text{sto},\text{de},j,t}$,并满足式(12)。

$$H_{\text{sto},\text{de},j,t} = \begin{cases} H_{\text{sto},j,t-\tau_{\text{BE}}}, & t \geq \tau_{\text{BE}} \\ 0, & t < \tau_{\text{BE}} \end{cases} \quad (12)$$

1.4 光伏出力线性建模

可再生能源和负荷会受到各种外界环境因素的影响,导致输出功率无法准确判断,从而无法制定合理的调度计划,对光-沼虚拟电厂的安全稳定运行造成很大影响。乡村地区容量较小的分布式光伏可为线路提供一定调度空间,本文设定乡村分布式光伏资源接受虚拟电厂主管部分的统一调度。

节点 i 上的分布式光伏出力表达式为

$$P_{\text{PV},i,t} = \frac{\Gamma(\alpha_{\text{PV}} + \beta_{\text{PV}})}{\Gamma(\alpha_{\text{PV}})\Gamma(\beta_{\text{PV}})} r_t^{\alpha_{\text{PV}}-1} (1-r_t)^{\beta_{\text{PV}}-1} - \varepsilon_{\text{PV}} \quad (13)$$

式中: r_t 为 t 时刻环境影响因子; α_{PV} 、 β_{PV} 和 ε_{PV} 为拟合参数; $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

集中式光伏机组安装容量更大,可为线路提供较高的出力,往往接入在线路上游的大型电站中,节点 i 上的集中式光伏出力表达式为

$$P_{\text{PVP},i,t} = \frac{P_{\text{PV},i,t}}{P_{\text{PV},i}} P_{\text{PVP},i} + \varepsilon_{\text{PVP},i} \quad (14)$$

式中: $P_{\text{PVP},i,t}$ 为 t 时刻节点 i 上的集中式光伏出力情况; $P_{\text{PV},i}$ 为节点 i 上分布式光伏单位容量; $P_{\text{PVP},i}$ 为节点 i 上的集中式光伏安装总容量; $\varepsilon_{\text{PVP},i}$ 为节点 i 的环境拟合参数。

2 基于数据驱动的低碳调度模型

基于数据驱动的低碳调度优化模型分为日前碳惩罚调度模型和实时调度模型,表示为

$$F = \min F_1 + \min F_2 \quad (15)$$

式中: F_1 为日前调度目标函数; F_2 为实时调度目标函数。

2.1 日前调度目标函数

光-沼虚拟电厂向乡村地区用户负荷供给电能过程中,沼气能源系统燃沼发电作业阶段产生一定的碳排放量,同时,当存在负荷的缺额情况时,需要通过公网购电的形式对用户负荷进行供应,此时会产生相应的碳惩罚成本。考虑虚拟电厂对地区的减碳效益,设置日前调度目标函数以负荷用能碳惩罚成本最低为目标。日前调度目标函数 F_1 表达式为

$$\min F_1 = C_{\text{Gbio}} P_{\text{Gbio},t} + C_{\text{Grid}} P_{\text{Grid},t} + C_{\text{bio}} (Q_{\text{Gbio},t} - Q_{\text{bio},t}) - C_d V_{\text{sto},t} \quad (16)$$

式中: C_{Gbio} 为单位沼气发电量碳惩罚成本; $P_{\text{Gbio},t}$ 为 t 时刻沼气燃气轮机发电量; C_{Grid} 为公网购电碳惩罚成本; $P_{\text{Grid},t}$ 为 t 时刻用户公网购电量; C_{bio} 为热能传

输耗散的碳惩罚成本; $Q_{\text{bio},t}$ 为 t 时刻用户热负荷需求量; $Q_{\text{Gbio},t}$ 为 t 时刻沼气发电机组输出热量; C_d 为储沼减碳效益; $V_{\text{sto},t}$ 为 t 时刻沼气存储量。

日前沼气燃气轮机发电量及热能产出模型可表示为

$$\begin{cases} P_{\text{Gbio},t} = \mu_{\text{Gbio}} \eta_{\text{burn}} P_G m_{\text{Gbio},t} \\ Q_{\text{Gbio},t} = \mu_{\text{tran}} P_{\text{Gbio},t} \end{cases} \quad (17)$$

式中: μ_{Gbio} 为机组工作比例; η_{burn} 为沼气燃气轮机燃气效率; P_G 为光-沼虚拟电厂内沼气燃气轮机满发容量; $m_{\text{Gbio},t}$ 为 t 时刻沼气消耗量; μ_{tran} 为热能传输效率。

网络传输支路中参数约束为

$$\begin{cases} p_{g,\min} \leq p_g \leq p_{g,\max} \\ m_{g,\min} \leq m_g \leq m_{g,\max} \\ Q_{\text{Gbio},\min} \leq Q_{\text{Gbio},t} \leq Q_{\text{Gbio},\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $p_{g,\max}$ 、 $p_{g,\min}$ 分别为发电机组出力函数上限、下限; $m_{g,\max}$ 、 $m_{g,\min}$ 分别为单位时间输气管道输气流量上限、下限; $Q_{\text{Gbio},\max}$ 、 $Q_{\text{Gbio},\min}$ 分别为沼气发电机组输出热量上限、下限。

2.2 实时调度目标函数

实时调度阶段以非可再生能源调度成本最小为目标函数。考虑乡村分布式光伏出力和沼气发酵过程沼气产出速率的多重不确定性,所提实时调度方法在日前调度优化模型基础上,导出每小时基础运行策略,为机组的运行提供指导。

受辐照强度及温度的影响,乡村地区分布式光伏可输出的有功功率随时间波动变化。节点接入的光伏有功出力不确定集合表示为

$$P_{\text{PV}} = \{P_{i,t} | P_{i,t} = \tilde{P}_{i,t} \pm \xi_{1,i,t} \hat{P}_{i,t}\} \quad (19)$$

式中: $P_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 接入的光伏有功出力; $\tilde{P}_{i,t}$ 为 t 时刻在节点 i 处光伏可输出有功功率的基础值; $\hat{P}_{i,t}$ 为对应的最大预测偏差量; $\xi_{1,i,t}$ 为不确定系数,且 $\xi_{1,i,t} \in [0, 1]$ 。

在乡村地区存在规模大小各异的分布式沼气资源,由于物料产出具有间歇性,制沼环节的沼气产出速度受到多种因素影响。将沼气产出速率不确定模型表示为

$$v_s = \{v_{i,t} | v_{i,t} = \tilde{v}_{i,t} \pm \xi_{2,i,t} \hat{v}_{i,t}\} \quad (20)$$

式中: $\tilde{v}_{i,t}$ 为 t 时刻在节点 i 处沼气产出速度基础值; $\hat{v}_{i,t}$ 为对应的最大预测偏差量; $\xi_{2,i,t}$ 为不确定系数,且

$\xi_{2,i,t} \in [0, 1]$ 。

将沼气产出速率不确定模型代入前文所提沼气能源系统出力初始不确定模糊集合,则实时调度目标函数 F_2 可表示为

$$\begin{cases} \min F_2 = \sum_i \rho_{i,t} C_{i,t} y_{i,t} + \sum_j \rho_{h,j,t} C_{h,j,t} y_{h,j,t} \\ \text{s.t.} \quad y_{i,t} = P_{L,i,t} - K_i - P_{i,t} \\ y_{h,j,t} = Q_{L,j,t} - \mu_{\text{tran}} K_i - \Delta Q_{\text{sto},j,t} - Q_{\text{sto},t} \\ y_{i,t} \geq 0 \\ y_{h,j,t} \geq 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\rho_{i,t}$ 和 $\rho_{h,j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 和热能节点 j 的折算系数; $C_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的单位非可再生能源调度成本; $y_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的实时调控量; $C_{h,j,t}$ 为 t 时刻热能节点 j 的单位非可再生能源调度成本; $y_{h,j,t}$ 为 t 时刻热能节点 j 的实时调控量; $P_{L,i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电负荷需求量; $Q_{L,j,t}$ 为 t 时刻热能节点 j 的热负荷需求量。

2.3 模型约束

为保证算例的真实性和可行性,同样考虑网络传输中潮流等式约束,表示为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_w U_w (G_{iw} \cos \theta_{iw} + B_{iw} \sin \theta_{iw}) \\ Q_i = U_i \sum_w U_w (G_{iw} \sin \theta_{iw} - B_{iw} \cos \theta_{iw}) \end{cases} \quad (22)$$

式中: P_i 为节点 i 处的注入有功功率; Q_i 为节点 i 处的注入无功功率; U_i 为节点 i 处的电压幅值; U_w 为节点 w 处的电压幅值; G_{iw} 和 B_{iw} 分别为系统在节点 i 和 w 间导纳矩阵的实部和虚部; θ_{iw} 为接入节点 i 和节点 w 的电压相角差。

电压不等式约束为

$$\beta_U \leq P_r \{U_i | U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max}\} \quad (23)$$

式中: P_r 为事件概率集合; $U_{i,\min}$ 为节点 i 运行电压允许下限; $U_{i,\max}$ 为节点 i 运行电压允许上限; β_U 为电网电压置信水平。

节点电压偏移量不等式约束条件为

$$\begin{cases} \varphi_{i,t} = \frac{|U_i - U_{\text{line}}|}{U_{\text{line}}} \times 100\% \\ \varphi_{i,t} \leq \varphi_{\text{grid},\max} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $\varphi_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 上的分布式光伏产生的电压偏移量; $\varphi_{\text{grid},\max}$ 为配电网容许最大电压偏移量; U_{line} 为线路电压。

3 调度策略生成机理

由于沼气和光伏资源的多重不确定性,在优化问题求解环节引入 DDPG 算法通过调节当前光-沼虚拟电厂架构内各模块运行变量,对所提两阶段日前-实时调度策略进行调整,并生成最终收敛结果。作为非固定模态强化学习算法,该算法的特点是具有“A-C”框架,即 Actor-Critic 框架,这种框架广泛适用于含有网络连续状态及空间动态的模型环境中。同时,算法模型中添加参与者评价体系,用以对当前调度策略和调度价值给出综合评估情况。调度策略作为决策单元,在 t 时刻生成决策变量 x 后,对引起的运行环境变换情况进行趋势判断。初始的调度价值函数 $M(\cdot)$,将对该决策的表现进行评价,并为之后的接续行动进行修正指导。调度价值函数可表示为

$$M(x_t, o_t) = r(x_t, o_t) + \lambda_{x_0} \cdot \max M(x_{t+1}, o_{t+1}) \quad (25)$$

式中: x_t 为 t 时刻生成决策变量; o_t 为 t 时刻生成运行变量; $r(\cdot)$ 为评估函数; λ_{x_0} 为该种调度决策下的评估价值参数。

算法采用神经网络建立“执行方”与“参与者评价”两个函数。为保证迭代过程的稳定性,本文将这两个函数进行整合,分别用近似权重 ν' 和矫正权重 ν'' 对下一动作前的执行者和参与者评价后进行矫正,如式(26)所示。

$$x_{t+1} = \nu' o_t + \nu'' \quad (26)$$

整合后的调度价值函数过程量,表示为

$$M(x_t, o_t) = r(x_t, o_t) + \lambda_{x_0} \cdot \max M(\nu' o_t + \nu'', o_{t+1}) \quad (27)$$

基于 DDPG 算法的调度策略优化生成流程如图 2 所示。

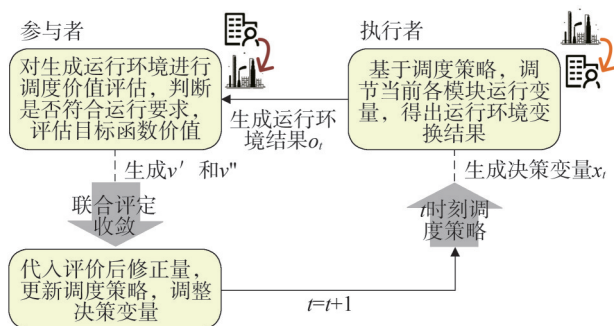


图2 基于 DDPG 算法的调度策略优化生成流程

Fig.2 Scheduling strategy optimization process under DDPG algorithm

另外,将参与者评价对引起的运行环境变换情况的趋势判断从运行环境及评价情况两方面进行联合判定收敛,设为

$$\begin{cases} \left| \frac{M(\nu' o_t + \nu'', o_{t+1}) - M(x_t, o_t)}{M(\nu' o_t + \nu'', o_{t+1})} \right| \leq \varepsilon_1 \\ r(x_t, o_t) + \lambda_{x_0} M(\nu' o_t + \nu'', o_{t+1}) - M(x_{t+1}, o_{t+1}) \leq \varepsilon_2 \end{cases} \quad (28)$$

式中: ε_1 为运行偏移量限制参数; ε_2 为评估价值偏移量限制参数。

基于乡村光-沼虚拟电厂(PV-biogas virtual power plant, PB-VPP)现有架构,考虑沼气能源系统及光伏机组出力的多重不确定性,利用 DDPG 优化算法生成调度策略,在日前数据及负荷数据刻画基础上,在预估环境下实时协调能量供给和各类型用户负荷各时段需求。分布式蓄电池模块对剩余出力进行存储,并根据网络内源侧能源产出及负荷需求情况,参与系统统一调度,对外输出电能;同样,沼气能源系统输出的热能通过热能传输网络传输至各热负荷节点,位于热能传输网络节点处的分布式热储能模块在本节点热负荷需求满足时,按照安装配置容量情况对热能进行存储,并根据网络内源侧能源产出及负荷需求情况,参与系统统一调度,节点中分布式热储能模块可将储存的热能按一定比例对外回送热能,继续对热能传输网络其他节点供应。当系统内供电、供热能力不足时,采用公网购电和外部购热的方式满足电、热负荷需求。

4 算例分析

4.1 算例概况

以我国苏北某地区含有广泛沼气资源和分布式光伏资源的乡村配电网为例,结合实际地区节点情况,给出 69 节点线路连接方式,为更好展示模块调度情况,节选台区内电能、热能能量传输网络架构进行算例分析,如图 3 所示。本算例结合传统电能、热能网络配套设备容量区间,对节点上分布式资源容量参数进行了设置,电能、热能传输网络中各设备安装节点位置及配置容量^[25]如表 1 所示。

在本文中,沼气能源系统采用储沼罐对负荷需求和发电量进行缓冲。搭配集中式储热模块的沼气能源系统进行热电联产和外部供热是供热网络的主要供热能源,供应线路中热负荷,分布式储热模块分散于热力网络节点 H1—H8,面向节点热负荷供应。

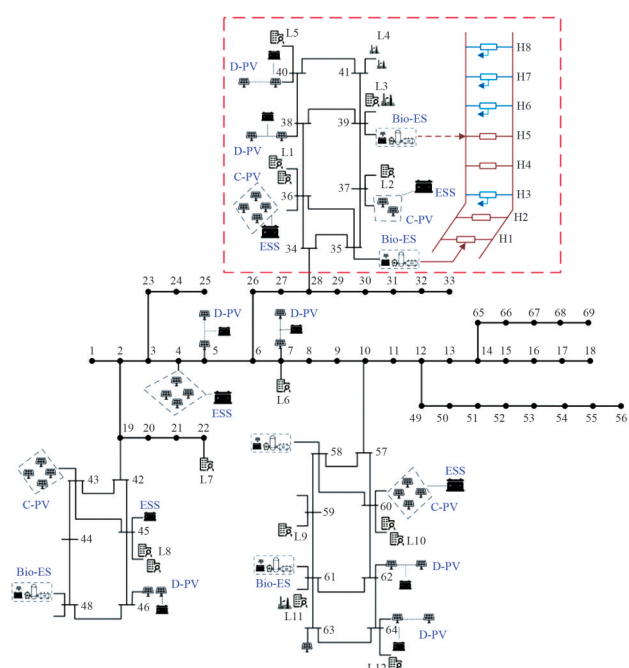


图3 PB-VPP能量传输网络架构

Fig.3 PV-biogas virtual power plant power transmission network architecture

提取光伏机组、沼气出力关键特征,并导入DDPG算法中,为调度策略生成提供基础数据训练

支撑,并利用地区采集我国苏北地区乡村地区年电负荷、热负荷需求数据,并结合 k -means 场景聚类方法对电、热负荷进行聚类刻画。

表1 设备位置及配置容量

Table 1 Equipment location and configuration capacity

设备类型	节点位置	配置总容量/kW
分布式光伏	38,39,40	300
集中式光伏	36,37	900
分布式蓄电池模块	38,39,40	120
集中式蓄电池模块	36,37	250
小型沼气发电机组	39	300
沼气发电机组	35	1 500

考虑乡村地区电负荷需求情况,将电负荷分为居民区类型电负荷和中小型工业园区电负荷。居民区电负荷需求有较为明显的峰、平、谷时段特征,其中峰时段为 17:00—21:00,平时段为 06:00—12:00,谷时段为 21:00—次日 06:00 和 12:00—17:00。

居民区类型电负荷、中小型工业类型电负荷需求情况如图 4(a)和图 4(c)所示。热负荷分为居民

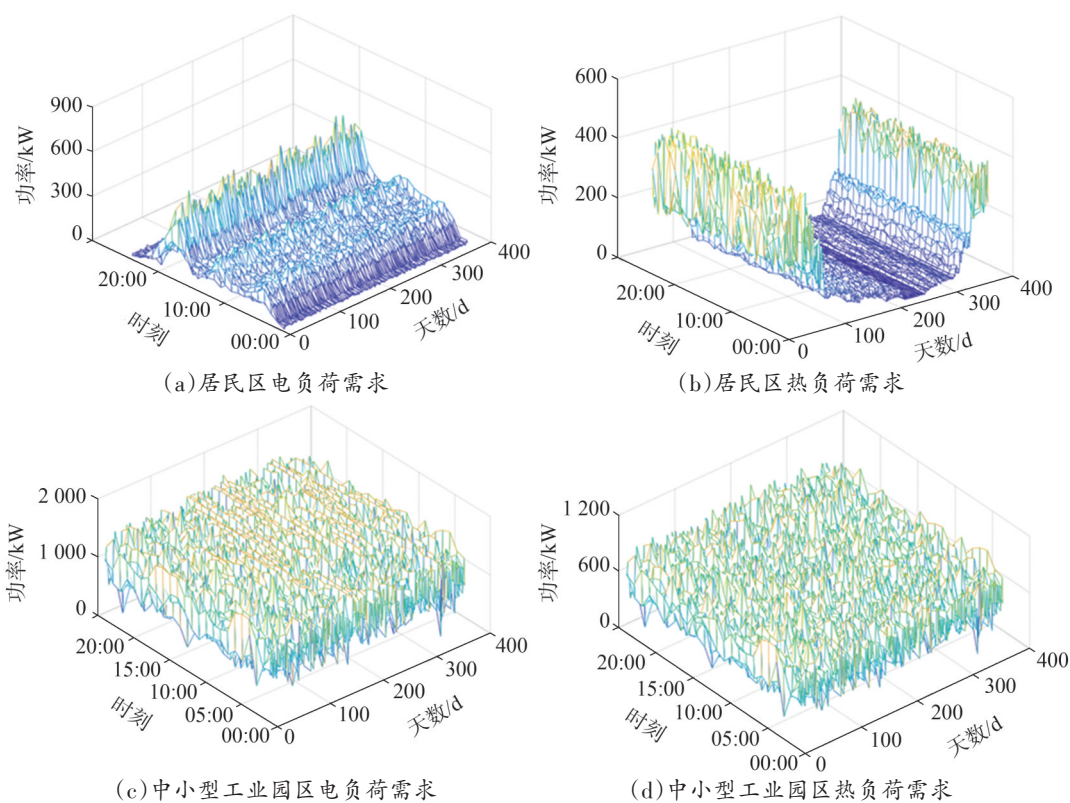


图4 居民区、中小型工业园区电、热负荷需求情况

Fig.4 Demand for electricity and heat load in residential areas and small-medium-sized industrial parks

区热负荷以及中小型工业园区热负荷,居民区类型热负荷高需求量时段为每年1月至3月和11月至次年1月,其余时段呈阶梯型稳定递减。中小型工业园区热负荷需求量较为稳定,呈现全时段热能需求量较为稳定的情况。居民区、中小型工业园区热负荷需求情况如图4(b)和图4(d)所示。

在乡村地区,用户的用能水平以及消费能力等具有多样性,光-沼虚拟电厂在进行多种能源供应及运行调度等环节中,需要考虑综合能源负荷用户的用能特征。针对日用能需求量、用能波动性和年负荷需求量水平给出了电、热负荷用户用能特征,如表2所示。

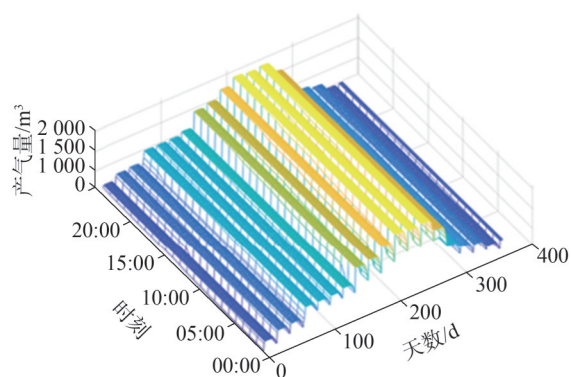
表2 电、热负荷用户用能特征
Table 2 Energy consumption characteristics of electricity and heat load users

用能类型	用户类型	用能特征	参与调度情况
电负荷用户	居民区	日平均用电量较小	可平移、可削减
	中小型工业园区	年用电量水平稳定; 日平均用电量较大; 高峰值负荷时间长	不可平移、 不可削减
热负荷用户	居民区	季节用能量差异化较大 年用热量水平稳定	可平移、可削减
	中小型工业园区	日平均用热量较大; 用热量波动性较小; 年用热量水平稳定	不可平移、 不可削减

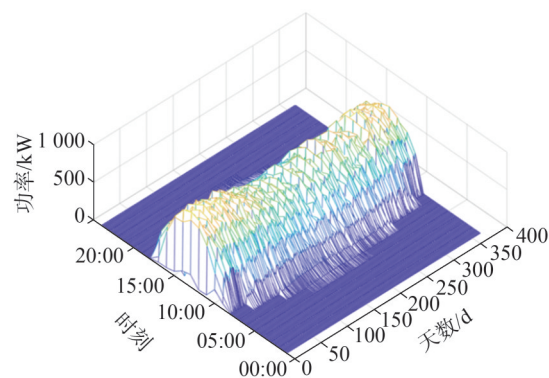
本文研究面向光沼出力导致的多重不确定性影响,基于数据驱动对采样数据进行分析应用,对前文所提沼气能源系统出力初始不确定模糊集合进行数据拟合处理,得到地区光伏机组出力、沼气产出情况如图5所示,并导入DDPG算法中,为调度策略生成提供数据训练支撑。

4.2 结果分析

分别利用结合实际地区节点构型的69节点系统进行求解验证,为体现方案在实际应用系统中指标响应情况,在算例结果分析中采用各模块运行数据进行说明,模型求解时间为14.604 9 s。基于系统安装配置容量,设计3个对比方案用以验证本文所提低碳调度方法的正确性和有效性。



(a) 沼气产出数据拟合画像



(b) 光伏出力数据拟合画像

图5 光-沼数据拟合画像

Fig.5 PV-Biogas data fitting portrait

方案1:按照现有能源设备配置情况,各能源主体独立运行,不与其他能源主体进行信息交互,各模块无法及时消纳和存储的能源,以向外耗散形式计量。

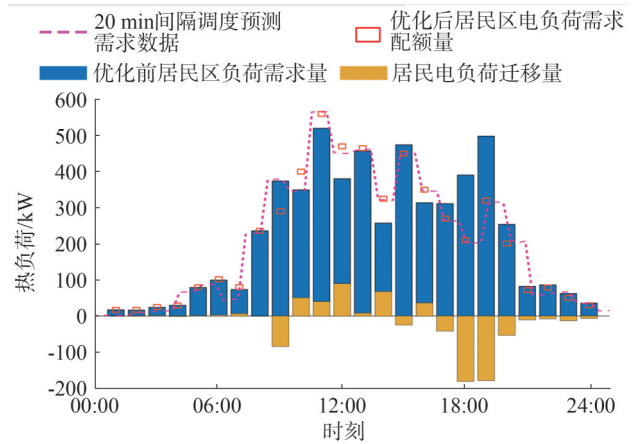
方案2:按照现有光伏、沼气能源系统、储能设备安装配置情况,不采用本文所提光-沼虚拟电厂优化调度方法,将沼气能源系统及光伏机组的输出电能按照原有负荷消纳情况,进行能源的供应,同时,分接于各个节点的蓄电池模块对本节点内的光伏机组剩余出力进行存储,不参与系统统一调度,只面向本节点内负荷供应储存的电能。同样,沼气能源系统输出的热能通过热能传输网络传输至各热负荷,位于热能传输网络节点处的分布式热储能模块在本节点热负荷需求满足时,按照安装配置容量情况对热能进行存储,并只面向本节点热负荷进行供应。当系统内供电、供热能力不足时,采用公网购电和外部购热的方式满足电、热负荷需求,计算全年非可再生能源调度成本,并求出全年系统碳惩罚成本。

方案3:按照现有光伏、沼气能源系统、储能设备安装配置情况,采用本文所提光-沼虚拟电厂优化调度方法,考虑沼气能源系统及光伏机组出力的多重不确定性,利用DDPG算法生成调度策略,协调能量供给和用户电负荷各时段电力需求。分布式蓄电池模块对剩余出力进行存储,并根据网络内源侧能源产出及负荷需求情况,参与系统统一调度,对外输出电能;同样,沼气能源系统输出的热能通过热能传输网络传输至各热负荷节点,位于热能传输网络节点处的分布式热储能模块在本节点热负荷需求满足时,按照安装配置容量情况对热能进行存储,并根据网络内源侧能源产出及负荷需求情况,参与系统统一调度,分布式热储能模块可将储存的热能按一定比例对外回送热能,继续对热能传输网络其他节点供应。当系统内供电、供热能力不足时,采用公网购电和外部购热的方式满足电、热负荷需求。最后,计算全年非可再生能源调度成本,并求出全年系统碳惩罚成本。

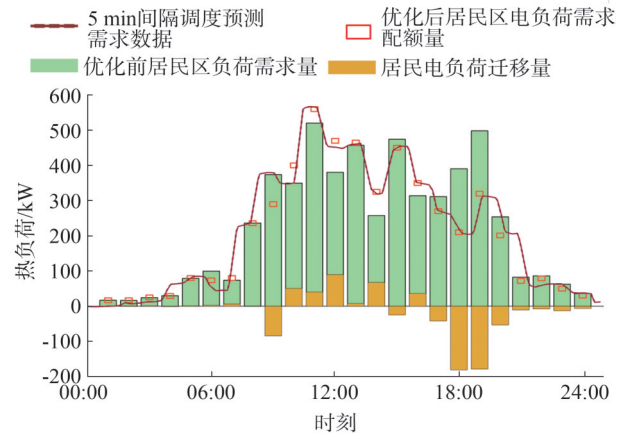
1) 电能传输网络优化情况。

选取居民区和中小型工业园区日电负荷需求数据,对电能传输网络优化前后进行对比验证。居民区电负荷需求情况对比如图6所示。采用方案2时,原负荷需求在09:00—13:00和15:00—20:00存在两个较大且较为集中的高电能需求阶段。该阶段蓄电池模块无法对电能进行有效的存储。采用方案3时,结合虚拟电厂内沼气和光伏出力情况,结合居民区电负荷用能特点,预测居民区电负荷迁移可能性并优化负荷迁移量。居民区电负荷需求20 min间隔预测数据如图6(a)中红色虚线所示,该预测结果尽可能多地使用光伏峰值出力,减少外部购电需求,结合分布式储能设备调度能力,能极大满足现有负荷需求量的同时改善峰值用能配额,优化后居民区电负荷迁移情况如黄色条块所示。

为说明优化阶段的预测稳定性,调整预测数据间隔为5 min,居民区电负荷需求5 min间隔预测数据如图6(b)中棕色虚线所示,该预测结果与20 min预测结果相吻合,结合分布式储能设备调度能力及快速调度需求,改善峰值用能配额,优化后居民区电负荷迁移情况如绿色条块所示。



(a) 居民区电负荷需求20 min间隔调度预测情况



(b) 居民区电负荷需求5 min间隔调度预测情况

图6 居民区电负荷需求预测及调度情况对比

Fig.6 Comparison of electricity load demand forecasting and scheduling in residential areas

分布式蓄电池模块调度情况如图7所示。其中绿色条块为蓄电池面向居民区电负荷补偿供应电能,采用本文所提优化调度方案后,15:00—21:00部分负荷迁移至10:00—14:00,考虑到实际负荷用能的随机性,蓄电池模块应有存响应裕度,因此蓄电池模块在该时段内可面向居民区负荷供应。紫色条块表示分布式蓄电池参与虚拟电厂优化调度,对外输出电能。

优化过程中,调度环节多源协同供应情况如图8所示。

2) 热能传输网络优化情况。

选取居民区和中小型工业园区日热负荷需求数据,对热能传输网络优化前后进行了对比验证。优化前后居民区热负荷需求情况对比如图9所示。

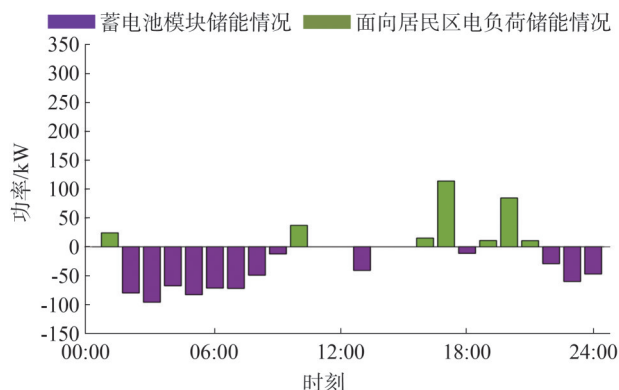


图7 分布式蓄电池模块调度情况

Fig.7 Distributed battery module scheduling situation

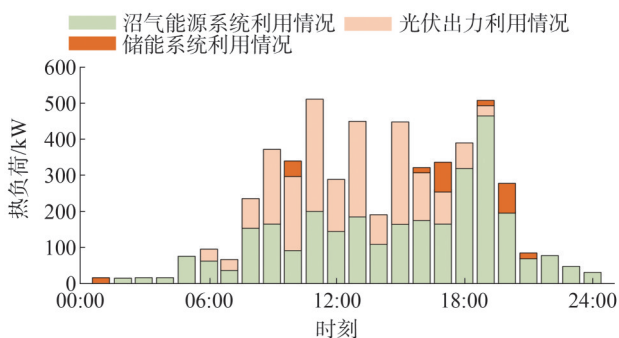


图8 调度环节中多源协同供应情况

Fig.8 Multi-source collaborative supply in scheduling process

方案2对居民热负荷采用常规的定量配额供应。采用方案3进行协调后,考虑居民区实际热负荷需求刚性,结合优化前热负荷需求水平,对居民热负荷需求进行调整,新增分布式储热单元储量如棕色条块所示。

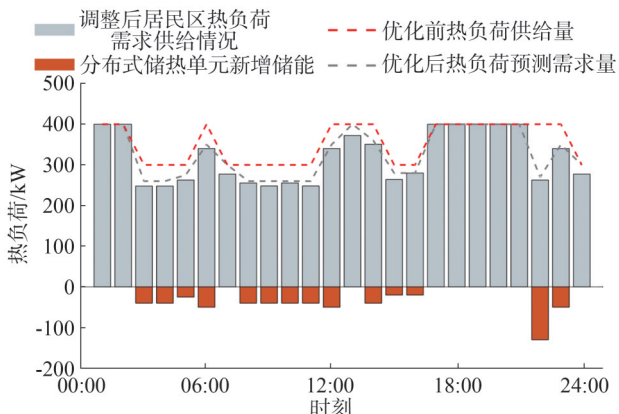
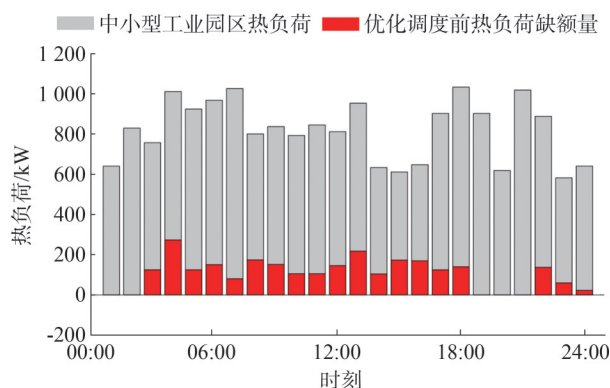


图9 优化前后居民区热负荷需求情况对比

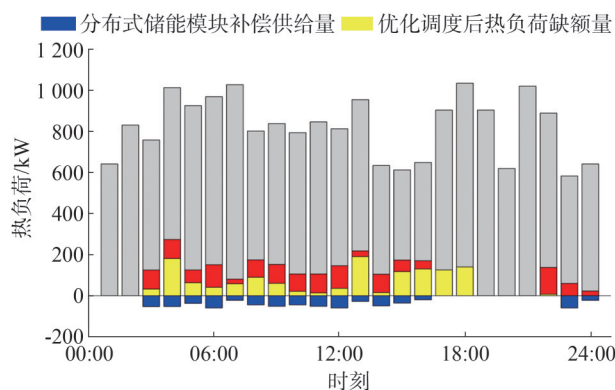
Fig.9 Comparison of heat load demand in residential areas before and after optimization

通过所提优化调度方案对居民区热负荷预测及调整,居民非刚性热负荷需求补偿供应至园区热负荷需求,减少了中小型工业园区热能的外部购买,降低了碳排放。

在中小型工业园区热负荷方面,采用方案2的热负荷及负荷缺额情况如图10(a)所示,采用方案3的热负荷缺额量、分布式储能模块补偿供给量如图10(b)所示。优化调度调整后,分布式储热单元新增储量可回溯至热能传输网络中,面向中小型工业园区进行补偿供应,同时根据热负荷需求情况,结合集中式储热单元,保证自身储量的稳定性。从图10中可以看出,在优化调度后热负荷缺额量减少的同时,虚拟电厂内部能量在协调配送中达到再平衡。



(a) 优化调度前热负荷缺额量情况



(b) 优化调度后热负荷缺额量情况

图10 优化前后园区热负荷缺额量对比

Fig.10 Comparison of heat load shortage in the park before and after optimization

3) 低碳经济性对比。

考虑光-沼虚拟电厂运行成本,以日前调度为

基础,提出基于DDPG算法的数据驱动实时调度方法,以虚拟电厂低碳运行成本和非可再生能源调度成本最小为优化目标。本算例仿真参数结合的沼气能源系统工程现场测定参数值,如表3所示。碳排放计量参数选取常温常压下二氧化碳质量密度为 $0.001\ 946\ \text{t/m}^3$,年电力平均二氧化碳排因子为 $0.645\ 1\ \text{kg/kWh}$ 。

表3 计算参数
Table 3 Design parameters

参数	数值
$C_{\text{Gbio}} / (\text{元/kWh})$	0.016 1
$C_{\text{Grid}} / (\text{元/kWh})$	0.012 9
$C_{\text{bio}} / (\text{元/kWh})$	0.009 0
$C_d / (\text{元/m}^3)$	-0.021 6
$C_{i,t} / (\text{元/kWh})$	0.560
$C_{\text{h},j,t} / (\text{元/kWh})$	0.124

全年8 760 h光-沼虚拟电厂方案1、方案2和方案3的碳惩罚成本和非可再生能源调度成本计算结果如表4所示。

表4 光-沼虚拟电厂经济性成本方案对比
Table 4 Comparison of economic cost schemes of PV-biogas virtual power plant

方案	年碳惩罚成本/元	年非可再生能源调度成本/元
1		682 612.05
2	13 562.59	117 155.69
3	12 425.35	59 751.30

采用所提调度策略的方案3的年碳惩罚成本为12 425.35元,与方案2相比降低了8.38%,方案3中年非可再生能源调度成本为59 751.30元,与方案2相比降低了48.99%。可看出采用本文光-沼虚拟电厂优化调度方法后,可最大程度提高乡村区域内可再生能源使用量,能更好地协调多元能源出力情况,提高用户用能的低碳经济性。

5 结论

基于提升乡村地区光-沼虚拟电厂的低碳经济性运行需求,给出了沼气能源系统动力学量化模型,建立了沼气能源系统耦合分布式光伏发电系统的动态模型;考虑乡村地区沼气能源系统和光伏机组出力的多重不确定性,建立了光-沼能源供能主体不确定性集合;考虑光-沼虚拟电厂低碳运行成本,以日前调度为基础,提出了基于DDPG算法的两阶段低碳调度方法,以虚拟电厂低碳运行成本和调度成本最小为优化目标,对乡村地区光-沼虚拟电厂中的分布式光伏及沼气资源的整合利用方案进行修正。算例结果表明:

1)采用本文所提调度策略的方案3的年碳惩罚成本为12 425.35元,与方案2相比降低了8.38%,方案3中年非可再生能源调度成本为59 751.30元,与方案2相比降低了48.99%。

2)所提乡村光-沼虚拟电厂调度策略可解决沼气能源系统及光伏机组出力的多重不确定性问题,可有效协调能量供给满足乡村用户用能需求。

参考文献

- [1] 杜向阳,熊小伏,王建,等.基于负荷有序聚类的主动配电网储能规划方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(6):187-197.
DU Xiangyang, XIONG Xiaofu, WANG Jian, et al. Energy storage planning method of active distribution network based on load ordered clustering [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 187-197.
- [2] 李勇,姚天宇,乔学博,等.基于联合时序场景和源网荷协同的分布式光伏与储能优化配置[J].电工技术学报,2022,37(13): 3289-3303.
LI Yong, YAO Tianyu, QIAO Xuebo, et al. Optimal configuration of distributed photovoltaic and energy storage system based on joint sequential scenario and source-network-load coordination [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3289-3303.
- [3] 俞鸿飞,王韵楚,吕瑞扬,等.考虑灵活爬坡产品的虚拟电厂两阶段分布鲁棒优化运营策略[J].电力系统自动化,2024,48(14):16-27.
YU Hongfei, WANG Yunchu, LYU Ruiyang, et al. Two-stage distributionally robust optimization operation strategy of virtual power plants considering flexible ramping products [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 16-27.

- [4] 何斯强,张俊岭,顾宗奇,等.面向分布式资源聚合管控的虚拟电厂建模与优化控制综述[J].山东电力技术,2024,51(2):11-24.
HE Siqiang, ZHANG Junling, GU Zongqi, et al. Overview of virtual power plant modeling and optimization control for distributed resource aggregation and control [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(2): 11-24.
- [5] 蒋正威,张锋明,胡凤桐,等.虚拟电厂分布式资源的聚合响应能力评估方法[J].电力工程技术,2022,41(6):39-49.
JIANG Zhengwei, ZHANG Fengming, HU Fengtong, et al. Evaluation method of aggregated responsiveness of distributed resources in virtual power plant [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 39-49.
- [6] 王秋杰,亓浩,谭洪,等.考虑碳市场风险的热电联产虚拟电厂低碳调度[J/OL].电力自动化设备,1-14[2024-09-03].https://doi.org/10.16081/j.epae.202404003.
WANG Qiujie, QI Hao, TAN Hong, et al. Low-carbon scheduling of CHP virtual power plant considering carbon market risk [J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 1-14[2024-09-03].https://doi.org/10.16081/j.epae.202404003.
- [7] 侯昊宇,葛晓琳,曹旭丹.考虑碳交易的多虚拟电厂联盟博弈优化方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(3):77-85.
HOU Haoyu, GE Xiaolin, CAO Xudan. Coalition game optimization method for multiple virtual power plants considering carbon trading [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 77-85.
- [8] 葛晓琳,曹旭丹,李伶玲,等.考虑风险与碳流动的多虚拟电厂优化运行方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(8):126-135.
GE Xiaolin, CAO Xudan, LI Yiling, et al. Optimal operation method for multiple virtual power plants considering risk and carbon flow [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(8): 126-135.
- [9] 周任军,孙洪,唐夏菲,等.双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1675-1683.
ZHOU Renjun, SUN Hong, TANG Xiafei, et al. Low-carbon economic dispatch based on virtual power plant made up of carbon capture unit and wind power under double carbon constraint [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1675-1683.
- [10] 张笑演,王檀裕,黄蕾,等.考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(9):34-46.
ZHANG Xiaoyan, WANG Luyu, HUANG Lei, et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 34-46.
- [11] 彭思佳,邢海军,成明洋.多重不确定环境下考虑阶梯型碳交易的虚拟电厂低碳经济调度[J].上海交通大学学报,2023,57(12):1571-1582.
PENG Sijia, XING Haijun, CHENG Mingyang. Low carbon economic dispatch of virtual power plants considering ladder-type carbon trading in multiple uncertainties [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(12): 1571-1582.
- [12] 李红霞,樊伟,李楠,等.考虑风光不确定性的电气互联虚拟电厂近零碳调度优化模型[J].电力建设,2020,41(9):10-19.
LI Hongxia, FAN Wei, LI Nan, et al. Near-zero carbon dispatching optimization model of virtual power plant connected with power-to-gas considering uncertainties of wind and photovoltaic power [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 10-19.
- [13] 陈张宇,刘东,刘浩文,等.基于精细化需求响应的虚拟电厂优化调度[J].电网技术,2021,45(7):2542-2550.
CHEN Zhangyu, LIU Dong, LIU Haowen, et al. Optimal dispatching of virtual power plant based on refined demand response [J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2542-2550.
- [14] XUE L, ZHANG Y, WANG J X, et al. Privacy-preserving multi-level co-regulation of VPPs via hierarchical safe deep reinforcement learning [J]. Applied Energy, 2024, 371: 123654.
- [15] ESFAHANI M, ALIZADEH A, CAO B, et al. A stochastic-robust aggregation strategy for VPP to participate in the frequency regulation market via backup batteries [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 98: 113057.
- [16] 徐韵,徐耀杰,杨嘉禹,等.基于阶梯碳交易的电转气虚拟电厂低碳经济调度[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(7):118-128.
XU Yun, XU Yaojie, YANG Jiayu, et al. Low carbon economic dispatching for power-to-gas virtual power plant based on stepped carbon trading [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(7): 118-128.
- [17] 骆钊,耿家璐,黎博文,等.考虑碳-绿证交易机制的虚拟电厂分布鲁棒优化调度[J].电力建设,2023,44(10):137-148.
LUO Zhao, GENG Jialu, LI Bowen, et al. Distributionally robust optimal dispatching for virtual power plants considering carbon-green certificate trading mechanism [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 137-148.
- [18] 李翼成,赵钰婷,崔杨,等.考虑充放电策略的换电站与风电-碳捕集虚拟电厂的低碳经济调度[J].电力自动化设备,2023,43(6):27-36.
LI Yicheng, ZHAO Yuting, CUI Yang, et al. Low-carbon economic dispatching of battery swapping station and wind power-carbon capture virtual power plant considering charging and discharging strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(6): 27-36.
- [19] 刘超波,李新利,时于凯,等.考虑变热价-综合需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),1-11[2024-09-03].https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20230328.1531.003.html. (下转第53页)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.07.003

V2G模式下电动汽车多目标需求响应调度策略

刘 洋^{1,2}, 于海东^{1,2*}, 刘文彬^{1,2}, 文祥宇^{1,2}, 刘明林³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 山东省智能电网技术创新中心, 山东 济南 250003;
3. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要:我国电动汽车保有量正在逐年快速增加,城市配电网运行面临新的挑战和发展契机。为充分发挥电动汽车较好的可控性和灵活储能特性,提高电动汽车辅助配电网运行优化效率,以电动汽车入网(vehicle-to-grid, V2G)运行区域为研究对象,提出V2G模式下多目标优化调度策略。首先,根据电动汽车、储能设备、楼顶光伏的电气运行特性以及设备状态约束,构建包含多类型运行主体的V2G优化运行模型。其次,基于运行模型提出V2G多目标优化决策方法,采用层次分析法量化多目标优化调度的目标侧重,以此实现“经济侧重”与“响应侧重”不同需求响应目标之间的灵活兼顾。最后,调用CPLEX进行算例仿真,对比分析结果可知,采用本文所提V2G模式下多目标优化调度策略,可实现对电动汽车的多目标优化调度,在不同侧重目标的调度模式下,优化所在运行区域的用能表现。

关键词:电动汽车; V2G; 需求响应; 多目标优化

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)07-0027-08

Multi-objective Demand Response Scheduling Strategy for Electric Vehicles in V2G Mode

LIU Yang^{1,2}, YU Haidong^{1,2*}, LIU Wenbin^{1,2}, WEN Xiangyu^{1,2}, LIU Minglin³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;
2. Shandong Smart Grid Technology Innovation Center, Jinan 250003, China;
3. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: China's electric vehicle ownership is rapidly increasing yearly, and urban distribution network operations face new challenges and development opportunities. To give full play to the better controllability and flexible energy storage characteristics of electric vehicles and to improve the optimization efficiency of electric vehicle-assisted distribution grid operation, the electric vehicle-to-grid (V2G) operation taken as the research object and a multi-objective optimization dispatch strategy under the V2G mode has been proposed. Firstly, based on the electrical operation characteristics of EVs, energy storage devices, rooftop PVs, and equipment state constraints, the V2G optimization operation model contains multiple operation subjects. Second, the multi-objective V2G optimization decision-making method is proposed based on the operation mode, and the hierarchical analysis method is used to quantify the objective focus of the multi-objective optimization scheduling to achieve the flexible balance between the different demand response objectives of “economic focus” and “response focus.” Finally, CPLEX is used to simulate the case, and the comparison results show that the multi-objective optimal scheduling strategy proposed in this paper can realize the multi-objective optimal scheduling of EVs and optimize the performance of the operation area under different target-oriented scheduling modes.

Keywords: electric vehicle; V2G; demand response; multi-objective optimization

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目“计及需求侧响应的大规模分布式能源分层分区接入管控技术研究”(52062622002F)。
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Research on Hierarchical Partition Access Control Technology of Large-scale Distributed Energy Considering Demand Side Response” (52062622002F)。

0 引言

为实现“双碳”目标,我国正在逐步构建新型电力系统^[1],使配电网具有更加先进与灵活的网络架构和运行模式,进一步提升风电、光伏等新能源利用

率,优化各类电能负荷的用能效率^[2]。在此背景下,充分发掘以电动汽车为代表的需求响应资源参与电网调节的潜力^[3],有助于实现配电网稳定、经济运行。

在电力系统负荷侧用能优化运行研究中,源网荷储互动提高能源利用效率,逐渐成为热点问题^[4]。文献[5]采用基于贝叶斯博弈的优化方法对配电网中的居民住宅负荷进行调度,利用其灵活性参与需求响应实现节约化用能。文献[6]提出一种基于纳什谈判理论的新能源消纳方法,通过调节热泵热水器等灵活负荷,实现新能源利用率的提高。文献[7]通过对风力、水力、火力发电机组进行灵活调控,在满足系统运行经济性的前提下,提升新能源消纳能力。上述研究集中于通过源网荷储互动,提升新能源利用率,尚未考虑通过区域内多主体互动调控,平抑建筑用能曲线波动程度,同时提高楼顶光伏发电利用率。

电动汽车和储能设备具备良好的可调性能^[8-9],同时并网数量与功率量级逐渐增大,因此上述设备在源网荷储互动调控研究中成为研究重点。文献[10]针对弃风现象严重的电网区域,以电动汽车为调度主体,采用电动汽车入网(vehicle-to-grid, V2G)模式对区域内风电进行消纳。文献[11]针对电网调峰调频问题,提出了电动汽车集群参与调控的调度策略,降低了电动汽车参与电网调节的成本。文献[12]通过控制电动汽车及氢燃料电池汽车,参与综合能源系统中经济性用能调节,提高了系统运行的经济性,改善了主网联络线的负载情况。上述研究大多集中于通过V2G优化调度,提升系统内运行经济性或者实现电网辅助调节,尚未考虑通过对系统进行多目标差异化调控,实现经济运行目标与需求响应目标的灵活兼顾。

针对上述问题,为同时灵活提高建筑楼宇区域内功率平稳运行水平与V2G经济运行水平,本文分析楼顶光伏、储能设备、电动汽车、建筑楼宇负荷的运行特性与互动机制,构建由上述设备构成的V2G运行模型。基于此提出V2G模式下的电动汽车多目标优化调度策略,同时兼顾经济性运行与平抑用能曲线的调度需求。最后通过算例仿真,验证了本文所提调度策略的有效性。

1 V2G运行模型

在V2G运行区域中,电能发用主体包括:楼宇建筑、楼顶光伏、储能设备、电动汽车。其中楼宇建筑为传统用电主体,楼顶光伏为发电主体。储能设备和电动汽车因其具备灵活充放电特性,在V2G运行区域中既属于发电主体又属于用电主体^[13-14]。当V2G运行区域不能实现电能自给自足时,由外电网向区域内进行供电。运行场景示意图如图1所示。

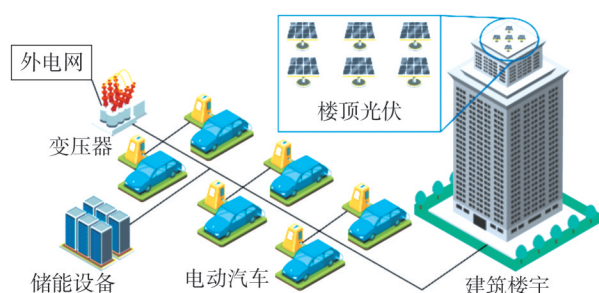


图1 V2G运行场景示意图

Fig.1 V2G operation scenario diagram

1.1 电动汽车充放电模型

电动汽车车主的日常活动直接影响EV接入电网的位置和时刻^[15]。在V2G场景中,车主早晨驾驶EV驶入V2G运行区域,EV与区域内各主体充放电互动;在夜间驾驶EV驶离V2G运行区域,EV结束与区域内各主体充放电互动^[16]。

EV驶入和驶离充电站具有较强的规律性,本文采用正态分布函数描述EV驶入和驶离的时刻,即为

$$f(x_i) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\delta^2}\right] \quad (1)$$

式中: x_i 为EV的驶入或驶离时刻; δ^2 为方差; μ 为均值。

EV驶入充电站时,其电池电量为起始电量,基于统计数据分析可知,起始电量通常较低。对起始电量统计数据拟合,采用指数分布函数描述EV驶入充电站时的起始电量^[17],即为

$$f(x_{soc}) = \lambda \exp(-\lambda x_{soc}) \quad (2)$$

式中: x_{soc} 为电动汽车驶入时的初始电量; λ 为概率参数。

EV的放电功率与充电功率相等。EV具有充

电、放电和离网3种状态。EV与运行区域内的互动功率可表示为:

$$P_{i,t}^{\text{EV}} = a^{\text{EV}} P_{\text{DIS}}^{\text{EV}} + b^{\text{EV}} P_{\text{CHG}}^{\text{EV}} + c^{\text{EV}} P_{\text{NO}}^{\text{EV}} \quad (3)$$

$$P_{\text{DIS}}^{\text{EV}} = -P_{\text{CHG}}^{\text{EV}} \quad (4)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{EV}}$ 为电动汽车 i 在 t 时段与充电站的互动功率; $P_{\text{DIS}}^{\text{EV}}$ 为电动汽车的放电功率; $P_{\text{CHG}}^{\text{EV}}$ 为电动汽车的充电功率; $P_{\text{NO}}^{\text{EV}}$ 为EV的离网功率,其数值为0; a^{EV} 、 b^{EV} 和 c^{EV} 均为二进制变量的系数,根据实际运行情况可知, a^{EV} 、 b^{EV} 和 c^{EV} 在任何时刻有且仅有一个取值为1。

1.2 储能设备充放电模型

储能设备具有响应速度快、功率调节灵活等特点^[18]。储能设备在V2G运行模式中发挥重要作用,能够实现削峰填谷、需求响应等效果^[19]。

为准确描述储能设备充放电过程中的工作状态,需要对储能设备的电量与充放电功率之间的关系进行描述,即为

$$E_{t+1}^{\text{EES}} = E_t^{\text{EES}} + \Delta E_t^{\text{EES}} \quad (5)$$

式中: E_{t+1}^{EES} 为储能设备 $t+1$ 时刻的电量; E_t^{EES} 为储能设备 t 时刻的电量; ΔE_t^{EES} 为储能设备在以 t 时刻为起始时刻的时段内电量变化量。

$$\Delta E_t^{\text{EES}} = \int_t^{t+1} P_t^{\text{EES}} dt = \int_t^{t+1} U_t^{\text{EES}} I_t^{\text{EES}} dt \quad (6)$$

式中: P_t^{EES} 为储能设备 t 时刻的充放电功率; U_t^{EES} 为储能设备 t 时刻的工作电压; I_t^{EES} 为储能设备 t 时刻的工作电流。

$$I_t^{\text{EES}} = a^{\text{EES}} I_{t,\text{DIS}}^{\text{EES}} + b^{\text{EES}} I_{t,\text{CHG}}^{\text{EES}} + c^{\text{EES}} I_{t,\text{NO}}^{\text{EES}} \quad (7)$$

式中: $I_{t,\text{DIS}}^{\text{EES}}$ 为储能设备 t 时刻的放电电流; $I_{t,\text{CHG}}^{\text{EES}}$ 为储能设备 t 时刻的充电电流; $I_{t,\text{NO}}^{\text{EES}}$ 为储能设备 t 时刻的停止工作电流,即为0; a^{EES} 、 b^{EES} 和 c^{EES} 均为二进制变量的系数,根据实际运行情况可知, a^{EES} 、 b^{EES} 和 c^{EES} 中任何时刻有且仅有一个取值为1。

1.3 光伏出力模型

现阶段多数新建建筑楼宇在屋顶架设楼顶光伏,满足自身部分用电需求^[20]。 t 时刻楼顶光伏出力 P_t^{PV} 计算方法为

$$P_t^{\text{PV}} = \eta^{\text{PV}} A^{\text{PV}} f_s f_{\text{TMP}} G_t \quad (8)$$

式中: η^{PV} 为光伏面板的光电转化效率; A^{PV} 为光伏面板的表面积; f_s 为光伏阵列的阴影损失因子,以此量化树木、建筑的阴影对光伏面板光电转化效率的影响; f_{TMP} 为光伏阵列的温度损失因子,以此衡量光伏面板的温度对光电转化效率的影响; G_t 为 t 时刻的太

阳光照辐射量。

2 多目标优化模型

2.1 运行成本

在本文优化模型中,为引导电动汽车参与削峰填谷,降低系统总体运行成本,并平抑负荷波动,实现楼顶光伏发电就地消纳。优化模型设定3项运行成本:综合负荷用电及电动汽车电池退化成本、综合负荷峰谷差值成本和负荷波动成本,其中第一项运行成本代表电动汽车参与需求响应过程中的经济性运行目标,第二及第三项运行成本代表电动汽车参与需求响应过程中的区域功率优化目标。

2.1.1 综合负荷用电及电动汽车电池退化成本

综合负荷用电及电动汽车电池退化成本属于实质性运行成本,由综合负荷用电成本、电动汽车电池参与V2G互动中产生的电池退化成本两部分组成。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T C_t^{\text{U}} + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T C_{i,t}^{\text{V2G}} \quad (9)$$

式中: f_1 为综合负荷用电及电动汽车电池退化成本; C_t^{U} 为 t 时段系统内用电成本; $C_{i,t}^{\text{V2G}}$ 为 t 时段电动汽车 i 与系统互动时充放电电池退化成本; T 为调度周期内的时段数; N 为电动汽车的全部数量。

楼顶光伏发出电量在区域内进行消纳后,仍需外界电网对建筑楼宇、电动汽车和储能设备进行供能。区域内用电成本计算方式为:

$$C_t^{\text{U}} = p_t^{\text{rc}} P_t \quad (10)$$

$$P_t = P_t^{\text{BD}} - P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{EV}} + P_t^{\text{EES}} \quad (11)$$

式中: p_t^{rc} 为 t 时段购电价格; P_t 为 t 时段区域内综合用电功率; P_t^{BD} 为 t 时段建筑楼宇用电功率; P_t^{EV} 为 t 时段区域内电动汽车充放电总功率。

电动汽车通过自身充放电实现与系统的电能互动,但充放电均会影响电池的设备寿命^[21]。量化电动汽车电池退化成本如式(12)—式(13)所示。

$$C_{i,t}^{\text{V2G}} = \left| \frac{c_i^{\text{EV}}}{100} \right| \frac{\alpha_{i,t}}{E_i} C_i^{\text{change}} \quad (12)$$

$$\alpha_{i,t} = \max \{0, (E_{i,t-1}^{\text{SOC}} - E_i^{\text{SOC}}) E_i\} \quad (13)$$

式中: c_i^{EV} 为电动汽车 i 电池运行系数; $\alpha_{i,t}$ 为电动汽车 i 在 t 时段电池电量变化量; E_i 为电动汽车 i 的电池电量; C_i^{change} 为电动汽车 i 电池更换成本; $E_{i,t-1}^{\text{SOC}}$ 为电动汽车 i 在 $t-1$ 时段的荷电状态; $E_{i,t}^{\text{SOC}}$ 为电动汽车 i 在 t 时

段的荷电状态。

2.1.2 综合负荷峰谷差值成本

在各个调度时段内,为实现区域负荷削峰填谷。参照文献[22]本优化模型以综合负荷峰谷差值成本作为引导性成本,引导电动汽车和储能设备在各个时段参与需求响应。

$$f_2 = \sum_{t=1}^T (P_t - P_{av})^2 \quad (14)$$

式中: f_2 为综合负荷峰谷差值成本; P_{av} 为完整调度周期内区域内综合用电功率的平均值。

2.1.3 负荷波动成本

为在完整调度周期内,减低综合负荷的波动限制,本优化模型定义负荷波动成本 f_3 作为引导性成本,降低系统内最大用电负荷和最小用电负荷的差值。

$$f_3 = \max(P_t) - \min(P_t) \quad (15)$$

式中: $\max(P_t)$ 为完整调度时段内综合用电功率最大值; $\min(P_t)$ 为完整调度时段内综合用电功率最小值。

2.2 目标函数

根据2.1节所述3项运行成本相关内容,设置多目标优化模型的目标函数形式如式(16)所示。通过式(16)体现的线性加权求和法将多目标优化问题转化为单目标优化问题,便于后续进一步求解。

$$f = \alpha_1 f_1' + \alpha_2 f_2' + \alpha_3 f_3' \quad (16)$$

式中: f_1' 、 f_2' 、 f_3' 分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 的归一化处理结果,归一化处理可参考文献[23]; α_1 、 α_2 、 α_3 为3项运行成本归一化处理后在目标函数中的权重系数。

在本文提出的多目标优化模型中,通过调整 α_1 、 α_2 、 α_3 的大小,实现用能经济性与负荷平稳运行两个目标下的不同侧重性的优化调度。

在多目标优化模型采用层次分析法确定3项运行成本的权重系数[24]。层次分析法根据专家评价者的经验及判断,对权重系数进行评分计算,所得权重结果可以代表优化模型的调度目标偏好[25]。权重系数计算方法步骤如下。

步骤1:各专家评价者对上述3项运行成本,采用“1-9”标度法进行重要性排序,形成多目标优化模型的判断矩阵 $A_{3 \times 3}$ 。

步骤2:为避免部分主观评价的极端性,影响权重排序合理性。根据式(17)对各判断矩阵进行一致性检验。

性检验。

$$C_m^l = \frac{\lambda_m^{\max} - n}{n - 1} \quad (17)$$

式中: C_m^l 为第 m 个判断矩阵的一致性指标, $C_m^l < 0.1$ 表示判断矩阵有较好一致性,反之,表示判断矩阵未通过一致性检验; $\lambda_m^{\max}$ 为第 m 个判断矩阵的最大特征根; n 为判断矩阵的阶数。

步骤3:针对已经通过一致性检验的用户,计算其对各项指标的主观权重值。

$$M_{m,p} = \prod_{q=1}^n A_{m,p \times q} \quad (18)$$

$$\alpha_{m,p} = \sqrt[n]{M_{m,p}} / \sum_{p=1}^n \sqrt[n]{M_{m,p}} \quad (19)$$

式中: $A_{m,p \times q}$ 为通过一致性校验的第 m 个判断矩阵; $M_{m,p}$ 为 $A_{m,p \times q}$ 的第 p 行每个元素的积; $\alpha_{m,p}$ 为第 m 个判断矩阵对于第 p 项指标的主观权重值。

步骤4:获得通过一致性校验的所有专家评价者的权重系数后,计算各项指标权重值。

$$\alpha_p = \frac{1}{N_{Cl}} \sum_{m \in \Omega_{Cl}} \alpha_{m,p} \quad (20)$$

式中: α_p 第 p 项指标的主观权重值,此数值基于 $A_{i,p \times q}$ 的第 p 行的信息进行计算; N_{Cl} 为通过一致性校验的判断矩阵个数; Ω_{Cl} 为给出判断矩阵通过一致性校验的专家评价者集合。

2.3 约束条件

2.3.1 电动汽车充放电约束

1)充放电功率约束为

$$P_{DIS}^{EV} = P_{i,t}^{EV} \text{ 或 } P_{CHG}^{EV} = P_{i,t}^{EV} \quad (21)$$

2)期望电量约束为

$$E_{i,td}^{EV} = E_{i,to}^{EV} + \sum_{t \in \Omega_T} \Delta E_{i,t}^{EV} \quad (22)$$

式中: $E_{i,td}^{EV}$ 为电动汽车 i 期望调度结束时刻电量; $E_{i,to}^{EV}$ 为电动汽车 i 期望调度起始时刻电量; Ω_T 为完整调度时段集合; $\Delta E_{i,t}^{EV}$ 为电动汽车 i 在时段 t 的电量变化量。

3)荷电状态约束为

$$E_i^{SOC,MIN} \leq E_{i,t}^{EV} / E_{i,S}^{EV} \leq E_i^{SOC,MAX} \quad (23)$$

式中: $E_i^{SOC,MIN}$ 为电动汽车 i 可接受最小荷电状态值; $E_{i,t}^{EV}$ 为电动汽车 i 在 t 时段的电量; $E_{i,S}^{EV}$ 为电动汽车 i 的额定电量; $E_i^{SOC,MAX}$ 为电动汽车 i 可接受最大荷电状态值。

$$E_{i,t}^{SOC} = E_{i,t-1}^{SOC} + \frac{P_{i,t}^{EV}}{\eta_{i,t}^{EV}} \cdot \frac{\Delta t}{E_{i,S}^{EV}} \quad (24)$$

式中: $E_{i,t}^{\text{SOC}}$ 为电动汽车 i 在 t 时段储能设备荷电状态值; $E_{i,t-1}^{\text{SOC}}$ 为电动汽车 i 在 $t-1$ 时段储能设备荷电状态值; $\eta_{i,t}^{\text{EV}}$ 为电动汽车 i 在 t 时段的充电效率。

2.3.2 储能设备充放电约束

1) 充放电功率约束

$$P_{\text{DIS}}^{\text{EES}} \leq P_t^{\text{EES}} \leq P_{\text{CHG}}^{\text{EES}} \quad (25)$$

式中: $P_{\text{DIS}}^{\text{EES}}$ 为储能设备的放电功率限值; $P_{\text{CHG}}^{\text{EES}}$ 为储能设备的充电功率限值。

2) 期望电量约束

$$E_{\text{id}}^{\text{EES}} = E_{\text{to}}^{\text{EES}} + \sum_{t \in \Omega_T} \Delta E_t^{\text{EES}} \quad (26)$$

式中: $E_{\text{id}}^{\text{EES}}$ 为调度结束时刻储能设备的电量; $E_{\text{to}}^{\text{EES}}$ 为调度起始时刻储能设备的电量。

3) 荷电状态约束

$$E_{\text{MIN}}^{\text{SOC,EES}} \leq \frac{E_t^{\text{EES}}}{E_s^{\text{EES}}} \leq E_{\text{MAX}}^{\text{SOC,EES}} \quad (27)$$

式中: $E_{\text{MIN}}^{\text{SOC,EES}}$ 为储能设备可接受最小荷电状态值; E_s^{EES} 为储能设备的额定容量; $E_{\text{MAX}}^{\text{SOC,EES}}$ 为储能设备可接受最大荷电状态值。

$$E_t^{\text{SOC,EES}} = E_{t-1}^{\text{SOC,EES}} + \frac{P_t^{\text{EES}}}{\eta^{\text{EES}}} \cdot \frac{\Delta t}{E_s^{\text{EES}}} \quad (28)$$

式中: $E_t^{\text{SOC,EES}}$ 为 t 时段储能设备荷电状态值; $E_{t-1}^{\text{SOC,EES}}$ 为 $t-1$ 时段储能设备荷电状态值; η^{EES} 为储能设备的充电效率。

2.3.3 综合负荷用电平衡约束

优化调度过程中,综合负荷用电功率应与外电网输入功率相等,保证区域内电能供需平衡。

$$P_t^{\text{EX}} = P_t^{\text{BD}} - P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{EV}} + P_t^{\text{EES}} \quad (29)$$

式中: P_t^{EX} 为 t 时段外电网输入功率。

2.3.4 光伏发电约束

$$0 \leq P_t^{\text{PV}} \leq P_s^{\text{PV}} \quad (30)$$

式中: P_s^{PV} 为光伏机组总装机容量。

3 算例仿真

3.1 参数及算例设置

上述 V2G 多目标需求响应优化问题为线性规划问题,本文在 MATLAB 中调用 CPLEX 求解器对优化模型进行求解。本文设置 6 台电动汽车以及 1 台储能设备,楼顶光伏面积为 1 000 m²。光照强度及分时电价如图 2 所示。光照强度在 00:00—05:00 和 20:00—24:00 为 0。分时电价被分为“峰、平、谷、”三个价

位,分别为 1.07 元/kWh、0.68 元/kWh、0.39 元/kWh。

根据图 2 中所示日照数据计算楼顶光伏出力,并以图 2 中分时电价对 V2G 模式下电动汽车和储能设备进行互动行为引导。

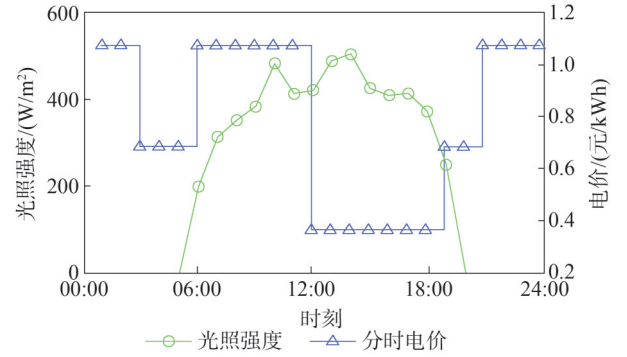


图2 光照强度及分时电价

Fig.2 Light intensity and time-of-use electricity price

本文提出多目标优化模型通过权重系数进行优化目标之间的侧重性调节。由评价专家根据经济优先和响应优先两种目标侧重,分别对目标函数中的三项权重指标进行打分。再根据权重确定方法,计算两个目标下的权重系数,并进行调整,得到 2 组权重系数,形成 2 个算例。2 组权重系数具体数值如表 1 所示。

表 1 权重系数

Table 1 Weight coefficients

算例	侧重目标	α_1	α_2	α_3
1	经济优先	0.75	0.15	0.10
2	响应优先	0.45	0.35	0.20

3.2 仿真结果分析

建筑楼宇负荷及楼顶光伏的发电量如图 3 所示。

楼宇负荷为建筑楼宇内全部电器用电功率,呈现出较强的时序特性,在早、晚时段中建筑楼宇负荷分别达到 229 kW 和 210 kW。光伏发电量为建筑楼宇的楼顶光伏发电量,05:00—20:00 随光照强度变化趋势为先增加后减小,在 10:00 出现光伏出力峰值,达到 65 kW。楼宇净负荷为建筑楼宇对光伏电量进行消纳后,剩余的功率缺额,需要外界进行供电才能满足此部分功率需求。

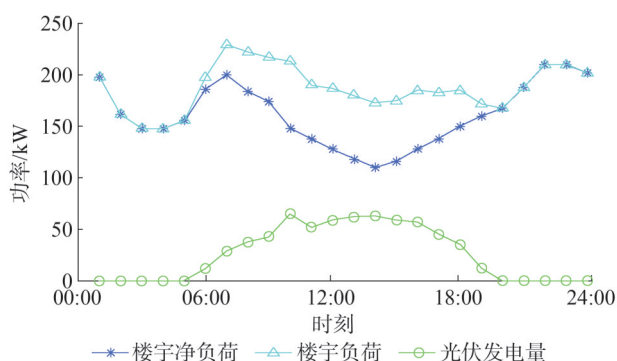


图3 楼宇相关负荷及光伏出力

Fig.3 Building-related loads and photovoltaic output

图4为各算例的外购功率情况。外购功率为区域内整体净用电负荷,其波动越大表明区域内用电需求变化越剧烈。由图4可知,无V2G互动的区域外购功率曲线的波动程度均大于算例1和算例2的区域外购功率曲线。

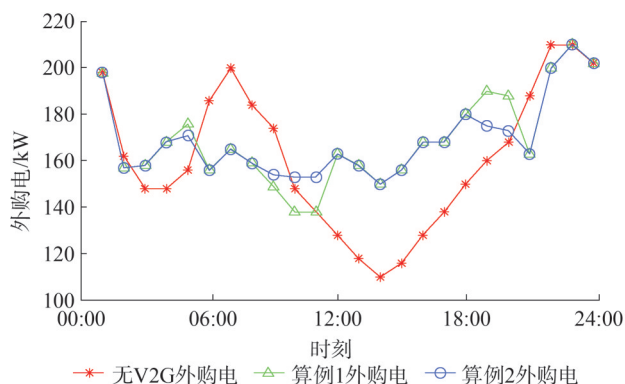


图4 各算例的外购功率

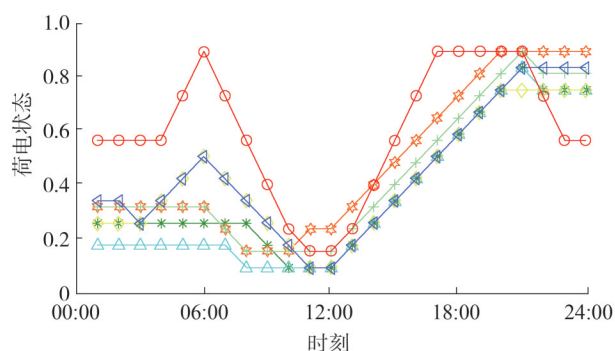
Fig.4 Purchased power for each case

无V2G互动下的全天外购功率的标准差为30.71 kW,算例1的全天外购功率的标准差为19.94 kW,算例2的全天外购功率的标准差为17.15 kW。

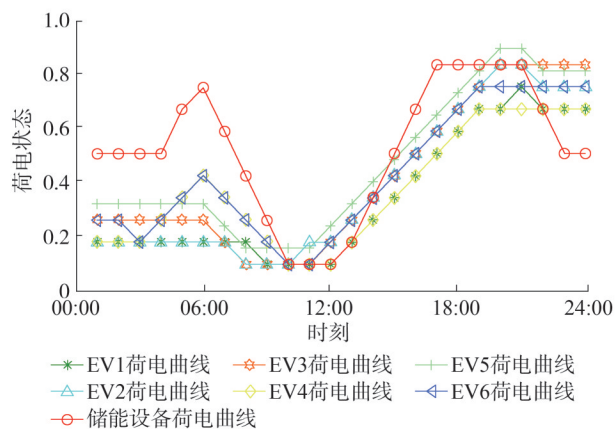
在响应目标优先的算例中,区域内用电需求变化最平缓。在经济目标优先的算例中,对于区域内用电需求变化的平抑效果弱于响应目标优先。说明采用本文所提多目标优化方法可通过调节目标权重系数,更好地平抑系统内负荷需求。

图5(a)、图5(b)分别为算例1、算例2中电动汽车及储能设备的荷电状态变化情况。对比分析可知2个算例中,电动汽车均在06:00左右驶入区域,此

时电动汽车电量较低;在20:00左右驶离区域,此时电动汽车电量较高。说明电动汽车参与V2G过程中,不但能配合电网进行需求响应,也不会影响自身的充电任务。算例2相较于算例1,在06:00—11:00、17:00—22:00的用电早、晚高峰时段内,区域内电动汽车充放电的频次更高,与电网互动更加频繁。同时11:00—13:00时段,算例2储能设备的荷电状态变化率更高,说明在响应目标优先情况下,电动汽车与储能设备参与需求响应的积极性更高。



(a)算例1



(b)算例2

图5 电动汽车及储能荷电状态

Fig.5 SOC of electric vehicles and energy storage

表2为购电成本及电池退化成本统计表。对比分析可知在算例1的总经济成本为3 108.5元,算例2的总经济成本为3 220.0元,说明虽然算例1削峰填谷效果弱于算例2,但其经济性更好。另外由于算例2更加侧重对区域内进行削峰填谷,电动汽车集群参与需求响应意愿更强烈,充放电更加频繁,导致电动汽车电池退化成本高出算例1电动汽车电池退化成本16.0%。说明电动汽车参与需求响应虽然可以平抑

系统内的负荷波动,但也会增加电动汽车蓄电池损耗。

表2 成本统计表
Table 2 Cost statistics table 单位:元

算例	购电成本	电池退化成本	
		电动汽车	储能设备
1	3 087.3	16.9	4.3
2	3 196.1	19.6	4.3

4 结论

为实现电动汽车参与需求响应过程中的经济性运行与区域功率优化,本文构建由电动汽车、储能设备、楼顶光伏、楼宇负荷构成 V2G 运行模型,提出 V2G 模式下电动汽车多目标需求响应调控策略。算例仿真表明:

1)通过对 V2G 运行区域中电动汽车及储能设备的充放电行为进行灵活调度,可以实现区域内用能曲线的削峰填谷,同时实现光伏发电的就地消纳。

2)采用本文所提多目标调度策略,通过调整目标函数中的指标权重,可以实现“经济优先”与“响应优先”双重目标之间不同侧重性的灵活切换优化运行。

在本文设定价格机制背景下,电动汽车车主难以通过参与 V2G 运行获得额外收益。未来将进一步研究提高 V2G 模式下车主参与需求响应收益的互动价格机制。

参考文献

- [1] 冀肖彤,杨东俊,方仍存,等.“双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J].电力建设,2024,45(2):37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2): 37-48.
- [2] SHAN P B, SUN Y Y, SONG Y Z, et al. Adaptive parameter tuning and virtual impedance injection control for coupled harmonic mitigation of photovoltaic converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(1): 162-175.
- [3] 杨颂,王成龙,孙树敏,等.基于集群划分的配电网双层电压协调优化策略[J].山东电力技术,2024,51(3):55-64.
YANG Song, WANG Chenglong, SUN Shumin, et al. Coordination optimization strategy for cluster partition-based two-stage voltage control for distribution network[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(3): 55-64.
- [4] BHARATEE A, RAY P K, GHOSH A. A power management scheme for grid-connected PV integrated with hybrid energy storage system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(4): 954-963.
- [5] LIU X F, TANG D F, DAI Z C. A Bayesian game approach for demand response management considering incomplete information [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(2): 492-501.
- [6] 徐博强,赵建立,张沛超,等.基于负荷准线和纳什谈判的高比例新能源消纳方法[J].电力系统自动化,2023,47(15):36-45.
XU Boqiang, ZHAO Jianli, ZHANG Peichao, et al. High-proportion renewable energy accommodation method based on customer directrix load and nash bargaining [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 36-45.
- [7] 梁荣波,张运涛,刘长发,等.促进风电消纳的多源联合发电调度研究[J].山东电力技术,2023,50(6):39-43.
LIANG Rongbo, ZHANG Yuntao, LIU Changfa, et al. Multi-source joint optimization scheduling to promote wind power consumption [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(6): 39-43.
- [8] REN H T, TSENG C L, WEN F S, et al. Scenario-based optimal real-time charging strategy of electric vehicles with Bayesian long short-term memory networks [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(5): 1572-1583.
- [9] 刘又榕,林顺富,沈运帷,等.计及电动汽车参与多元需求响应的微电网多时间尺度优化调度模型[J].电力建设,2023,44(10):51-62.
LIU Yourong, LIN Shunfu, SHEN Yunwei, et al. Multi-time-scale optimization scheduling model of microgrid with electric vehicles participating in multiple demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 51-62.
- [10] 吕振邦.电动汽车参与日前风电消纳的优化调度技术分析[J].山东电力技术,2021,48(5):8-15.
LYU Zhenbang. Analysis of optimal dispatching technology for electric vehicles participating in day-ahead wind power consumption[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(5): 8-15.
- [11] 高爽,戴如鑫.电动汽车集群参与调频辅助服务市场的充电调控策略[J].电力系统自动化,2023,47(18):60-67.
GAO Shuang, DAI Ruxin. Charging control strategy for electric vehicle aggregation participating in frequency regulation ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 60-67.
- [12] 贾士铎,康小宁,黑皓杰,等.基于V2G负荷反馈修正的电热氢综合能源系统多层协调优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(15):100-110.
JIA Shiduo, KANG Xiaoning, HEI Haojie, et al. Multi-layer coordinated optimal dispatch of electric-thermal-hydrogen integrated energy system based on V2G load feedback correction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 100-110.

- [13] 唐佳,王丹,贾宏杰,等.基于迟滞模型的集群电动汽车参与实时需求响应V2G控制策略研究[J].电网技术,2017,41(7):2155-2165.
TANG Jia, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. A study of V2G control strategies of aggregated electric vehicles for real-time demand response based on hysteresis model[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2155-2165.
- [14] 卢志刚,王荟敬,赵号,等.含V2G的虚拟电厂双层逆鲁棒优化调度策略[J].电网技术,2017,41(4):1245-1252.
LU Zhigang, WANG Huijing, ZHAO Hao, et al. Strategy of bilevel inverse robust optimization dispatch of virtual power plant containing V2G[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1245-1252.
- [15] 郭伟嘉,刘敦楠,王文,等.基于智能合约的电动汽车充电服务费自适应调整机制[J].电力自动化设备,2022,42(10):13-20.
GUO Weijia, LIU Dunnan, WANG Wen, et al. Adaptive adjustment mechanism of electric vehicle charging service fee based on smart contract[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 13-20.
- [16] 郭创新,刘洞宇,朱承治,等.电动汽车居民区充电负荷建模分析[J].电力自动化设备,2020,40(1):1-9.
GUO Chuangxin, LIU Dongyu, ZHU Chengzhi, et al. Modeling and analysis of electric vehicle charging load in residential area[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 1-9.
- [17] 张维戈,陈连福,黄彧,等.M/G/k排队模型在电动出租汽车充电排队系统中的应用[J].电网技术,2015,39(3):724-729.
ZHANG Weige, CHEN Lianfu, HUANG Yu, et al. Application of M/G/k queuing model in queuing system of electric taxi charging station[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 724-729.
- [18] 简川黔,刘继春,蒲天骄,等.共建共享模式下考虑需求响应的多售电主体风光储能容量优化方法[J].电力自动化设备,2021,41(9):206-214.
JIAN Chuanqian, LIU Jichun, PU Tianjiao, et al. Wind-photovoltaic-storage capacity optimization method for multiple electricity sell entities considering demand response under co-construction and sharing mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 206-214.
- [19] 孙毅,单禹钦,陈明昊,等.考虑生命周期与储能损耗的光-储系统低碳运行优化策略[J/OL].电力系统自动化,1-16[2024-08-05].https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20231019.2130.009.
SUN Yi, SHAN Yuqin, CHEN Minghao, et al. Emission-low-carbon operation optimization strategy for photovoltaic-energy storage system considering life cycle and energy storage degradation[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-16 [2024-08-05]. https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20231019.2130.009.
- [20] 马恒瑞,王波,高文忠,等.区域综合能源系统中储能设备参与辅助服务的运行优化[J].电力系统自动化,2019,43(8):34-40.
MA Hengrui, WANG Bo, GAO Wenzhong, et al. Operation optimization of energy storage equipment participating in auxiliary service in regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 34-40.
- [21] 丁佳昀,胡秦然,吴在军,等.低温环境下考虑电池寿命的微电网优化调度[J].中国电机工程学报,2024,44(10):3815-3824.
DING Jiayun, HU Qinran, WU Zaijun, et al. Optimal Scheduling of Microgrid Considering Battery Lifetime in Low-temperature Environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3815-3824.
- [22] 汤波,杨鹏,余光正,等.基于负荷峰谷耦合特性的中压配电网供区优化方法[J].中国电机工程学报,2022,42(19):7051-7062.
TANG Bo, YANG Peng, YU Guangzheng, et al. Power supply area optimization method of medium voltage distribution network based on load peak valley coupling characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7051-7062.
- [23] 赵亚威.多电源电力系统多目标优化调度与决策方法研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [24] 王星海,李鑫,王世坤,等.考虑分布式电源接入的配电网多目标优化重构方法研究[J].山东电力技术,2023,50(11):60-67.
WANG Xinghai, LI Xin, WANG Shikun, et al. Research on multi-objective optimization and reconfiguration method of distribution network considering distributed generation access[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(11): 60-67.
- [25] KUMAR A, PANT S. Analytical hierarchy process for sustainable agriculture: an overview[J]. MethodsX, 2023, 10: 101954.

收稿日期:2024-08-09

修回日期:2024-12-09

作者简介:

刘洋(1988),男,博士,高级工程师,主要研究方向为智能配电网;

于海东(1993),通信作者(vrblack@alumni.sjtu.edu.cn),男,硕士,工程师,主要研究方向为分布式电源接入的配电网;

刘文彬(1996),男,硕士,工程师,主要研究方向为交直流配电网;

文祥宇(1994),男,硕士,工程师,主要研究方向为配网智能感知;

刘明林(1981),男,高级工程师,主要研究方向为智能配电网。

(责任编辑 郑天茹)

雷击条件下柔性直流输电同杆并架线路相互影响仿真分析

陈瑞¹, 郑少明², 刘博^{1*}, 董鹏², 黄天啸¹

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045;

2. 国家电网有限公司华北分部, 北京 100053)

摘要:分析同杆并架线路之间的相互影响及雷电行波遇到同杆并架线路时的传播特点,并仿真了张北柔性直流输电工程阜延线路正极遭遇雷击的情况。通过仿真与实际波形的对比,分析了阜延线路正极及中延线路正极各侧的电压、电流波形特征及雷电波传播特征。结果表明,当雷电流击打到阜延线路后,雷电波向阜延线路两侧传播,因电磁耦合作用在中延线路上产生感应雷电波,并向两侧传播;同杆并架线路分界点两侧入射至分界点的不同模量行波会在分界点发生交叉折射,因此会造成中延线路两侧感应雷电波的不同;之后雷电波与感应雷电波在换流站侧均发生折射和反射。以上因素共同作用会造成同杆并架正常运行的线路电压和电流发生扰动,进而会造成行波保护动作。本研究对直流输电同杆并架线路在面对雷击时的预防和直流线路行波保护装置保护逻辑的设定有参考意义。

关键词:雷击;柔性直流输电;同杆并架线路;行波

中图分类号:TM721

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)07-0035-09

Simulation Analysis of the Interaction of Flexible HVDC Transmission Lines Erected on Same Tower Under Lightning Conditions

CHEN Rui¹, ZHENG Shaoming², LIU Bo^{1*}, DONG Peng², HUANG Tianxiao¹

(1. Electric Power Science Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. (North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100045, China; 2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China)

Abstract: In this paper, the interaction between the lines on the same tower and the propagation characteristics of lightning traveling waves when they encounter the lines on the same tower are analyzed, and the lightning strike on the positive pole of Fuyan line of Zhangbei Flexible HVDC Transmission Project is simulated. By comparing the simulation with the actual waveform, the characteristics of the positive electrode voltage and current waveform on each side of Fuyan line and Zhongyan line and the characteristics of lightning wave propagation are analyzed. The results showed that when the lightning current hit the Fuyan line, the lightning wave propagates to both sides of the Fuyan line, and induced lightning wave is generated on the Zhongyan line due to electromagnetic coupling, which propagates to both sides of the Fuyan line. Moreover, the travelling waves of different modulus incident on both sides of the line demarcation point will cross refract at the demarcation point, which causes the difference of induced lightning waves in two sides of the Zhongyan line. After that, both the lightning wave and the induced lightning wave are refracted and reflected at the converter station. The combined action of the above factors will cause the disturbance of the line voltage and current in the normal operation on the same tower, and can cause traveling wave protection action. This research have reference significance for the prevention measures when facing lightning strike on DC lines on the same tower and the setting of the relay protection logic of the DC line traveling wave relay protection device.

Keywords: lightning strike; flexible high voltage direct current; transmission lines erected on same tower; traveling wave

基金项目:国家电网有限公司华北分部科技项目“非故障雷击对线路保护动作行为影响机理及保护原理改进方法研究”(1100/2021-02002B)。

Science and Technology Project of North China Branch of State Grid Corporation of China “Study on the Influence Mechanism of Non-fault Lightning Strike on Line Protection Action Behavior and the Improvement Method of Protection Principle”(1100/2021-02002B)。

0 引言

张北柔性直流输电工程是集大规模新能源接入、多种能源互补和灵活消纳、直流电网构建等为一体的重大科技试验示范项目,其额定电压

为 ± 500 kV,建有康巴诺尔、阜康、中都、延庆四座换流站。其直流线路共计四条:中都—延庆(以下简称中延)、阜康—延庆(以下简称阜延)、中都—康巴诺尔(以下简称中诺)、康巴诺尔—阜康。该工程运行状态为四端联网两极运行。其中,以延庆换流站为起点,中延线与阜延线有一段同杆并架线路,长度为31.786 km。某日,阜延正极线距延庆换流站约46 km处遭雷击导致阜延线路及正常运行的中延线路行波保护动作,造成中延线路跳闸,显然该次发生在阜延线路上的雷击影响了中延线路的正常运行。由此可见,若中延或阜延线路任一段遭遇雷击时,雷电波可能会在同杆并架线路上产生作用,导致中延或阜延线路中的某条未遭雷击的正常运行线路电压电流产生相当程度的波动,从而可能引发行波保护动作,使保护失去选择性,对电网造成直接的重大影响。

雷击是各类输配电线路常见故障,研究人员针对雷电故障识别^[1]、耐雷性能^[2]、雷电特性^[3-4]、雷电防护^[5-7]、连续雷击^[8]、雷击过电压和暂态特征^[9-12]以及配电网雷击^[13-14]等方面均有较为深入的研究。而故障时,同杆并架的两条直流或两条交直流线路间存在的电磁耦合可能会对正常运行的线路造成影响。文献[15]利用实时数字仿真器对双极的直流工程进行建模,研究了同杆并架的两个直流系统间的相互影响。文献[16-17]从同杆并架直流线路的塔头布置、参数、电磁环境、雷电性能以及同杆并架双回直流输电系统间的相互影响、系统的可靠性等方面进行了分析。文献[18]研究了同塔交直流线路的容性耦合干扰问题。文献[19-20]分析了同塔的交流线路对直流线路的影响。文献[21-22]剖析了直流线路过电压产生机理,并针对不同工况下直流线路过电压沿线分布特性和内过电压水平进行电磁暂态仿真计算。文献[23]依据局部同塔双回直流线路分界点各侧的线路段的相模变换,获取了不同线路段入射分界点时各电压模量行波的交叉折射系数,据此分析了对局部同塔双回线路不同线路区段发生单极接地故障时的故障行波传播特性,比较了其单回线路及完全同塔双回线路的差异。本文依托张北柔性直流输电工程的一次雷击事件,基于电磁暂态仿真程序,通过仿真波形与现场实际波形的对比,分析了一回直流线路遭遇雷击时对同杆并架的另一

条线路造成的影响。

1 同杆并架线路相互影响的理论分析

1.1 两条导线的耦合

在高压直流输电线路中,当雷电波注入其中一根极导线(导线1)时,会因电磁耦合作用在同杆并架的另一线路的极导线(导线2)中产生感应的电压电流。当消去地线时,这两条同杆并架的导线其耦合关系方程^[21]可描述为

$$\begin{cases} u_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 \\ u_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Z_{11} 、 Z_{22} 分别为导线1、2的自波阻抗; Z_{12} 、 Z_{21} 为导线的互波阻抗; u_1 、 u_2 为导线1、2的电压; i_1 、 i_2 为导线1、2的电流。

自波阻抗和互波阻抗的计算公式^[22]为

$$\begin{cases} Z_{11} = Z_{22} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{h_1 + h'_1}{r_{eq}} \\ Z_{12} = Z_{21} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{H_{12}}{D_{12}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为空气的介电系数; μ_0 为空气的导磁系数; r_{eq} 为直流导线的等值半径; h_1 为导线1的对地距离; h'_1 为导线1的对地镜像与地面的距离; D_{12} 为导线1、2之间的间距; H_{12} 为导线2的对地镜像与导线1之间的距离。当大地为理想导体时, $h_1 = h'_1$;实际中大地为非理想导体,因此 $h_1 < h'_1$ ^[21-22]。

稳态运行时直流导线1的电压为 U_x ,直流导线1发生雷击时其电压变为 U_y ,则根据叠加定理等效为在雷击点施加一个幅值为 $-(U_x - U_y)$ 的直流电压源,相应在导线1上将出现一个幅值为 $-(U_x - U_y)$ 的前行波,此波将通过式(1)的电磁耦合作用在导线2上产生一个感应电压行波。

1.2 雷电行波的传播

直流线路遭遇雷击后,雷电波从注入点向线路两端传播。由于站端阻抗和线路波阻抗的数值差异,当雷电波传播到线路末端的换流站后,会产生折射及反射,反射波将会沿原导线按先前入射波的反方向传播;折射波进入换流站以及通过换流站的电气连接流入同杆并架的另一条线路中,进入同杆并架的另一条线路中的折射波与原前行波的方向相反。

当某一直流线路(导线1)上遭遇雷击时,该导线的电压 u_1 应满足

$$u_1 = u_i + u_b + u_{ir} \quad (3)$$

式中: u_i 为雷电行波; u_b 为反射雷电行波; u_{ir} 为其他导线的感应雷电波折射波。

而同杆并架的另一条线路(导线2)上的电压 u_2 应满足

$$u_2 = u_i + u_r + u_{ib} \quad (4)$$

式中: u_i 为感应雷电波; u_r 为雷电波折射电压行波; u_{ib} 为感应雷电波反射波。

综上,理论上同杆并架的两条直流线路导线,在其中一条导线发生扰动,的情况下,产生的暂态分量会因电磁耦合关系及折、反射作用影响同杆并架其他正常运行的极导线。

1.3 模量的变换

1.3.1 两条导线之间的变换

定义线路电压的地模分量 u_{m1} 和线模分量 u_{m2} 为^[22]

$$\begin{cases} u_{m1} = u_1 + u_2 \\ u_{m2} = u_1 - u_2 \end{cases} \quad (5)$$

则距离故障点 l 处的电压为

$$\begin{cases} \Delta u_{1l} = 0.5(\Delta u_{m1l} + \Delta u_{m2l}) \\ \Delta u_{2l} = 0.5(\Delta u_{m1l} - \Delta u_{m2l}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: Δu_{1l} 为导线1在距离故障点 l 处的电压变化量; Δu_{2l} 为导线2在距离故障点 l 处的电压变化量; Δu_{m1l} 为距离故障点 l 处电压变化量的地模分量; Δu_{m2l} 为距离故障点 l 处电压变化量的线模分量^[22]。

1.3.2 不同线路段的变换

对于同杆并架线路段,可将其电压、电流转变为相互独立的模量^[23],即

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{\text{mode}} = \mathbf{T}_v^{-1} \mathbf{U}_{\text{phase}} \\ \mathbf{I}_{\text{mode}} = \mathbf{T}_i^{-1} \mathbf{I}_{\text{phase}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{U}_{\text{phase}} = [U_{1P}, U_{1N}, U_{2P}, U_{2N}]^T$ 为双回线路段极线电压相量列矩阵; $\mathbf{I}_{\text{phase}} = [I_{1P}, I_{1N}, I_{2P}, I_{2N}]^T$ 为双回线路段极线电流相量列矩阵;下标1P、1N及2P、2N分别表示同塔架设的I回线路的正极、负极及II回线路的正极、负极; $\mathbf{U}_{\text{mode}} = [U_0, U_1, U_2, U_3]^T$ 为双回线路段极线电压模量列矩阵; $\mathbf{I}_{\text{mode}} = [I_0, I_1, I_2, I_3]^T$ 为双回线路段极线电流模量列矩阵;下标0、1、2、3分别表示地模、线模1、线模2和线模3分量; $\mathbf{T}_v$ 、 $\mathbf{T}_i$ 分别为同杆并架线路段的电压、电流变换矩阵。

而对于单回线路段,则有^[23]

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{j\text{-mode}} = \mathbf{Q}_{jv}^{-1} \mathbf{U}_{j\text{-phase}} \\ \mathbf{I}_{j\text{-mode}} = \mathbf{Q}_{ji}^{-1} \mathbf{I}_{j\text{-phase}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{U}_{j\text{-phase}} = [U_{jP}, U_{jN}]^T$ 、 $\mathbf{I}_{j\text{-phase}} = [I_{jP}, I_{jN}]^T$ 分别为第 j 个单回线路段的电压、电流相量列矩阵;下标P、N分别表示线路的正、负极; $\mathbf{U}_{j\text{-mode}} = [U_{j1}, U_{j0}]^T$ 、 $\mathbf{I}_{j\text{-mode}} = [I_{j1}, I_{j0}]^T$ 分别为第 j 个单回线路段的电压、电流模量列矩阵; $\mathbf{Q}_{jv}$ 、 $\mathbf{Q}_{ji}$ 为第 j 个单回线路段的电压和电流相模变换矩阵; $j \in \{I, II\}$ 。

由以上相模变换可知,同杆并架双回线路段有四个模量通道,而单回线路段有两个模量通道。雷电行波入射至分界点后,在分界点处将存在相互间的耦合,即从分界点两侧入射至分界点的不同模量行波会在分界点发生交叉折射。这可分为两种情况,即行波从单回线路段入射到同杆并架线路段以及行波从同杆并架线路段入射到单回线路段。

当雷电流行波从单回线路段入射到同杆并架线路段时,有公式为

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & g & 0 & h \\ 0 & q & 0 & r \\ k & 0 & p & 0 \\ k & 0 & -p & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{10} \\ I_{11} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: I_{10} 为雷电流在第I个单回线路段的地模分量; I_{11} 为雷电流在第I个单回线路段的线模1分量; g 、 h 、 q 、 r 、 k 、 p 为单回线入射系数,均由局部同杆并架直流线路的参数决定^[23]。

根据式(9),单回线的线模分量入射分界点后折射产生同杆并架双回线的线模2和线模3分量;而单回线地模分量入射分界点后,折射产生同杆并架双回线的线模1和地模分量。

而当行波从同杆并架双回线入射到多个单回线时,有

$$\begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{10} \\ I_{11} \\ I_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a & a \\ b & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d & -d \\ e & m & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: I_{10} 为雷电流在第II个单回线路段的地模分量; I_{11} 为雷电流在第II个单回线路段的线模1分量; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 m 为双回线入射系数,均由局部同杆并架直流线路的参数决定^[23]。

根据式(10),同杆并架双回线的线模2或线模3

入射分界点时,折射产生单回线的线模分量;同杆并架双回线的线模1或地模分量入射分界点时折射产生单回线的地模分量。

2 仿真模型及条件

2.1 系统模型

建立张北四端柔直工程PSCAD仿真模型。模型中每条线路均为双极运行,有导线4条,分别为极1、极2以及2条金属回线。设置极1与金属回线间为+500 kV直流电源;极2与金属回线间为-500 kV直流电源,以模拟四条线路的运行状态。中延线长度为214.821 km,阜延线长度为190.282 km;中诺线长度为49.222 km;康巴诺尔—阜康线长度为204.032 km。

直流线路出线端分别设置串联电抗器,其数值设置为150 mH;换流器中性点侧设置中性点电抗器,中都、延庆为150 mH,康巴诺尔、阜康为300 mH。中都、延庆换流站子模块等效电容为187.5 μF ,康巴诺尔、阜康换流站子模块等效电容为100 μF 。中延、阜延线路极1、极2的出线端分别设置避雷器,其伏安特性曲线由实际避雷器曲线拟合设置。模型仿真步长为5 μs ,以适应雷电波脉冲时间短的特性。

张北四端直流仿真系统如图1所示。

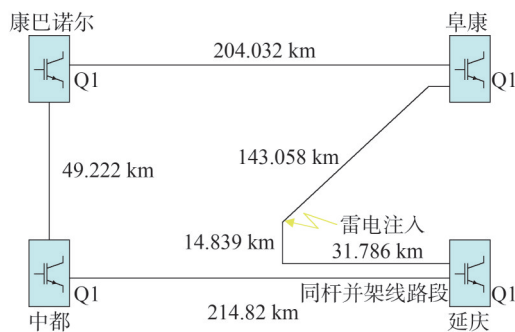


图1 张北四端直流仿真系统

Fig.1 Zhangbei four-terminal DC simulation system

仿真中, I_{a1} 为阜延线延庆侧正极的电流; I_{a3} 为阜延线距延庆侧15.893 km处(同杆并架线路中段处)正极的电流; I_{a5} 为阜延线距延庆侧31.786 km处(同杆并架线路末端)正极的电流; I_{a7} 为阜延线阜康侧正极的电流; I_{a2} 为中延线延庆侧正极的电流; I_{a4} 为中延线距延庆侧15.893 km处(同杆并架线路中段处)正

极的电流; I_{a6} 为中延线距延庆侧31.786 km处(同杆并架线路末端)正极的电流; I_{a8} 为中延线距延庆侧41.786 km处(独立架空线)正极的电流; I_{a10} 为中延中都侧正极的电流。以上各点均以面向雷电波注入点的方向为电流正方向。

2.2 杆塔及雷击模型

四条直流输电线路采用杆塔模型,根据直流线路典型杆塔结构,分单回线及双回线两种塔型进行建模,导线型号为JL/G2A-720/50。

设置雷电注入点位置处于阜延线正极,距离延庆换流站46.625 km。注入的雷电流采用标准雷电流1.2/50 μs ,幅值为50 kA。实际注入线路为-50 kA。设置雷击发生在仿真开始后0.3 s。

3 波形分析

3.1 阜延线路情况

3.1.1 阜延线路延庆侧

电压电流波形如图2所示。

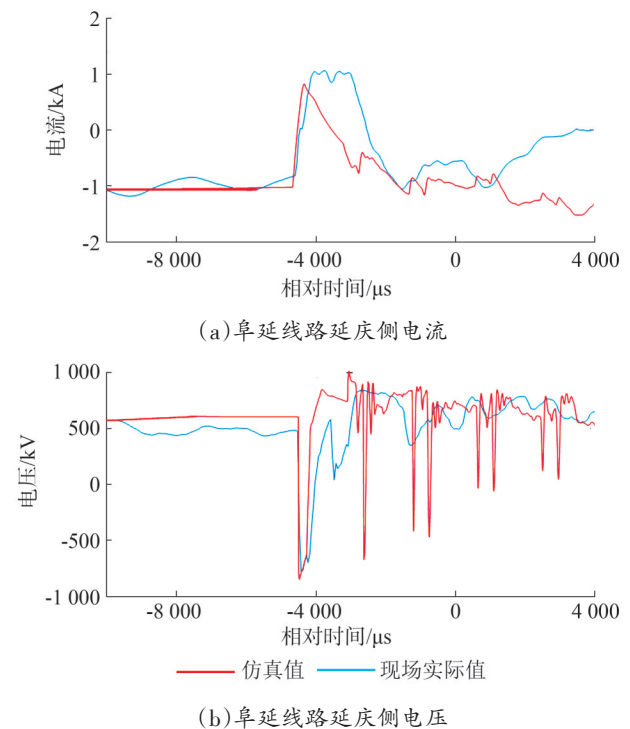


图2 阜延线路延庆侧电流电压

Fig.2 Current and voltage of Yanqing side of Fuyan line

仿真中,雷击后约160 μs ,雷电波行进至延庆换流站,此时延庆站线路电流上升,峰值为1.23 kA,线

路电压下降,降低至 $-1\ 000\ \text{kV}$;现场波形中,雷击后电延庆站电流上升到 $1.04\ \text{kA}$,电压下降到 $-780\ \text{kV}$ 。可见,雷击到阜延线路后,雷电流经直流线路传播到延庆换流站侧的波形特征为电流上升、电压下降。

3.1.2 阜延线路阜康侧

电压电流波形如图3所示。

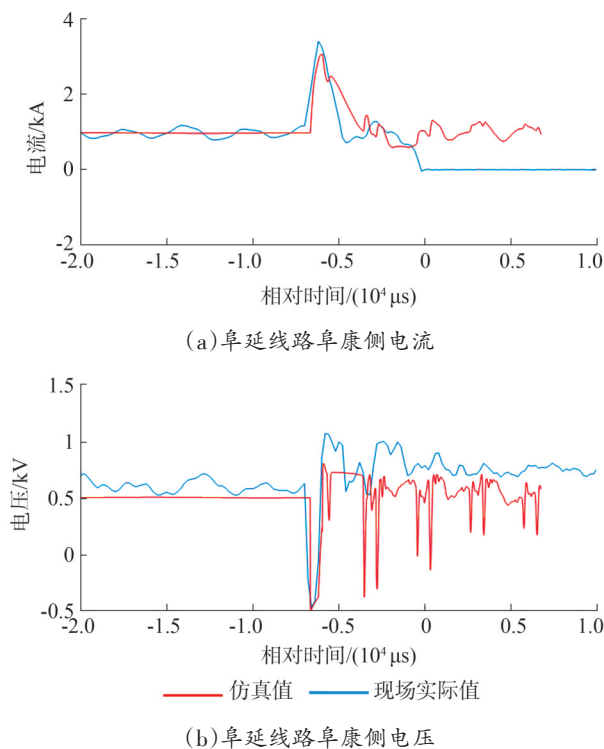


图3 阜延线路阜康侧电流电压

Fig.3 Current and voltage of Fukang side of Fuyan line

仿真中,雷击后约 $480\ \mu\text{s}$,雷电波行进至阜康换流站。阜康站线路电流上升,峰值为 $1.26\ \text{kA}$,线路电压下降,降低至 $-1\ 000\ \text{kV}$;现场波形中,雷击后延庆站电流上升到 $3.4\ \text{kA}$,电压下降到 $-460\ \text{kV}$ 。可见,雷击到阜延线路后,雷电流经直流线路传播到阜康换流站侧的波形特征为电流上升、电压下降。

雷击到直流线路时,雷电波从雷电注入点向线路两端传播,传播速度略小于光速;并且造成本线路两端电流上升、电压下降。在仿真与现场实际波形中,雷电波及感应雷电波进入换流站后,换流站的电压电流又有数次波动,这是因为行波进入换流站时发生折、反射,折、反射波在线路上行进并产生多次折、反射导致的,其数值应遵循式(3)。

3.2 线路同杆并架造成的影响

3.2.1 中延线路中都侧

仿真电压电流波形如图4所示。

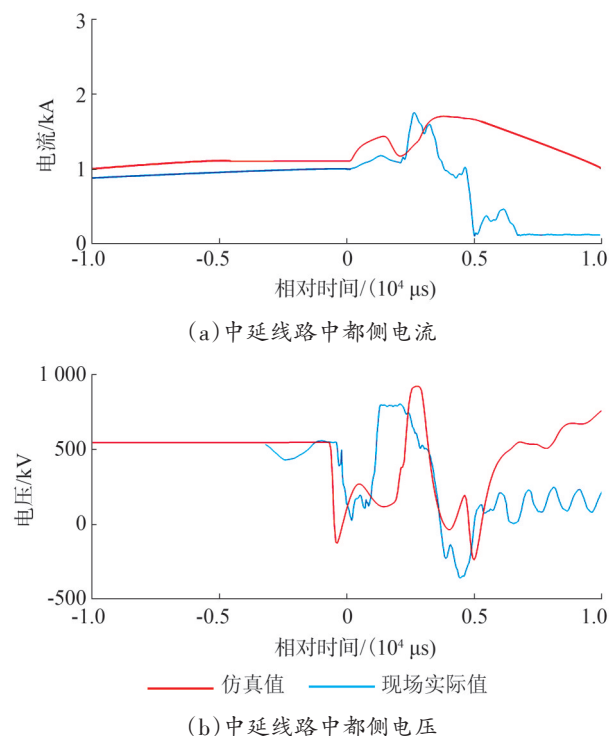


图4 中延线路中都侧电流电压

Fig.4 Current and voltage of Zhongdu side of Zhongyan line

仿真中,雷击后 $655\ \mu\text{s}$,雷电波行进至中都站,中都换流站电压电流首次发生变化。以雷电波理论行进速度 $300\ 000\ \text{km/s}$ 计算(本文所有计算均采用此速度),雷电波首次行进至中都站的理论行波距离约为 $196.5\ \text{km}$ 。该距离说明了雷电波首次传播到中都换流站的过程为:雷击阜延线正极后,雷电波沿着阜延线向延庆站传播,行进 $14.839\ \text{km}$ 传播至距延庆站 $31.786\ \text{km}$ 处的中延、阜延同杆并架线路末端时,在中延线路正极上产生感应行波,该感应行波继续向中都侧行进 $183.035\ \text{km}$ 后到达中都侧。雷电波首次行进至中都站的实际行波距离为 $197.874\ \text{km}$,与理论行波距离基本一致。

雷电波行进至中都站,中都站线路电流上升,峰值为 $0.43\ \text{kA}$,线路电压下降,降低至 $50\ \text{kV}$;现场波形中,雷击后中都站电流上升到 $1.8\ \text{kA}$,电压下降到 $-380\ \text{kV}$ 。

后续中都站电压发生第二次下降,该过程距雷

击发生时刻约为 $900\ \mu\text{s}$, 导致电压二次下降的行波行进至中都站的理论行波距离约为 $270\ \text{km}$ 。实际传播过程中, 雷击中阜延线正极后, 雷电波沿着阜延线向延庆站传播, 行进 $46.625\ \text{km}$ 传播至延庆站后经过折射进入中延线路, 并在延线路行进 $214.821\ \text{km}$ 后到达中都侧。根据以上过程可得出雷电波经延庆站折射进入中延线路并行波至中都站的实际行波距离为 $261.446\ \text{km}$, 与理论行波距离基本一致。雷击阜延线正极后, 雷电波沿阜延线向延庆站传播, 行进 $14.839\ \text{km}$ 传播至距延庆站 $31.786\ \text{km}$ 处的中延、阜延同杆并架线路末端时, 在中延线路正极上产生感应行波, 该感应行波继续向延庆侧行进 $31.786\ \text{km}$ 后到达延庆侧, 再经反射后沿着中延线路行进全长 $214.821\ \text{km}$ 后到达中都侧。根据以上过程可得出感应雷电波第二次行进至中都站的实际行波距离亦为 $261.446\ \text{km}$, 与理论行波距离基本一致。感应雷电波第二次行进至中都站的时间与雷电波经折射第二次行进至中都站的时间相同(行波距离相同)。因此雷电波的折射与感应雷电波的反射共同造成了中都站电压的二次下降。

为进一步对比分析雷电波在同杆并架线路上的感应情况。另外搭建了没有同杆并架线路的张北柔直四端模型进行对比分析, 在该模型中模拟同位置雷击事件, 考察中延线路距延庆站 $31.786\ \text{km}$ 处(同杆并架线路末端)电压 N_6 , 可对比有、无感应雷电波时的电压区别。波形对比如图5所示。

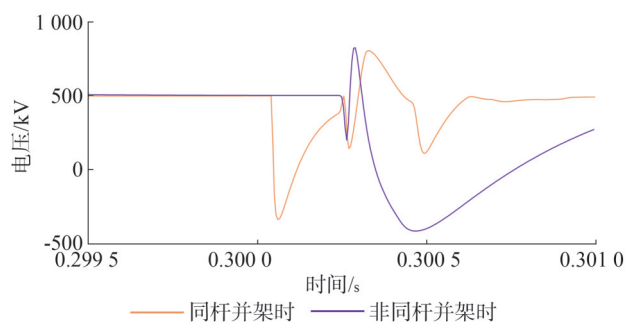


图5 感应电压对比

Fig.5 Comparison of induced voltages

同杆并架线路的电压波形表明, 在雷击后, 当雷电波传输到同杆并架线路阜延线路上时, 感应出负向电压, N_6 降低到 $-300\ \text{kV}$, 从而使中都站产生较大

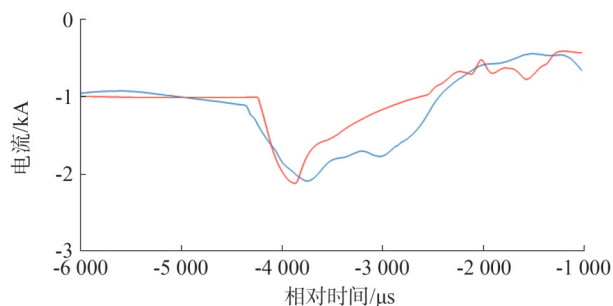
的电压降低, 即中都站电压波形的第一次下降; 并且如上文所述, 中都站有两次明显的电压下降过程。而对于非同杆并架线路, 其在相同的雷电波传输时间内, 没有任何感应电压, 当雷电波通过延庆站折射后, N_6 才出现了波动。可以得出, 在同杆并架的两条直流线路上, 明显存在雷电波电压感应现象。

同时, 图5中可以看出同杆并架线路的电压波形中电压的第二次下降与非同杆并架线路的电压波动发生在同一时刻, 这也从另一角度说明了同杆并架线路的电压波形中电压的第二次下降是由于雷电波经延庆换流站折射进入中延线路以及感应雷电波的反射共同造成的。

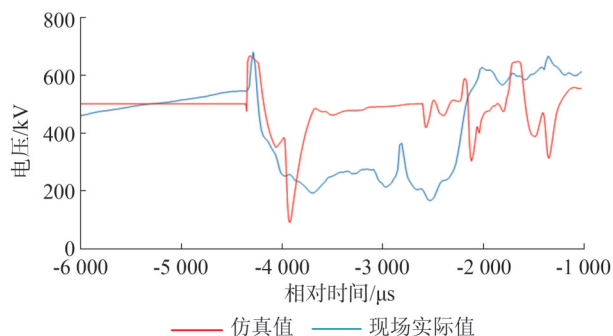
根据上述对比分析, 当雷电波传播至同杆并架线路一侧时, 即在另一条正常运行的线路上产生感应雷电波; 并且在同杆并架的另一条线路上, 由于感应雷电波、经换流站的折射雷电波以及感应雷电波反射波的共同叠加作用, 中延线路中都侧电压遵循式(4)呈现出先下降后回升再下降的趋势, 如图4所示。仿真电压波形整体特征与现场录波情况一致。

3.2.2 中延线路延庆侧

仿真电压电流波形如图6所示。



(a) 中延线路延庆侧电流



(b) 中延线路延庆侧电压

图6 中延线路延庆侧电流电压

Fig.6 Current and voltage of Yanqing side of Zhongyan line

仿真中,雷击后 $155 \mu\text{s}$,雷电波行进至延庆换流站,延庆站电压电流首次发生变化,雷电波首次行进至延庆站的理论行波距离约为 46.5 km 。该距离说明了雷电波沿中延线路传播到延庆换流站的过程为:雷击阜延线正极后,雷电波沿阜延线向延庆站传播,行进 14.839 km 传播至距延庆站 31.786 km 处的中延、阜延同杆并架线路末端时,在中延线路正极上产生感应行波,该感应行波继续向延庆侧行进 31.786 km 后到达延庆侧。雷电波沿中延线路行进至延庆站的实际行波距离为 46.625 km ,与理论行波距离基本一致。

在仿真及现场实际波形中,中延线路延庆侧的电压均出现短暂上升而后下降的情况。这是由于实际中,线模分量波速略小于地模分量波速,根据式(6)可知,电压变化的线模分量会先于地模分量抵达导线2上距离故障点 l 处。因此,对于中延线路延庆侧,线模分量的率先抵达会先感应出一个反向电压,等到地模分量抵达后才开始变为正向。所以中延线路延庆换流站侧的电压表现为先上升(反向)再下降(正向)。

同杆并架线路中点电流波形如图7所示。

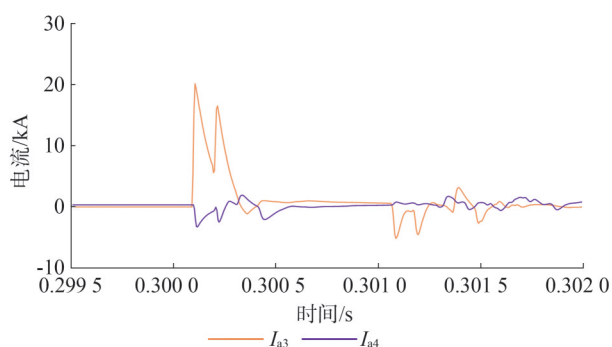


图7 同杆并架线路中点电流对比

Fig.7 Comparison of midpoint currents of lines erected on same tower

图7中 I_{a3} 、 I_{a4} 电流波形均有二个尖峰。 I_{a3} 的第一个尖峰产生在雷击后约 $60 \mu\text{s}$,峰值约为 20 kA 。同时在中延线路上感应出约 -2.3 kA 的感应电流,为 I_{a4} 的第一个尖峰。之后,阜延线路上的雷电波与中延线路上的感应雷电波均向延庆侧行进,并在延庆换流站同时发生折射、反射,其各自的折射、反射波再分别流入阜延、中延线路,并向远离延庆侧的方向行进,经过相同时间再次抵达同杆并架线路中点。

其中,雷电波的反射波与感应雷电波的折射波叠加形成 I_{a3} 的第二个尖峰(遵循式(3));雷电波的折射波与感应雷电波的反射波叠加形成 I_{a4} 的第二个尖峰(遵循式(4))。 I_{a3} 及 I_{a4} 的第二次尖峰距第一次尖峰均约为 $120 \mu\text{s}$,雷电波在两次尖峰间的理论行波距离约为 36 km ;而雷电波及感应雷电波从同杆并架线路中点出发行进至延庆换流站分别发生折、反射再返回同杆并架线路中点的实际距离为 31.786 km 。考虑雷电波的实际传播速度小于理论速度,该实际距离也略小于理论行波距离。因此 I_{a3} 及 I_{a4} 的第二次尖峰的产生原因正如上所述。

另外,根据仿真电流峰值可以发现,感应雷电波比雷电波幅值缩小了一个数量级,因此分析中可忽略感应雷电波的再次感应作用。

仿真波形中,在模拟雷击点注入的雷电流为负时,阜延线路上的 I_{a5} 、 I_{a3} 、 I_{a1} 在雷电波到达时其值均为正,而中延线路上 I_{a4} 、 I_{a2} 在感应雷电波到达时均为负,中延线路上 I_{a6} 、 I_{a10} 在感应雷电波到达时却均为正(当现场有相应测点时,以上电流极性与现场实际测得的电流波形极性一致);再结合所有电流均以面向雷电波注入点的方向为正方向,因此可以判断出当为负值的雷电流波到达同杆并架线路末端时,感应出一个正电流波沿着中延线路同杆并架段向延庆站传播,同时感应出一个负电流波沿着中延线路向中都站传播。可见,中延线路上沿不同方向传播的感应雷电流不同。

当雷电流行波从单回线路入射到同杆并架线路段时,即对应本次事件中雷电流波到达同杆并架线路末端时,感应出一个正电流波沿着中延线路同杆并架段向延庆站传播,其机理如式(9)所示;而当行波从同杆并架线路入射到单回线路段时,即对应本次事件中雷电流波到达同杆并架线路末端时,同时感应出一个负电流波沿着中延线路(非同杆并架段)向中都站传播,其机理如式(10)所示。综上,正是因为分界点(同杆并架线路末端)处发生交叉折射分为以上两种情况,两者机理不同,从而导致了中延线路上沿不同方向传播的感应雷电流不同,因此其极性也可能会不同。

4 结束语

仿真分析张北柔性直流输电工程阜延线路正极

遭遇雷击的情况。通过仿真与实际波形的对比,分析了阜延线路正极及中延线路正极各侧的电压、电流波形特征及雷电波传播特征。结果表明,同杆并架的两条直流线路间存在明显电磁耦合,在直流系统其中一条线路发生扰动的情况下,产生的暂态分量会因电磁耦合关系及行波折、反射等因素影响到同杆并架正常运行的其他线路,会造成正常运行的线路电压、电流发生扰动。

仿真中的电气量波形与实际波形存在一定误差,导致误差的因素为:一是由于柔性直流变电站仿真模型中的直流正负极等效电源直接采用了直流电源替代,与实际中通过控制保护装置控制并由交流侧整流而成的直流电气量必然会存在一定差异;二是对于线路分布电容,仿真模型与真实线路存在差异,即仿真采用典型工程杆塔参数建模,但实际工程由于跨越山川等问题,模型与实际对地分布参数无法完全一致;三是避雷器模型中使用的避雷器伏安曲线与实际避雷器肯定存在一定差异,且其泄放电流与泄放电压均会造成仿真与实际波形的误差;四是实际中在本次故障前,有一次较小的没有造成跳闸的雷击,这次雷击的作用使运行电流本身存在一定的波动。

本次雷击其雷电流击打到阜延线路上后,雷电波向阜延线路两侧传播,并在阜延、中延同杆并架线路末端处因电磁耦合作用在中延线路上产生感应雷电波,感应雷电波也向中延线路两侧传播;并且,同杆并架线路分界点两侧入射至分界点的不同模量行波会在分界点发生交叉折射,因此会造成中延线路两侧感应雷电波的不同;雷电波与感应雷电波在换流站侧均发生折射和反射,折射波流入另一条线路,反射波再次流入本线路。最终所有雷电波通过延庆站接地电阻泄放到大地。线路上的电气量变化是电磁耦合与行波折、反射共同叠加作用的结果。

参考文献

- [1] 邹贵彬,高厚磊,朱峰,等.输电线路雷击与故障的积分识别方法[J].电力系统保护与控制,2012,40(9):43-48.
ZOU Guibin, GAO Houlei, ZHU Feng, et al. Integral identification method of lightning stroke and fault for transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 43-48.
- [2] 李永明,逯文佳,高彬桓,等. ± 800 kV 锡泰线黄河大跨越区段耐雷性能分析[J].山东电力技术,2021,48(8):49-53.
LI Yongming, LU Wenjia, GAO Binhan, et al. Lightning withstand performance analysis of ± 800 kV xitai transmission line in Yellow River long span section[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(8): 49-53.
- [3] 刘三伟,王峰,张柳,等.考虑地线电晕影响的雷击输电线路杆塔的时域有限差分分析[J].山东电力技术,2018,45(5):19-23.
LIU Sanwei, WANG Feng, ZHANG Liu, et al. Analysis on lightning transmission towers with ground corona based on FDTD [J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(5): 19-23.
- [4] 师伟,郑建,任敬国,等.一种计算输电线路上行连接先导速度的新方法[J].山东电力技术,2017,44(11):5-10.
SHI Wei, ZHENG Jian, REN Jingguo, et al. A novel approach for calculating the velocity of lightning upward connecting leader initiated from transmission lines [J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(11): 5-10.
- [5] 赵淳,阮江军,李晓岚,等.输电线路综合防雷措施技术经济性评估[J].高电压技术,2011,37(2):290-297.
ZHAO Chun, RUAN Jiangjun, LI Xiaolan, et al. Technology and economy evaluation of comprehensive transmission line lightning protection measures [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 290-297.
- [6] 何金良,曾嵘,陈水明.输电线路雷电防护技术研究(三):防护措施[J].高电压技术,2009,35(12):2917-2923.
HE Jinliang, ZENG Rong, CHEN Shuiming. Lightning protection study of transmission line, part III: protection measures [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2917-2923.
- [7] 莫付江,陈允平,阮江军.输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J].电网技术,2004,28(21):80-84.
MO Fujiang, CHEN Yunping, RUAN Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation [J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 80-84.
- [8] 王佩,吴敏,赵淳,等.重要输电通道连续雷击评估方法研究[J].高压电器,2019,55(8):178-185.
WANG Pei, WU Min, ZHAO Chun, et al. Method for calculating continuous lightning strikes on important transmission paths [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 178-185.
- [9] 鄂盛龙,文习山,蓝磊,等.平原和山区同塔双回特高压输电线路雷击特性模拟试验[J].电网技术,2015,39(1):118-122.
E Shenglong, WEN Xishan, LAN Lei, et al. Scaled model test on lightning stroke performance of UHV double-circuit transmission lines in plain and mountain areas [J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 118-122.
- [10] 武利会,陈道品,陈斯翔,等.输电线路杆塔与接地装置的雷击暂态响应建模分析[J].电瓷避雷器,2020(1):129-135.
WU Lihui, CHEN Daopin, CHEN Sixiang, et al. Modeling and analysis of lightning transient response of transmission line tower and grounding device [J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 129-135.

- [11] 周蛟,陈小月.雷击交流侧同塔双回线路时换流站过电压特性[J].电瓷避雷器,2020(2):162-167.
ZHOU Jiao, CHEN Xiaoyue. The overvoltage characteristics of converter station when lightning strikes to the double-circuit system of 500 kV AC side[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020 (2):162-167.
- [12] 吕哲,王增平.基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(6):18-26.
LÜ Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(6):18-26.
- [13] 于建立,樊亚东,王建国,等.大地电导率和线路长度对10kV架空线路雷电感应电压的影响[J].中国电机工程学报,2020,40(2):672-684.
YU Jianli, FAN Yadong, WANG Jianguo, et al. Effect of earth conductivity and length of line on lightning induced voltage of 10kV overhead distribution lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(2):672-684.
- [14] 文云山,彭向阳,解广润.架空配电线路感应雷过电压的数值计算[J].中国电机工程学报,1998,18(4):76-78.
WEN Xishan, PENG Xiangyang, XIE Guangrun. Numerical calculation of induced lightning overvoltage of overhead distribution lines [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (4) : 76-78.
- [15] 张民,石岩.同杆并架±500 kV直流系统间相互影响的实时仿真分析[J].电网技术,2007,31(1):44-49.
ZHANG Min, SHI Yan. Real-time digital simulation analysis on interaction between two ±500 kV HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Technology, 2007,31(1):44-49.
- [16] 石岩,王庆,聂定珍,等. ±500 kV 直流输电工程同杆并架技术的综合研究[J]. 电网技术,2006,30(21):1-6.
SHI Yan, WANG Qing, NIE Dingzhen, et al. Comprehensive study on technology of two bipole lines on the same tower for ±500 kV HVDC project [J]. Power System Technology, 2006,30(21): 1-6.
- [17] 赵良,郭强,覃琴,等.±660 kV同塔双回直流线路与其送/受端交流系统的相互影响[J].电网技术,2009,33(19):83-86.
ZHAO Liang, GUO Qiang, QIN Qin, et al. Research on interaction of ±660 kV power transmission project adopting layout of double-circuit on the same tower with AC power systems at its sending and receiving ends [J]. Power System Technology, 2009, 33 (19) : 83-86.
- [18] 任姝,何为,杨帆,等.同塔交直流线路容性耦合干扰的分析与计算[J].高压电器,2012,48(4):39-45.
REN Shu, HE Wei, YANG Fan, et al. Analysis and calculation for the capacitive coupling of the AC and DC transmission lines on one tower[J]. High Voltage Apparatus, 2012,48(4):39-45.
- [19] 周沛洪,修木洪,聂定珍.同廊道架设交直流线路的相互影响[J].高电压技术,2003,29(9):5-7.
ZHOU Peihong, XIU Muhong, NIE Dingzhen. The influence between AC and DC transmission line built in same corridor[J]. High Voltage Engineering, 2003,29(9):5-7.
- [20] 李新年,蒋卫平,李涛,等.交流线路对平行架设特高压直流线路的影响及限制措施[J].电网技术,2008,32(11):1-6.
LI Xinnian, JIANG Weiping, LI Tao, et al. Influence of AC transmission lines on parallelly erected UHVDC transmission lines and suppression measures [J]. Power System Technology, 2008, 32 (11):1-6.
- [21] 董鹏,朱颖颖,习工伟,等.特高压直流输电线路内过电压仿真及机理分析[J].电网技术,2017,41(4):1114-1123.
DONG Peng, ZHU Yiyong, XI Gongwei, et al. Simulation and mechanism analysis of internal overvoltage of UHVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2017,41(4):1114-1123.
- [22] 刘晓琳,曹泽宇,高丙团,等. HVDC送端交流系统故障暂态过电压评估指标[J]. 电力建设, 2023, 44(1): 64-72.
LIU Xiaolin, CAO Zeyu, GAO Bingtuan, et al. Evaluation index of transient overvoltage during fault at HVDC sending-end AC system [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 64-72.
- [23] 李海峰,郭履星,王钢,等.局部同塔双回直流线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(11):51-60.
LI Haifeng, GUO Lüxing, WANG Gang, et al. Propagation characteristics of fault travelling wave on double-circuit HVDC transmission lines partially on the same tower and its effect on travelling wave protection [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(11):51-60.

收稿日期:2024-10-09

修回日期:2024-12-05

作者简介:

陈 瑞(1989),男,硕士,高级工程师,研究方向为柔性直流电网控制保护技术;

郑少明(1983),男,博士,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作;

刘 博(1991),通信作者(812513178@qq.com),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制技术;

董 鹏(1985),男,博士,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作;

黄天啸(1986),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.07.005

面向MMC-HVDC换流站的构网型和跟网型 控制无缝切换技术

孙孔明^{1,2}, 李 宽^{1,2}, 冯忆文³, 张远实^{3*}

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 山东省智能电网技术创新中心, 山东 济南 250101;
3. 东南大学, 江苏 南京 210096)

摘要:“双碳”目标的确立推动了新能源的快速发展。大规模电力电子设备的接入,使得电网呈现低惯量的特性。基于模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电系统在连接弱电网的场景下,其换流站采用虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制来模拟同步发电机的机械特性,可以为新能源系统提供惯量支撑。为满足不同工况,换流站需要在两种控制模式——构网型控制和跟网型控制之间进行切换。文中提出了一种MMC-高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)换流站构网型和跟网型控制无缝切换技术,在不改变内环电流控制的前提下,通过构建构网型和跟网型控制统一的外环参考电流,保证换流站输出电压在切换过程中功角和幅值的连续性。仿真结果表明,所提的无缝切换技术可以有效降低控制切换过程对系统造成的过流或者过压影响。

关键词:构网型;跟网型;虚拟同步机;柔性直流输电;模块化多电平变流器

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)07-0044-10

Seamless Switching Method Between Grid-forming and Grid-following Control for MMC-HVDC Converter Stations

SUN Kongming^{1,2}, LI Kuan^{1,2}, FENG Yiwen³, ZHANG Yuanshi^{3*}

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;
2. Shandong Smart Grid Technology Innovation Center, Jinan 250101, China;
3. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The establishment of the dual-carbon goal has promoted the rapid development of renewable energies. The access of large-scale power electronic equipment makes the power grid present a low inertia characteristic. Flexible DC transmission systems based on the modular multilevel converter (MMC) can provide inertia support for the new energy system by using virtual synchronous generator (VSG) control to simulate the mechanical characteristics of synchronous generators in the scenario of connecting to a weak grid. This can provide inertia support for the new energy system. To satisfy different working conditions, the converter station needs to switch between two control modes, including grid-forming control and grid-following control. In this paper, a seamless switching technique between grid-forming and grid-following control is proposed for MMC-HVDC converter stations. Without modifying the inner-loop current control, a unified outer-loop reference current is constructed for both control modes, ensuring continuity of the output voltage's phase angle and amplitude during the switching process. Simulation results show that the proposed seamless switching technique can effectively reduce the impact on the system caused by the control switching process.

Keywords: grid-forming; grid-following; virtual synchronous generator; HVDC; modular multilevel converter

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“应对新能源并网的柔直逆变器主动支撑控制技术研究项目”(ZY-2024-02)。Independent Research and Development Project of State Grid Shandong Electric Power Research Institute “Research Project on Active Support Control Technology for Flexible DC Inverter Stations in Response to the Grid-connection of New Energy”(ZY-2024-02).

0 引言

模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)作为一种先进的电力电子装置,近年来在高压

直流输电 (high voltage direct current, HVDC) 系统中得到了广泛应用。MMC-HVDC 不仅在能量传输效率、系统稳定性及电网灵活性等方面展现出显著优势,而且在大规模可再生能源接入、长距离海底电缆输电等应用场景中表现出优越的性能。与传统的 HVDC 系统相比,MMC-HVDC 系统无需大容量变压器,减少了体积和成本,并且由于其固有的高动态响应能力,可实现对电网波动的快速响应^[1-4]。

大规模新能源接入后,电网强度变弱,短路比容量降低,且缺少对系统电压和频率的支撑。为解决上述问题,一般可通过增加调相机和储能等设备来提高系统的强度或者发挥新能源场站本身的惯量支撑能力^[5-8]。然而,多机分布式并网协控难度较大,因此通过柔直换流站集中式提供电压和频率的支撑是较为容易实现的方案^[9-11]。MMC-HVDC 的换流站则主要由电力电子器件组成,这些器件具有极快的动态响应能力,其响应时间通常在毫秒级别,近似于“零惯量”特性。因此,MMC-HVDC 系统在频率支撑方面显得不足。一旦电网出现频率偏差或较大幅度的功率波动,系统很难维持稳定状态。这种不稳定性可能导致电网失稳,甚至引发严重的故障事故^[12-16]。因此,在 MMC-HVDC 系统的运行和设计中,需要考虑其对电网频率响应的影响。传统的 MMC-HVDC 系统控制方法主要采用基于锁相环 (phase locked loop, PLL) 的控制方法。该方法通过采集并网电压的相位信息,进行坐标变换,以实现输出电流的控制,从而达到有功功率和无功功率的调节目。因此,换流站对外呈现电流源的特性。为提供弱电网的惯量支撑,有学者提出了构网型控制。构网型控制可实现电网频率和电压的支撑,对外呈现电压源的特性,并且在交流系统短路故障的情况下,快速注入电流来实现对电网电压支撑^[17-20]。

为满足系统在不同工况下的运行需求,换流站需要在构网型控制和跟网型控制之间进行切换,跟网型和构网型控制原理如图 1 所示。电网的强弱会影响控制模式的稳定性,比如系统在短路比高的情况下适合跟网型控制,而系统在短路比低的情况下适合构网型控制。现有的研究主要集中在并网模式和孤岛运行模式之间的切换。文献[21]提出了在并网模式中采用跟网型控制,而在独立运行模式中则采用构网型控制。文献[22]添加了一个补偿环路,

可以在不依赖外部信号的情况下,实现无缝切换。文献[23]中提出了两个控制模式在逆变器运行过程中保持同步,以实现从并网控制到构网控制的平滑切换。然而,同步过程对电网注入功率为 0。文献[24]提出了一种考虑短路比的并网变流器双模式运行控制,电压源控制模式采用下垂控制。综上所述,目前研究并网和离网模式运行切换主要针对配电网变流器,未见针对基于 MMC 柔直换流站的跟网型和构网型控制切换的研究。

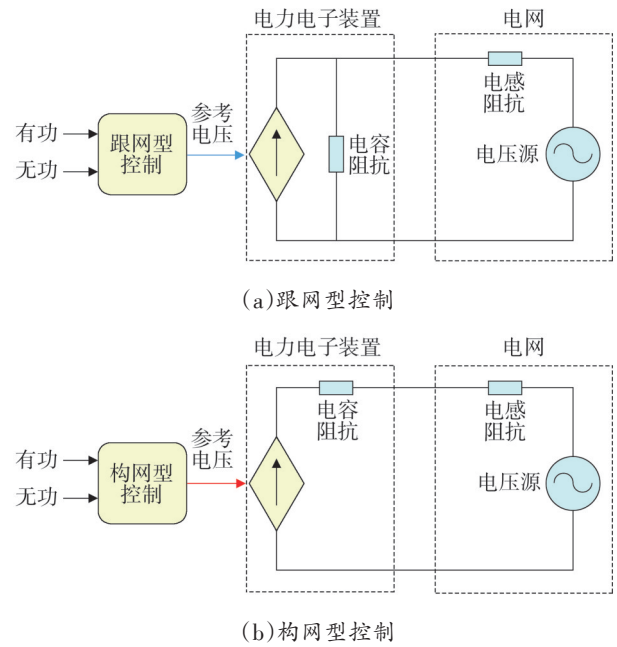


图 1 跟网型和构网型控制原理

Fig.1 Principles of grid-following and grid-forming control

为解决上述问题,本文提出了一种 MMC-HVDC 换流站构网型和跟网型控制无缝切换技术,其中构网型控制采用虚拟同步机 (virtual synchronous generator, VSG) 的控制方法。在不改变内环电流控制的前提下,通过构建构网型和跟网型控制统一的外环参考电流,保证换流站输出电压在切换过程功角和幅值的连续性。

1 MMC 运行原理

MMC 的拓扑如图 2 所示, N 为子模块个数,MMC 的交流侧电流和内部电流^[25-26]可定义为:

$$i_j = i_{up,j} - i_{low,j} \quad (1)$$

$$i_{\text{diff},j} = \frac{i_{\text{up},j} + i_{\text{low},j}}{2} = \frac{i_{\text{dc}}}{3} + i_{\text{circ},j} \quad (2)$$

式中: j 为每相桥臂的子模块(sub-module, SM)序号; i_j 为交流侧电流; $i_{\text{up},j}$ 和 $i_{\text{low},j}$ 为子模块上下桥臂电流; $i_{\text{diff},j}$ 为MMC内部电流; $i_{\text{circ},j}$ 为MMC环流; i_{dc} 为直流侧电流。

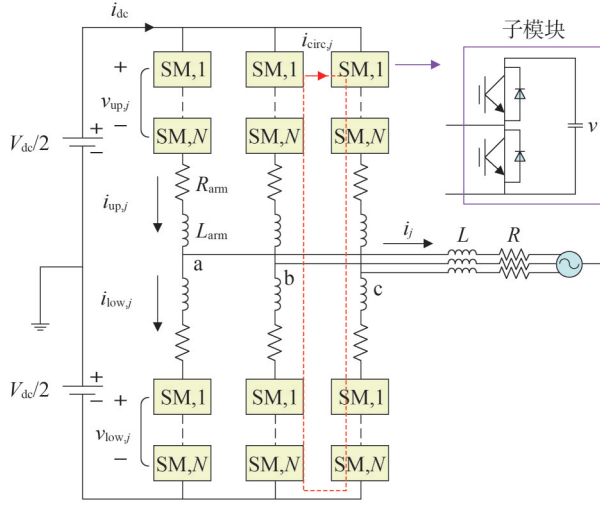


图2 MMC拓扑

Fig.2 Topology of MMC

MMC数学模型为:

$$\frac{V_{\text{dc}}}{2} - v_{\text{up},j} = L_{\text{arm}} \frac{di_{\text{up},j}}{dt} + R_{\text{arm}} i_{\text{up},j} + R i_j + L \frac{di_j}{dt} + v_j \quad (3)$$

$$\frac{V_{\text{dc}}}{2} - v_{\text{low},j} = L_{\text{arm}} \frac{di_{\text{low},j}}{dt} + R_{\text{arm}} i_{\text{low},j} - R i_j - L \frac{di_j}{dt} - v_j \quad (4)$$

式中: t 为时间变量; V_{dc} 为直流侧电压; L 和 R 分别为交流侧电感和电阻; v_j 为交流侧电压; L_{arm} 为桥臂电感; R_{arm} 为桥臂电阻; $v_{\text{up},j}$ 和 $v_{\text{low},j}$ 分别为上下桥臂输出电压,可以用子模块电容电压 $v_{c,i,j}$ 和其对应的子模块开关状态表示。

$$v_{\text{up},j} = S_{\text{W up},ij} \cdot v_{c_{\text{up},ij}} \quad (5)$$

$$v_{\text{low},j} = S_{\text{W low},ij} \cdot v_{c_{\text{low},ij}} \quad (6)$$

式中: $S_{\text{W up},ij}$ 和 $S_{\text{W low},ij}$ 分别为上下桥臂的子模块开关状态;子模块的电容电压与桥臂电流和开关状态有关,开关状态为1时子模块电容接入桥臂中,开关状态为0时子模块电容被旁路; $v_{c_{\text{up},ij}}$ 和 $v_{c_{\text{low},ij}}$ 分别为上下桥臂的子模块电压。

$$C \frac{dv_{c_{ij}}}{dt} = S_{\text{W ij}} \cdot i_{\text{arm},j} \quad (7)$$

式中: C 为直流侧电容; $S_{\text{W ij}}$ 为桥臂子模块开关状态;

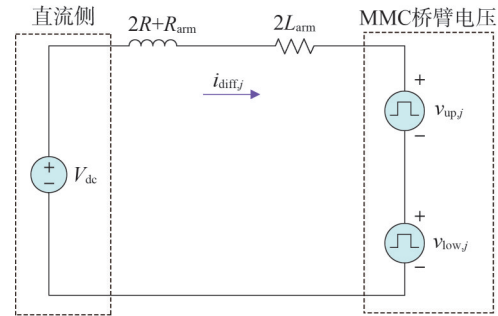
$i_{\text{arm},j}$ 为上下桥臂电流 $i_{\text{up},j}$ 或 $i_{\text{low},j}$ 。

将式(3)、式(4)分别相加和相减,得到MMC的直流侧和交流侧特性描述,如式(8)和式(9)所示。

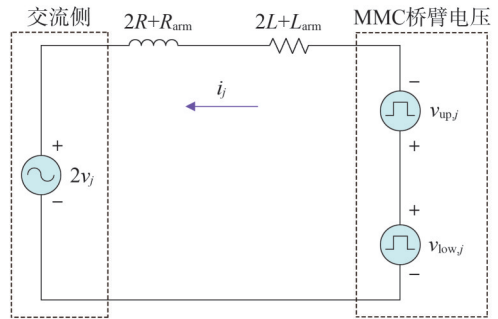
$$V_{\text{dc}} - v_{\text{low},j} - v_{\text{up},j} = 2L_{\text{arm}} \frac{di_{\text{diff},j}}{dt} + 2R_{\text{arm}} i_{\text{diff},j} \quad (8)$$

$$v_{\text{low},j} - v_{\text{up},j} = L_{\text{arm}} \frac{di_j}{dt} + R_{\text{arm}} i_j + R i_j + 2L \frac{di_j}{dt} + 2v_j \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)可以得到MMC的内部和外部等效电路,如图3所示。因此,MMC通过控制上下桥臂输出电压,可以调节输出的交流电流和内部电流。



(a) 直流侧等效电路



(b) 交流侧等效电路

图3 MMC等效电路

Fig.3 Equivalent circuits of MMC

2 虚拟同步机控制

传统MMC-HVDC系统的换流站主要采用基于锁相环的跟网型控制方法。然而,随着新能源的大规模接入,在弱电网系统运行工况下需要换流站为电网提供电压和频率支撑,采用基于虚拟同步机的构网型控制方法是解决这一问题的有效手段。

2.1 频率-有功控制

为模拟同步发电机的运行特性,向MMC-HVDC系统提供虚拟惯量,虚拟同步机控制基于同步机的

机械特性方程和电磁特性方程作为其控制模型。

$$\begin{cases} T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) = J \frac{d\omega}{dt} \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (10)$$

式中: T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω 为同步机的角频率; ω_0 为系统的额定角频率; θ 为同步机的机械角度; J 为转动惯量; D 为阻尼系数。在 VSG 中, J 和 D 为可调的控制参数, 调节 J 可以调节系统的惯量, 而调节 D 可以调节系统的阻尼, 提高鲁棒性。

根据 VSG 的控制原理, 有功和频率的表达式为

$$\frac{P_m}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - D(\omega - \omega_0) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (11)$$

式中: P_m 为同步机输入功率, 在 VSG 控制器中等效为有功功率的参考值 P_{ref} ; P_e 为同步机输出功率。

VSG 的基本原理如图 4 所示, 其中 s 为积分器。VSG 模拟了同步机的转子运动方程, 使 VSG 具有虚拟惯性和阻尼特性。

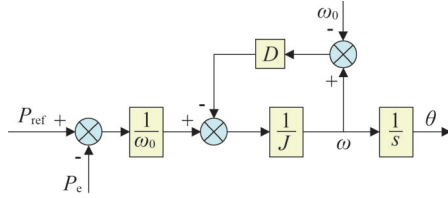


图 4 VSG 控制原理

Fig.4 Principles of VSG control

在 VSG 模型的基础上, 加入有功和频率的下垂控制可得

$$P_m = P_{ref} + k_\omega(\omega_0 - \omega) \quad (12)$$

式中: k_ω 为频率调节系数。

频率和有功功率的下垂控制如图 5 所示, 当交流系统发生频率偏移, 通过调节有功功率的参考值, 可以改变系统的有功输出, 从而调节系统的频率。将式(12)的 P_m 代入式(11)中得到

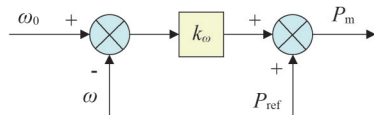


图 5 频率-有功下垂控制

Fig.5 Droop control of frequency-active power

$$\frac{P_{ref}}{\omega_0} - \frac{P_e}{\omega_0} - (D + \frac{k_\omega}{\omega_0})(\omega - \omega_0) = J \frac{d\omega}{dt} \quad (13)$$

与式(11)相比, 加入频率下垂控制后, 式(13)改变了系统的阻尼系数。

2.2 电压-无功控制

为实现类似同步机的调压功能, VSG 通过搭建电压-无功功率控制环来模拟同步机的励磁系统。通过控制 MMC 的交流输出电压来控制系统的电压和无功功率。电压和无功功率的下垂控制为

$$\Delta U_q = k_q(Q_{ref} - Q) \quad (14)$$

式中: k_q 为无功调节系数; Q_{ref} 为 MMC 无功功率参考值; Q 为 MMC 实测无功功率值; ΔU_q 为无功控制调整值。

VSG 同时具备维持交流电网电压稳定的功能, 定义电压的调节系数 k_v , 其电压控制为

$$\Delta U_v = k_v(U_{ac,ref} - U_{ac}) \quad (15)$$

式中: $U_{ac,ref}$ 为电压幅值参考值; U_{ac} 为电压测量值; ΔU_v 为电压幅值控制调整值。

根据式(14)和式(15), VSG 的参考电压为

$$\begin{aligned} U_m &= U_n + \Delta U_q + \Delta U_v \\ &= U_n + k_q(Q_{ref} - Q) + k_v(U_{ac,ref} - U_{ac}) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: U_m 为无功控制电压; U_n 为基准电压。

VSG 电压和无功功率的控制结构如图 6 所示, 该控制环既能调节系统的无功功率, 又能够支撑交流电压。

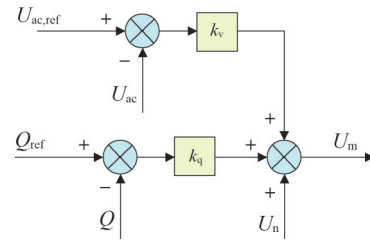


图 6 电压-无功控制

Fig.6 Control of voltage-reactive power

3 构网和跟网控制模式切换

MMC 的控制主要包含交流侧电流控制、内部环流控制以及电容电压平衡控制, 其控制框图如图 7 所示。交流侧的电流根据功率参考值进行调节。为提高 MMC 的效率, 内部环流的控制目标是将环流尽量减小, 一般设为 0。MMC 子模块电容电压的平衡

一般通过排序的方式,根据电容电压的大小来确定对应的开关状态。

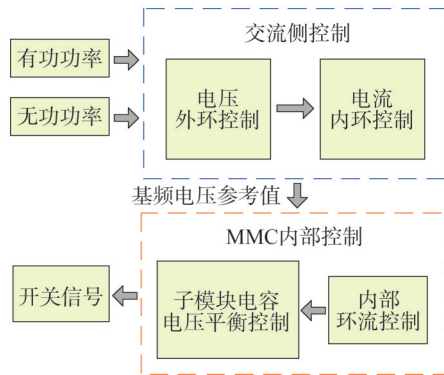


图7 MMC基本控制

Fig.7 Basic control of MMC

MMC的跟网型控制如图8所示,其中有功功率可以通过直流电压控制设定,也可直接通过控制指令给定 P_{ref} ,根据功率参考值得到 dq 轴电流的参考值,分别通过两个比例积分(proportional integral,PI)控制环得到 dq 轴的MMC参考电压,再经过逆Park变换可得MMC基频的参考电压。 I_d 和 I_q 分别为 dq 轴电流, U_d 和 U_q 分别为 dq 轴电压, $I_{d,ref}$ 和 $I_{q,ref}$ 分别为 dq 轴参考电流, $U_{d,ref}$ 和 $U_{q,ref}$ 分别为 dq 轴参考电压, v_{ref} 为控制器输出电压, $V_{dc,ref}$ 为直流电压参考值。

无缝切换控制如图9所示,构网型控制采用

VSG,其中VSG的输出包含有功控制器输出相角和无功控制器输出电压幅值,通过正弦函数生成参考电压,经过两个PI控制器生成 dq 坐标下的参考电流。对于跟网型控制,相角由PLL确定,测量的输入电压和电流经 dq 变换后,结合有功功率和无功功率的参考值可计算出所需的参考电流。 θ_{GFM} 和 θ_{GFL} 分别为构网型和跟网型控制的初相角, $I_{d,GFM}$ 和 $I_{q,GFM}$ 分别为构网型控制 dq 轴参考电流, $I_{d,GFL}$ 和 $I_{q,GFL}$ 分别为跟网型控制 dq 轴参考电流。

从构网型控制切换到跟网型控制时,构网型控制生成的相角作为跟网型控制的初始值,功率参考值保持不变, i_d 和 i_q 的参考值切换到由跟网型控制确定。当跟网型控制切换到构网型控制时,PLL测量的相角作为构网型控制相角的初始值,同时跟网型控制测得的网侧电压幅值作为构网型控制电压幅值的参考值, i_d 和 i_q 的参考值切换到由构网型控制确定。 i_d 和 i_q 的参考值输入电流内环控制器中,共用同一个电流内环控制。最后经MMC内部控制器计算出电压调制信号,通过脉冲宽度调制(pulse width modulation,PWM)确定开关信号。

4 仿真实验

MMC-HVDC两端测试系统如图10所示。换流站分别连接两端400 kV交流电网,直流额定电压为 ± 290 kV。根据功率指令,图10中两个MMC的左

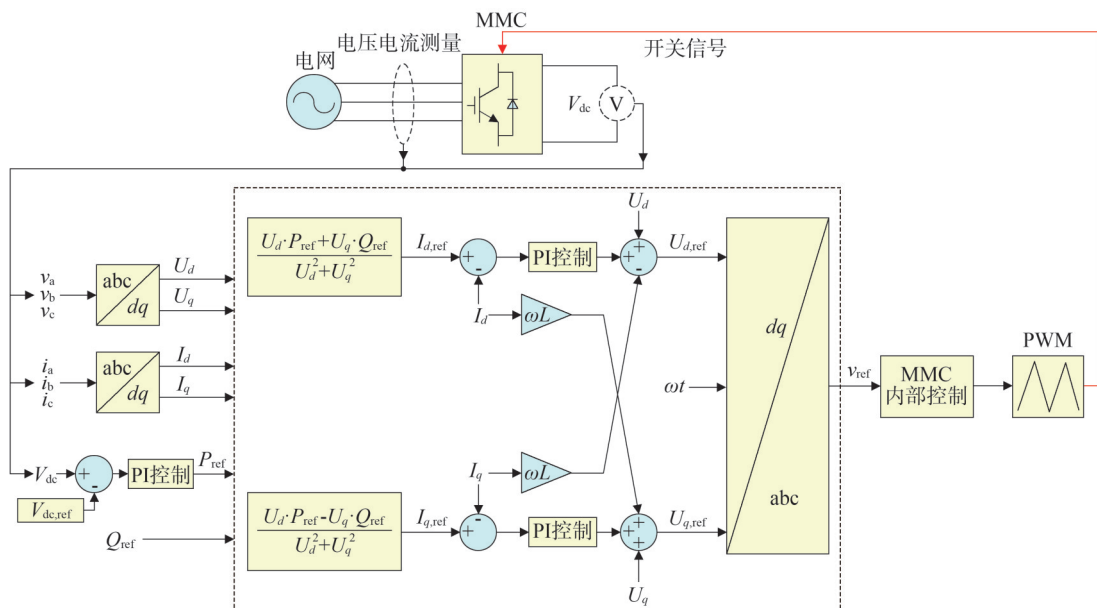


图8 MMC跟网型控制

Fig.8 MMC grid-following control

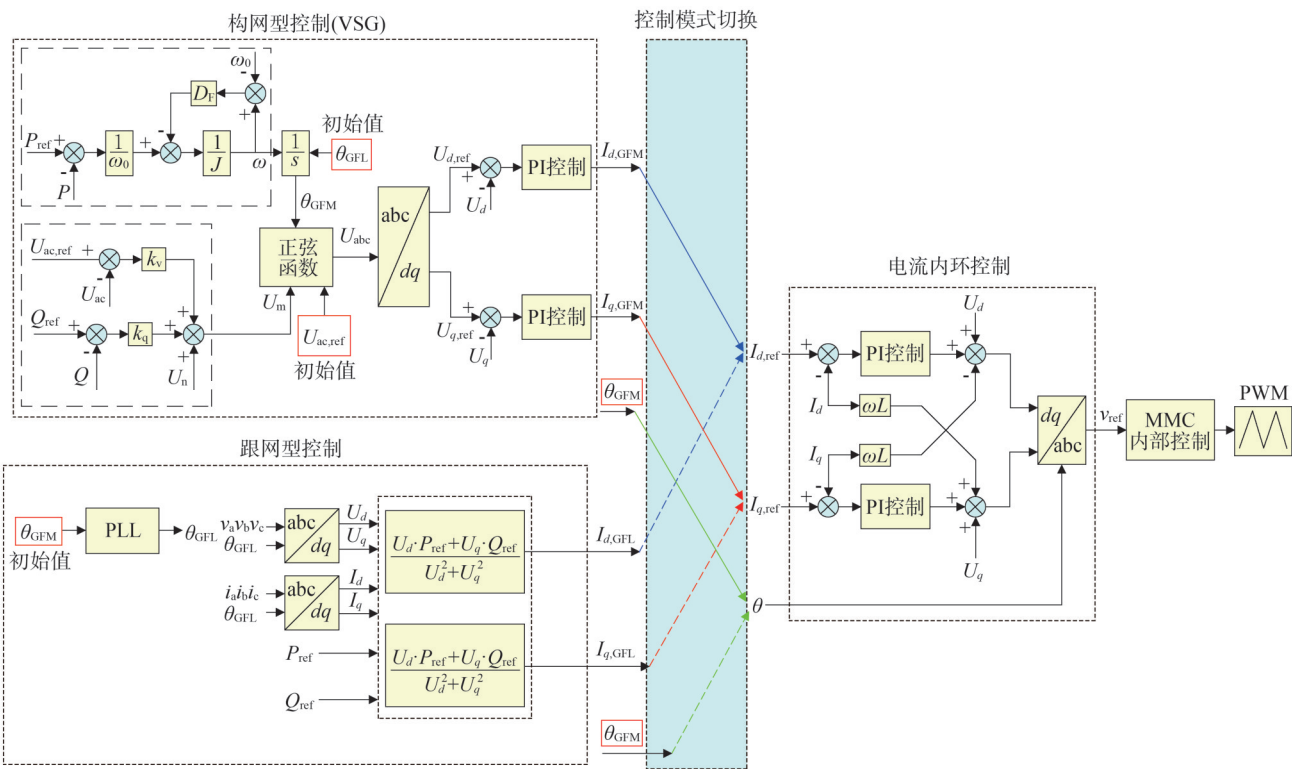


图9 MMC无缝切换控制
Fig.9 Seamless switching of MMC control

端作为送端,右端作为受端。左端采用定直流电压、定无功功率控制,右端分别采用构网型和跟网型控制。测试系统的参数如表 1 所示,以流入逆变侧方向为有功功率的正方向。

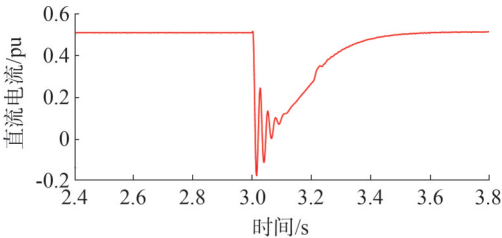
为与无缝切换控制方法对比,不采用无缝切换控制的仿真结果如图 11 所示,控制器一开始运行在跟网型控制,在 3 s 的时候切换到构网型控制,由于未采用无缝切换控制,系统在控制切换后的瞬间,有功功率大幅跌落,也引起了直流电流的波动,这主要是由于切换瞬间构网型控制的功角未初始化造成的。



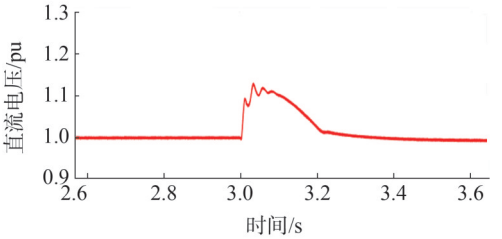
图 10 MMC-HVDC 测试系统
Fig.10 MMC-HVDC test system

表 1 系统参数
Table 1 Parameter of the system

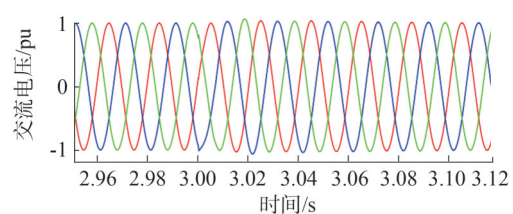
参数	数值
桥臂子模块数	50
子模块电容/mF	1
桥臂电感/mH	4.9
额定有功功率/MW	1 000
额定一次侧线电压/kV	400
二次侧线电压/kV	320
额定频率/Hz	50
直流额定电压/kV	±290



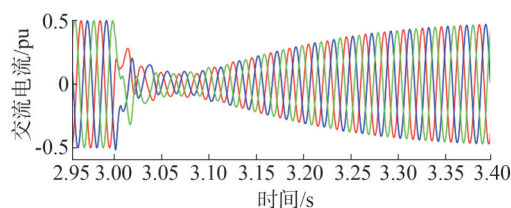
(a)直流电流



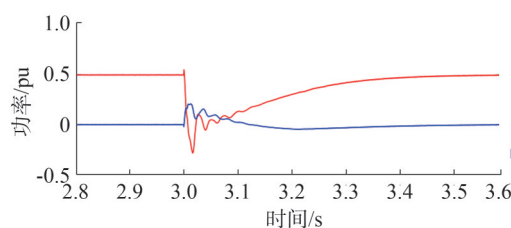
(b)直流电压



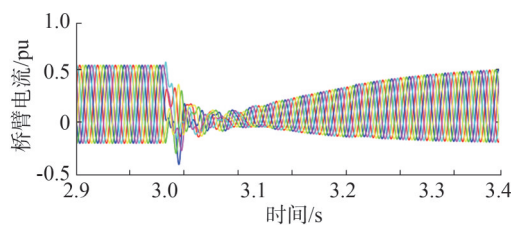
(c) 交流电压



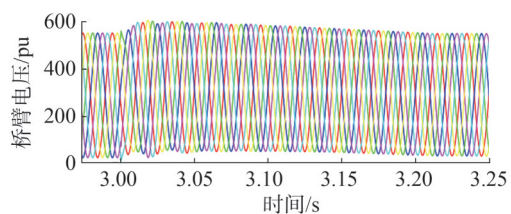
(d) 交流电流



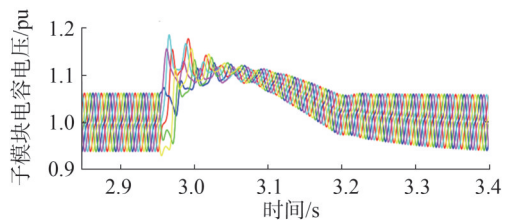
(e) 有功和无功功率



(f) 桥臂电流



(g) 桥臂电压

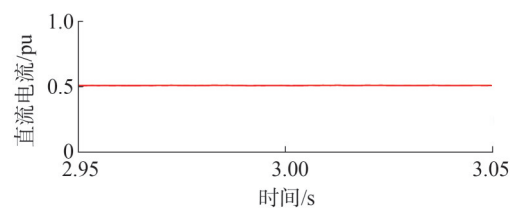


(h) 子模块电容平均电压

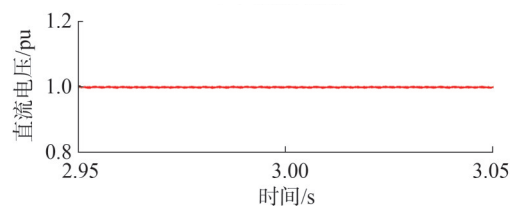
图 11 不采用 MMC 跟网型-构网型切换控制

Fig.11 Without seamless switching from
GFL to GFM control

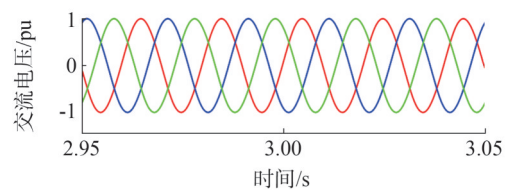
MMC 换流站从构网型控制切换到跟网型控制的测试如图 12 所示。控制模式切换设置为在 3 s 时从构网型控制转变成跟网型控制。图 12 的结果表明 MMC 换流站实现了从构网型到跟网型的无缝切换,未对系统造成冲击,保证了输出电压的连续性。



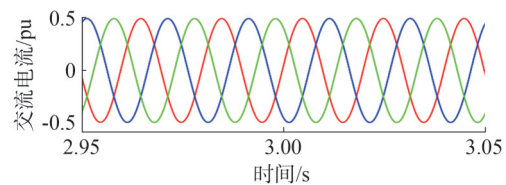
(a) 直流电流



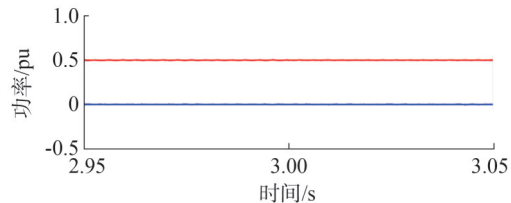
(b) 直流电压



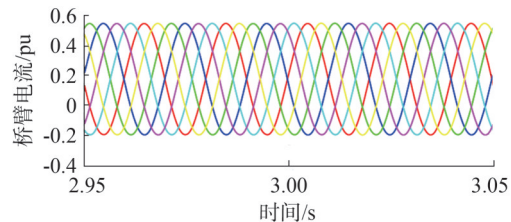
(c) 交流电压



(d) 交流电流



(e) 有功和无功功率



(f) 桥臂电流

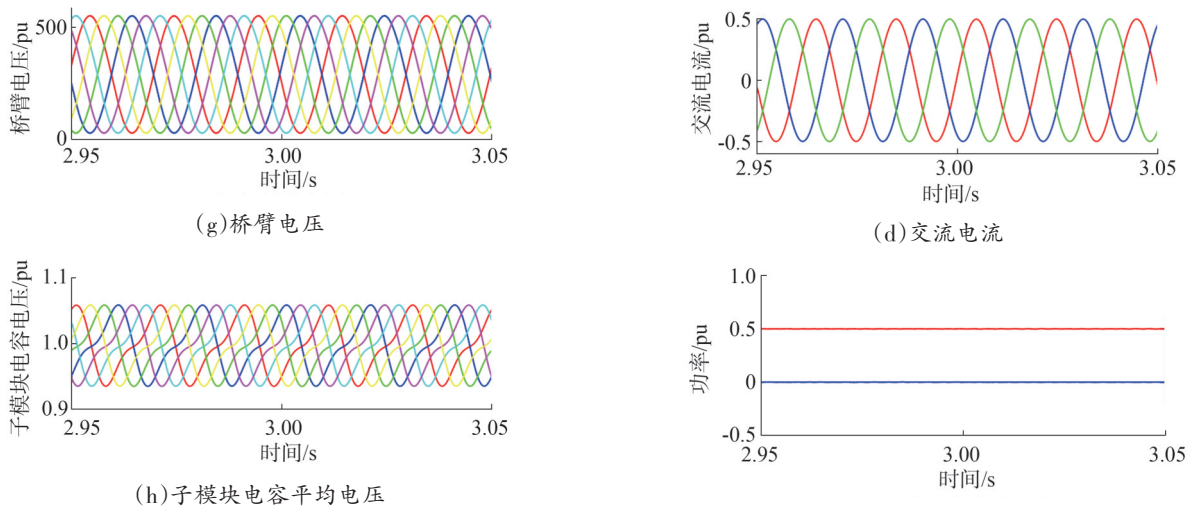


图 12 MMC 构网型-跟网型无缝切换

Fig.12 Seamless switching from GFM to GFL control

MMC 换流站从跟网型控制切换到构网型控制的测试如图 13 所示。控制模式设置为在 3 s 时从跟网型控制转变成构网型控制。图 13 的结果表明 MMC 换流站实现了从跟网型到构网型的无缝切换,输出电压保证了连续性,功率也未发生波动。

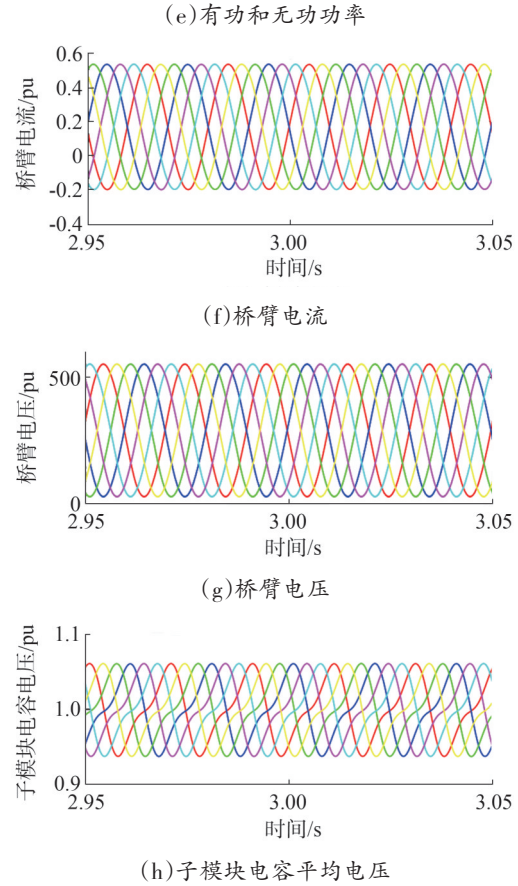
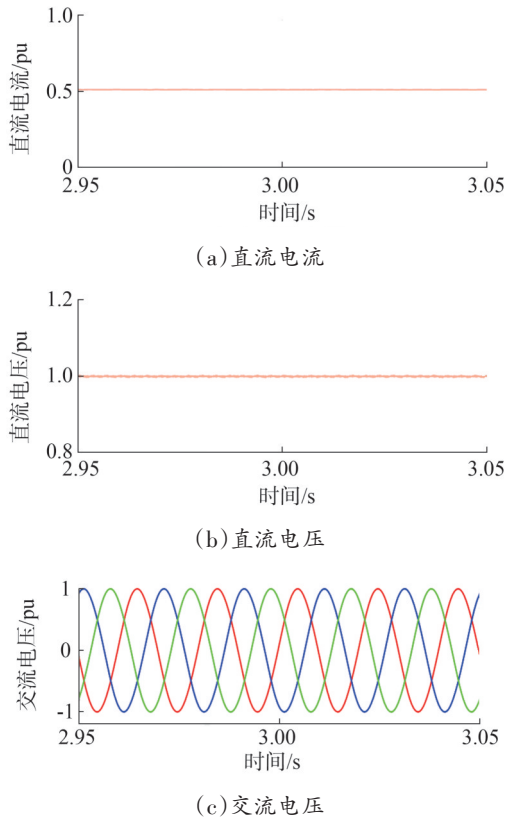


图 13 MMC 跟网型-构网型无缝切换

Fig.13 Seamless switching from GFL to GFM control

5 结束语

MMC-HVDC 系统在连接弱电网时,常采用虚拟同步机控制策略,以模拟同步发电机的机械特性,从而为新能源系统提供惯量支撑。为适应不同的工况,换流站需要在构网型控制和跟网型控制两种模式之间进行切换。文中提出了一种面向

MMC-HVDC 换流站的构网型与跟网型控制无缝切换的技术方法。在保持内环电流控制不变的前提下,通过构建统一的外环参考电流以及设定相角和电压幅值初始值,确保换流站在控制模式切换过程中输出电压的功角和幅值连续性。仿真结果表明,所提的无缝切换技术有效降低了控制切换对系统的冲击。

参考文献

- [1] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1):1-11.
- [2] 马秀达,卢宇,田杰,等.柔性直流输电系统的构网型控制关键技术与挑战[J].电力系统自动化,2023,47(3):1-11.
MA Xiuda, LU Yu, TIAN Jie, et al. Key technologies and challenges of grid-forming control for flexible DC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3):1-11.
- [3] ZHONG Q C, WEISS G. Synchronverters: inverters that mimic synchronous generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4):1259-1267.
- [4] CAO Y J, WANG W Y, LI Y, et al. A virtual synchronous generator control strategy for VSC-MTDC systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2):750-761.
- [5] GUAN M Y, PAN W L, ZHANG J, et al. Synchronous generator emulation control strategy for voltage source converter (VSC) stations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):3093-3101.
- [6] LEON A E, MAURICIO J M. Virtual synchronous generator for VSC-HVDC stations with DC voltage control [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1):728-738.
- [7] 姚为正,杨美娟,张海龙,等.VSC-HVDC受端换流器参与电网调频的VSG控制及其改进算法[J].中国电机工程学报,2017,37(2):525-534.
YAO Weizheng, YANG Meijuan, ZHANG Hailong, et al. VSG control and its modified algorithm for VSC-HVDC inverter participating grid's frequency regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):525-534.
- [8] 陈继开,曾强,辛业春,等.基于改进VSG的MMC-MTDC受端换流器二次调频控制策略[J].电网技术,2020,44(4):1428-1436.
CHEN Jikai, ZENG Qiang, XIN Yechun, et al. Secondary frequency regulation control strategy of MMC-MTDC converter based on improved VSG [J]. Power System Technology, 2020, 44(4):1428-1436.
- [9] HUANG L B, XIN H H, YANG H, et al. Interconnecting very weak AC systems by multiterminal VSC-HVDC links with a unified virtual synchronous control [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(3):1041-1053.
- [10] ZHANG Y S, SHOTORBANI A M, WANG L W, et al. A combined hierarchical and autonomous DC grid control for proportional power sharing with minimized voltage variation and transmission loss [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4):3213-3224.
- [11] ZHANG Y S, WANG L W, LI W. Autonomous DC line power flow regulation using adaptive droop control in HVDC grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(6):3550-3560.
- [12] ZHANG Y S, MENG X K, SHOTORBANI A M, et al. Minimization of AC-DC grid transmission loss and DC voltage deviation using adaptive droop control and improved AC-DC power flow algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1):744-756.
- [13] ZHANG F, BIEBER L, ZHANG Y S, et al. A multi-port DC power flow controller integrated with MMC stations for offshore meshed multi-terminal HVDC grids [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3):1676-1691.
- [14] ZHANG Y S, MENG X K, MALIK A, et al. The use of analytical converter loss formula to eliminate DC slack/droop bus iteration in sequential AC-DC power flow algorithm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 137:107596.
- [15] ZHANG Y S, SHOTORBANI A M, WANG L W, et al. Distributed secondary control of a microgrid with a generalized PI finite-time controller [J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2021, 8:57-67.
- [16] 于婧,林鸿飞,王潇,等.直驱风电场经柔直送出系统近工频正/负序振荡机理分析[J].电力建设,2024,45(2):10-25.
YU Jing, LIN Hongfei, WANG Xiao, et al. Mechanism analysis of near fundamental-frequency positive/negative-sequence oscillations in MMC-HVDC connected direct-drive wind farm [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(2):10-25.
- [17] ABDELWAHEB M A, EL-SAADANY E F. Power sharing control strategy of multiterminal VSC-HVDC transmission systems utilizing adaptive voltage droop [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2):605-615.
- [18] ERIKSSON R, BEERTEN J, GHANDHARI M, et al. Optimizing DC voltage droop settings for AC/DC system interactions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1):362-369.
- [19] WANG P Y, DENG N, ZHANG X P. Droop control for a multi-line current flow controller in meshed multi-terminal HVDC grid under large DC disturbances [J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2018, 5(2):35-46.

- [20] VEILLEUX E, OOI B T. Multiterminal HVDC with thyristor power-flow controller[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1205-1212.
- [21] KHAZAEI J, MIAO Z X, PIYASINGHE L, et al. Minimizing DC system loss in multi-terminal HVDC systems through adaptive droop control[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 126: 78-86.
- [22] WANG W Y, JIANG L, CAO Y J, et al. A parameter alternating VSG controller of VSC - MTDC systems for low frequency oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4609-4621.
- [23] GANJIAN-ABOUKHEILI M, SHAHABI M, SHAFIEE Q, et al. Seamless transition of microgrids operation from grid-connected to islanded mode[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2106-2114.
- [24] PIARDI A B, GERALDI E L, GRILO A P, et al. A control structure for smooth transfer from grid-connected to islanded operation of distributed synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 929-936.
- [25] KWON M, PARK S, OH C Y, et al. Unified control scheme of grid-connected inverters for autonomous and smooth transfer to stand-alone mode[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 416-425.
- [26] LI M, ZHANG X, GUO Z X, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on D-partition method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14420-14435.

收稿日期: 2024-07-25

修回日期: 2024-12-16

作者简介:

孙孔明(1989),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护、配电网优化;

李 宽(1988),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力系统继电保护、直流控制保护技术;

冯忆文(2001),男,主要研究方向为电力系统运行与控制;

张远实(1989),通信作者(yuanshizhang@seu.edu.cn),男,博士,讲师,主要研究方向为交直流混合电网的优化与控制。

(责任编辑 车永强)

(上接第 26 页)

- LIU Chaobo, LI Xinli, SHI Yukai, et al. Low carbon economic dispatching of virtual power plant considering changing heat price-integrated demand response[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 1-11 [2024-09-03]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20230328.1531.003.html>.
- [20] JIANG T, WU C H, HUANG T, et al. Optimal market participation of VPPs in TSO-DSO coordinated energy and flexibility markets[J]. Applied Energy, 2024, 360: 122730.
- [21] JU L W, YIN Z, YANG S B, et al. Bi-level electricity-carbon collaborative transaction optimal model for the rural electricity retailers integrating distributed energy resources by virtual power plant[J]. Energy Reports, 2022, 8: 9871-9888.
- [22] ESFAHANI M, ALIZADEH A, AMJADY N, et al. A distributed VPP-integrated co-optimization framework for energy scheduling, frequency regulation, and voltage support using data-driven distributionally robust optimization with Wasserstein metric[J]. Applied Energy, 2024, 361: 122883.
- [23] 宋晓喆, 孙剑英, 付小标, 等. 基于深度强化学习的光伏主动配电网暂态电压控制[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2024: 1-12 [2024-09-03]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001469>.
- SONG Xiaozhe, SUN Jianying, FU Xiaobiao, et al. Transient voltage control of photovoltaic active distribution network based on deep reinforcement learning[J/OL]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2024: 1-12 [2024-09-03]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001469>.
- [24] LIN C R, HU B, SHAO C Z, et al. An analysis of delay-constrained consensus-based optimal algorithms in virtual power plants[J]. ISA Transactions, 2022, 125: 189-197.
- [25] WEN G H, YU X H, LIU Z W, et al. Adaptive consensus-based robust strategy for economic dispatch of smart grids subject to communication uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2484-2496.

收稿日期: 2024-11-21

修回日期: 2025-02-13

作者简介:

王 琛(1984),通信作者(xuan12cu@163.com),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为配电网规划运行、新能源电力系统;

孙哲夫(1991),男,硕士,工程师,研究方向为配电网优化运行、新能源电力系统;

张自伟(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为配电网规划。

(责任编辑 姜婷婷)

考虑配电网承载力的建筑领域电能替代潜力测算

庞超^{1*}, 丁一¹, 赵晨阳², 霍现旭¹

(1. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384; 2. 国网天津市电力公司, 天津 300010)

摘要:随着清洁能源技术的不断发展, 建筑领域涌现出多种电能替代方案。随着大量电能替代负荷的接入, 为保证配电网的安全运行, 对配电网的承载能力进行评估对配电网规划具有重要意义。首先选取建筑领域电锅炉、热泵、空调三种典型电能替代技术, 考虑设备全寿命周期构建全周期经济性测算模型; 其次以综合能源系统为研究对象, 对设备及负荷建模, 以配电网可接纳电能替代设备的最大数量为目标函数, 继而整合电网安全稳定运行、设备出力 and 政策、经济等约束条件, 构建电能替代潜力计算模型, 通过二阶锥松弛方法实现向二阶锥规划模型的转化; 最终基于IEEE33节点算例的仿真分析, 完成配电网负荷承载力的定量评估, 验证了政策支持下, 考虑经济性在内的电能替代设备有更广阔的发展空间。

关键词:电能替代; 全周期经济性测算; 电网承载力; 潜力测算

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)07-0054-14

Calculation of the Potential for Electric Energy Substitution in the Construction Field Considering the Carrying Capacity of the Distribution Network

PANG Chao^{1*}, DING Yi¹, ZHAO Chenyang², HUO Xianxu¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300384, China;

2. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: As clean energy technologies continue to advance, various electric energy substitution solutions have emerged in the construction sector. With the large-scale integration of electric energy substitution loads, assessing the load-carrying capacity of the distribution network for safe operation is crucial for distribution network planning. Firstly, three typical electric energy substitution technologies are selected in the construction sector: electric boilers, heat pumps, and air conditioners, and constructs a full-cycle economic assessment model considering the entire lifecycle of the equipment. Next, using an integrated energy system as the research object, the equipment and loads are modeled with the objective function of maximizing the number of electric energy substitution devices that the distribution network can accommodate. The model takes into account constraints related to the safe and stable operation of the distribution network, equipment output, as well as economic and policy factors. An electric energy substitution potential calculation model is then established and subsequently reformulated as a second-order cone programming model using second-order cone relaxation techniques. Finally, by simulating the IEEE 33-bus test case, a quantitative evaluation of the load-carrying capacity of the distribution network is achieved, demonstrating that, under policy support, electric energy substitution devices that consider economic factors have a broader development potential.

Keywords: electric energy substitution; full-cycle economic assessment; power grid load-carrying capacity; potential calculation

基金项目: 国网天津市电力公司科技项目“考虑电网承载力的建筑领域电能替代潜力挖掘与多维评价技术研究”(电科-研发 2024-07)。Science and Technology Project of State Grid Tianjin Electric Power Company “Research on the Potential Exploration of Electric Energy Substitution in the Construction Field Considering the Carrying Capacity of the Power Grid and Multidimensional Evaluation Technology” (ES-R&D2024-07)。

0 引言

电能替代是指在终端消费环节, 使用电能替代散烧煤、燃油等传统化石能源的方式, 通过大规模集中转化来提高燃料利用率、减少污染物排放^[1]。电

能替代技术的发展旨在促进可再生能源的应用,减少对传统化石能源的依赖。传统的建筑能源主要依赖化石燃料,导致大量温室气体的排放,通过电能替代,可以显著减少建筑能源的碳足迹,提升建筑的能源使用效率^[2]。选取天津市某采用自备锅炉供暖小区的统计数据作为案例^[3],该小区能源消耗数据表明,热泵的年耗煤量仅为煤锅炉的40%,可减少2.47 t二氧化硫、0.78 t氮氧化物和1.03 t粉尘排放。从个体用户来看,住宅面积为60 m²的住房,煤锅炉年供暖费用为1 536元,热泵供暖系统电费为244.6元,在计入初始投资后,用户年费降至1 290元,实现246元的费用节省,综合经济效益显著优于煤锅炉供暖方案。由此可以看出,尽管前期投资较高,但从长远来看,电力设备的维护成本通常低于传统燃料设备,并且能源效率的提升将进一步减少能源开支,使得电能替代能够带来更显著的经济效益^[4]。因此电能替代在建筑领域的应用和发展亟待研究。

然而,电能替代在为社会带来经济和环境效益的同时,也为配电网带来新的挑战。与传统用电需求相比,电能替代的发展增加了居民对高功率电能的需求,电采暖、空调等时段性用电设备导致负荷峰谷差加大,呈现显著的不连续性。各国支持可再生能源直接交易的政策推动了电能替代的广泛应用,但电价和政策的动态变化也使需求更具有不可预测性。这导致配电网面临峰谷差扩大、线路和配电变压器供电能力不足等多种安全运行方面的挑战^[5-6]。同时,电能替代还面临诸如配电网适应性、技术成熟度和用户接受度等挑战^[7]。因此,推进电能替代技术的发展,不仅需要政策保障体系与市场运行机制协同推进,还需要加大研发投入,优化技术路径,以建立更为高效和可靠的电能替代解决方案。

目前对电能替代技术经济性的评估考虑用户投资最大化,计及设备剩余价值^[8],对比不同设备采暖季成本分析经济效益^[9],将供冷供热技术与燃气分布式能源进行技术经济性对比^[10],以具体案例展示了电能替代技术的应用效果和经济效益^[11]。但当前研究忽略了资金的时间价值,同时未考虑政策、用户需求和行为模式的变化对供暖系统使用效率和电能替代经济效益的影响。

现有文献中,电能替代潜力评估通常通过定义电能替代量来进行量化分析^[12],通过指数平滑法和

等效热值法构建电能替代的理论潜力预测模型^[13],将时间序列预测和反向传播(backpropagation, BP)神经网络相结合,来提高评估的准确性^[14]。例如文献^[15]从五个指标层次构建综合评价指标体系并分析量化每一指标,但均未接入实际电网,未考虑接入设备数量增多会使电网可再生能源消纳压力增大。

建筑领域的电能替代设备多、用能特性差异大,电网供需形势日趋复杂^[16],目前缺乏一种多角度、全方面准确测算电能替代经济性的模型,和在保证电网安全稳定运行情况下使得电能替代程度最大化的测算模型,限制了电能替代的深入推广。

在此基础上,通过建立全周期经济性测算模型对不同电能替代设备进行经济性对比分析,从而为设备选择和投资决策提供参考依据。此外,以综合能源系统为研究对象,在电网承载力下以接入电能替代设备最大为目标,综合考虑政策、经济等因素构建电能替代潜力测算模型。通过具体算例对比不同场景下的设备出力和承载力极限,评估经济性与政策因素的影响,确保加入电能替代设备后,电网电压与电流稳定在安全范围内。

1 研究内容思路框架

为解决随着大量电能替代设备接入电网带来电网安全运行压力问题,亟须明确电网对于电能替代设备的极限承载力。

总体分为背景与问题的引入、模型构建与方法的选取、仿真结果的分析与验证、结论的总结与建议四个部分,整体思路框架如图1所示。

基于此框架研究,本文的创新点与贡献如下:

1)通过费用年值法建立全周期经济性测算模型,消除时间价值对成本的影响,将各项成本归算在同一时间点,综合考虑投资、运行、维护阶段,计及设备全寿命周期的成本,以便考虑经济因素时对电能替代设备的选择进行约束;

2)以往对于电能替代潜力的研究缺乏对于电网承载力的考量,本文将电网承载力作为约束条件,将经济、政策因素一同考虑在内,使用所建模型结合具体算例进行电能替代潜力的测算;

3)通过具体算例的分析,旨在通过综合经济性分析得出电能替代设备的适用性建议;提出政策支持方向,以促进更广泛的电能替代设备应用。

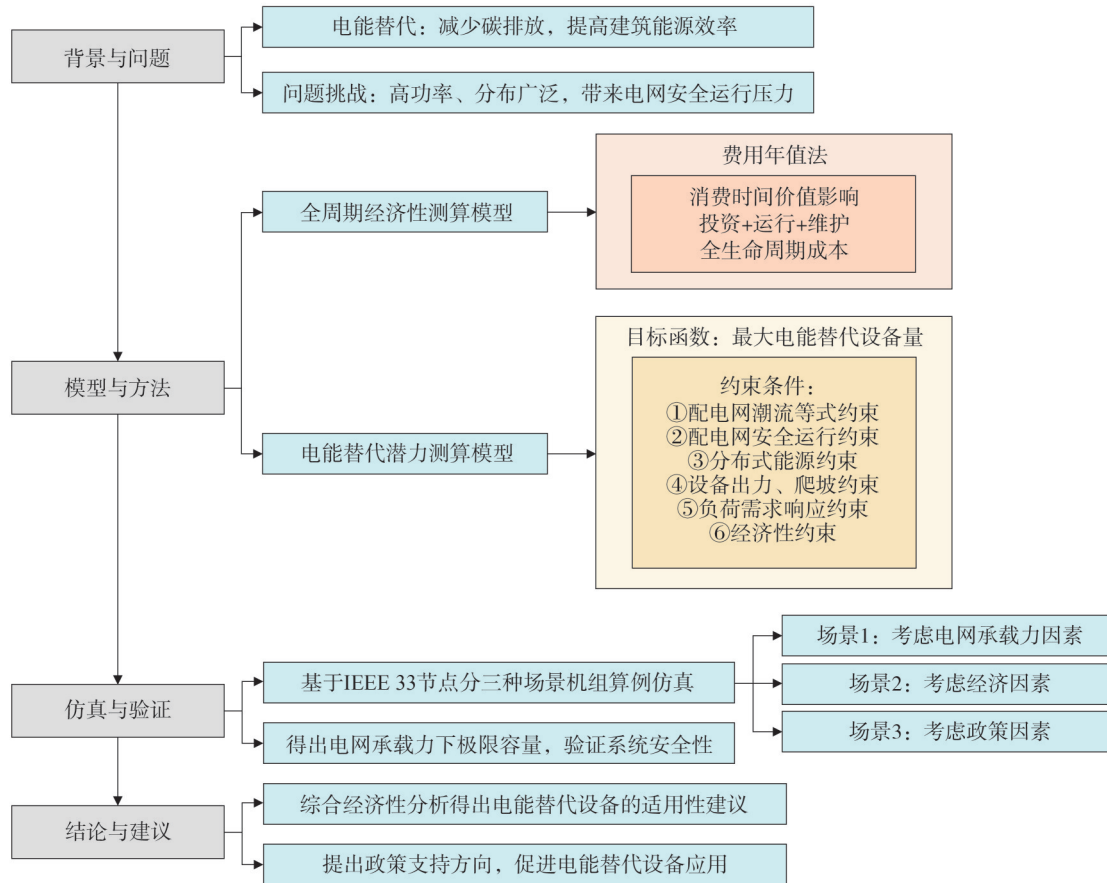


图1 研究内容思路框架

Fig.1 The conceptual framework of the research content

2 全周期经济性测算模型

综合考虑投资阶段、运行阶段、拆除阶段,建立一种电能替代全周期经济性测算模型,测算电能替代项目全周期成本,以便对电能替代潜力进行测算时实现经济性约束。

为消除时间价值的影响,引用费用年值法^[17],将未来不同时间点发生的费用按照一定的收益率转换为等额的年费用,使得费用可以在相同的时间基础上进行比较。把各个设备的初始投资值利用费用年值法进行折算,得到与经营费用类似的年值后再与年运行成本相加,计算各设备全生命周期的总费用年值为

$$C = C_{\text{install}} \times A + (C_{\text{on}} + C_{\text{om}}) \times D \quad (1)$$

式中: C_{install} 为电能替代设备单位容量的年费值; A 为电能替代设备的容量; C_{on} 为燃料费; C_{om} 为维修费; D 为设备年运行天数。

2.1 投资阶段

针对不同电能替代方式的初始投资经济性进行差异化分析,在投资决策阶段,使用费用年值法将各方案的初始投资通过资本回收系数与设备使用年限进行折算,得到电能替代设备单位容量的年费值为

$$C_{\text{install}} = W \times \frac{\delta \times (1 + \delta)^n}{(1 + \delta)^n - 1} \quad (2)$$

式中: W 为电能替代设备单位容量的初始投资值; n 为电能替代设备的使用年限; δ 为投资收益率,取8%。

2.2 运行阶段

2.2.1 燃料费

用于设备供能所须消耗的燃料费用为

$$C_{\text{on}} = C_{\text{buy}} \times Q = C_{\text{Ebuy}} \times P + C_{\text{Gbuy}} \times V \quad (3)$$

式中: C_{buy} 为燃料单价; Q 为燃料消耗量; C_{Ebuy} 为电价; P 为消耗的电功率; C_{Gbuy} 为天然气价格; V 为燃气量。

2.2.2 维修费

在系统发生故障时,为确保系统运行连续性而

产生的必要维护费用。考虑停机时间、故障维修成本、故障发生频率等因素,通过综合赋权的方式对不同的故障类型进行描述,综合以上权重建立维修费的计算公式为

$$C_{om} = \sum_m \omega_m \cdot \eta \cdot D \cdot C_{om,m} \quad (4)$$

式中: w_m 为第 m 类故障的权重,可根据停机时间、故障维修成本、故障发生频率综合确定,且 $\sum_m \omega_m = 1$; η 为故障发生频率,即维修率; $C_{om,m}$ 为单次维修第 m 类故障的成本。

2.3 拆除阶段

拆除阶段的核心工作包括设备拆卸或报废处理以及可再生材料资源的回收利用等。若在报废时部分设备仍有残值,则残值可以抵扣相关费用,从而减少报废成本。假设设备报废时的报废成本为 C_R ,残值为 C_Z ,则拆除阶段的成本可表示为

$$C_R = C_Z \quad (5)$$

3 综合能源系统建模

构建集成电能替代设备的电、冷、热负荷综合能源系统,构建风光出力模型及用能设备模型,考虑需求响应^[18]、建筑物热平衡的负荷模型,以在此系统中进行建筑领域电能替代潜力的测算。

3.1 综合能源系统

为保证能源供给的可靠性与稳定性,电负荷由上级电网或风光出力提供,冷负荷由溴化锂制冷机或空调供给,热负荷由燃气锅炉、冷热电联供系统或电锅炉、热泵等电能替代设备提供^[19-20]。

图2是纳入热泵(heat pump, HP)、电锅炉(electric boiler, EB)、电蓄冷空调(electric storage and air conditioning, AC)、冷热电联供(combined cooling heating and power, CCHP)系统、燃气锅炉(gas boiler, GB)等机组构建的含电、冷、热负荷的综合能源系统(integrated energy system, IES),在此系统中测算加入电能替代设备的电网承载力。

3.2 风光出力模型

风机(wind turbine, WT)出力受风速影响,风速概率模型采用当前使用较广、形式简单,并且拟合精度较高的Weibull分布模型^[21]。风机出力具体计算公式为

$$P_t^{WT} = \begin{cases} 0, v_t \leq v_{ci}, v_t > v_{co} \\ P_t^{wo} \frac{v_t - v_{ci}}{v_r - v_{ci}}, v_{ci} < v_t \leq v_r \\ P_t^{wo}, v_r < v_t \leq v_{co} \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_t^{WT} 为 t 时刻风机出力; P_t^{wo} 为 t 时刻风机额定出力; v_t 为 t 时刻风速; v_{ci} 、 v_{co} 、 v_r 分别为切入风速、切出风速和额定风速。

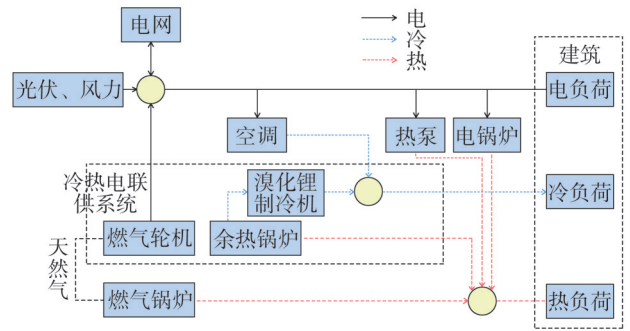


图2 含电、冷、热负荷的综合能源系统结构

Fig.2 Structure of the integrated energy system including electricity, cooling, and heating loads

光伏(photovoltaic, PV)机组的出力与太阳辐照强度呈正相关关系,采用Beta分布模型^[22],具体出力计算公式为

$$P_t^{PV} = I_t^{PV} S \eta^{PV} \quad (7)$$

式中: P_t^{PV} 为光伏机组在 t 时刻的出力; I_t^{PV} 为 t 时刻光照强度; S 为光照面积; η^{PV} 为转化效率。

3.3 典型设备功率模型

3.3.1 冷热电联供系统

冷热电联供系统的电功率为

$$P_{CCHP}^t = V_{CCHP}^t \times \eta_{GT} \times \beta / \Delta t \quad (8)$$

式中: V_{CCHP}^t 为 t 时刻燃气轮机耗气量; η_{GT} 为燃气轮机额定转化效率; β 为天然气低热值,此处取 9.7 kWh/m^3 ; Δt 为时间变化量。

余热锅炉回收的余热作为驱动能源,供给溴化锂制冷机进行CCHP系统的制冷,因此CCHP的制冷功率与制冷机吸收的余热量相关,可表示为

$$Q_{CCHP}^t = Q_{LBR}^t = H_{LBR}^t \eta_{LBR} \quad (9)$$

式中: Q_{CCHP}^t 为 t 时刻CCHP的制冷功率; Q_{LBR}^t 为 t 时刻制冷机吸收的余热量; H_{LBR}^t 为 t 时刻余热锅炉回收的热功率; η_{LBR} 为制冷效率。

冷热电联供系统的热功率为

$$H_{\text{CCHP}}^t = P_{\text{CCHP}}^t \eta_{\text{HRB}} (1 - \eta_{\text{GTe}}) / \eta_{\text{GTe}} \quad (10)$$

式中: η_{HRB} 为余热锅炉效率; η_{GTe} 为燃气轮机电效率。

3.3.2 燃气锅炉

燃气锅炉输出的热功率为

$$H_{\text{GB}}^t = V_{\text{GB}}^t \eta_{\text{GB}} \beta / \Delta t \quad (11)$$

式中: V_{GB}^t 为 t 时刻燃气锅炉耗气量; η_{GB} 为燃气锅炉热效率。

3.3.3 电锅炉

电锅炉利用电能加热内部的热交换介质完成供热, 可以完成电能向热能的转换, 其制热功率可表示为

$$H_{\text{EB}}^t = P_{\text{EB}}^t \eta_{\text{EB}} \quad (12)$$

式中: P_{EB}^t 为 t 时刻电锅炉消耗的电功率; η_{EB} 为电锅炉的制热能效比。

3.3.4 热泵

热泵系统基于逆卡诺循环原理, 从低温热源吸热后, 通过压缩机升温升压将热能转移至高位热源, 其制热功率可表示为

$$H_{\text{HP}}^t = P_{\text{HP}}^t \eta_{\text{HP}} \quad (13)$$

式中: P_{HP}^t 为 t 时刻热泵消耗的电功率; η_{HP} 为热泵的制热能效比。

3.3.5 电蓄冷空调

在电价低谷或平谷时段, 电蓄冷空调系统在满负荷制冷工况下运行, 同时通过蓄冷装置实现冷量的存储, 待电价高峰时段释放冷量以满足系统负荷需求, 使电负荷实现“移峰填谷”, 既增强了电网运行稳定性和经济性, 又显著降低了空调的运行成本^[23]。电蓄冷空调的制冷功率为

$$Q_{\text{AC}}^t = P_{\text{AC}}^t \eta_{\text{AC}} \quad (14)$$

式中: P_{AC}^t 为 t 时刻空调消耗的电功率; η_{AC} 为空调的制冷效率。

3.4 负荷模型

3.4.1 可替代型需求响应模型

一些热负荷既可通过热能直接供应, 如热电联产机组供热; 又可通过电能替代热能来实现供热, 如电锅炉、热泵等; 根据峰谷电价的差异, 用户可在电价高峰时利用热能, 在电价低谷时利用电能来提供热能, 满足建筑的供暖需求。这类可替代热负荷的模式^[24]为:

$$\Delta L_{\text{t}}^{\text{r,e}} = -\varepsilon_{\text{e,h}} \Delta L_{\text{t}}^{\text{r,h}} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{\text{e,h}} = \frac{\nu_{\text{e}} \phi_{\text{e}}}{\nu_{\text{h}} \phi_{\text{h}}} \quad (16)$$

式中: $\Delta L_{\text{t}}^{\text{r,e}}$ 、 $\Delta L_{\text{t}}^{\text{r,h}}$ 分别为 t 时刻电能可替代负荷量和对应热能被替代的负荷量; $\varepsilon_{\text{e,h}}$ 为电热转化系数; ν_{e} 、 ν_{h} 分别为电能和热能的单位热值; ϕ_{e} 、 ϕ_{h} 分别为电能和热能的能源效率。

对该类负荷, 同时需要考虑可替代负荷量约束:

$$\Delta L_{\text{min}}^{\text{r,e}} \leq \Delta L_{\text{t}}^{\text{r,e}} \leq \Delta L_{\text{max}}^{\text{r,e}} \quad (17)$$

$$\Delta L_{\text{min}}^{\text{r,h}} \leq \Delta L_{\text{t}}^{\text{r,h}} \leq \Delta L_{\text{max}}^{\text{r,h}} \quad (18)$$

式中: $\Delta L_{\text{min}}^{\text{r,e}}$ 、 $\Delta L_{\text{max}}^{\text{r,e}}$ 分别为电能的最小、最大可替代负荷量; $\Delta L_{\text{min}}^{\text{r,h}}$ 、 $\Delta L_{\text{max}}^{\text{r,h}}$ 分别为热能的最小、最大可替代负荷量。

3.4.2 考虑建筑物热平衡的热负荷模型

由热平衡理论可知, 当建筑物的室内供热量大于外部围护结构的散热量时, 建筑物内的热量会积聚, 导致室内温度上升; 而当建筑物室内供热量低于建筑物围护结构的散热量时, 建筑内部储存的热量将持续耗散, 引发室内温度下降^[25]。本节通过建立建筑物的暂态热平衡模型来量化供热系统热输入对建筑物室内温度场的影响, 进而确立热量与温度之间的相互关系。建立建筑物暂态热平衡方程为

$$\frac{dT_{\text{in}}}{dt} = \frac{P_{\text{h}}^t - (T_{\text{in}}^t - T_{\text{out}}^t) \cdot K \cdot F}{c_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot V} \quad (19)$$

式中: P_{h}^t 为 t 时刻的供热功率; T_{in}^t 、 T_{out}^t 分别为 t 时刻室内、室外温度; K 为建筑物传热系数, 取值为 $0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; F 为建筑物表面积, 取值为 $2.3 \times 10^7 \text{ m}^2$; V 为建筑物体积, 取值为 $5 \cdot 10^7 \text{ m}^3$; c_{air} 为空气比热容, 取值为 $1.007 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_{air} 为空气密度, 取值为 $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$ ^[26]。

该方程为一阶微分方程, 在假定短期内外部温度波动较小的情况下, 可以认为在特定时间段内外部温度保持恒定。由此根据一阶线性齐次微分方程的通解, 可以得到线性化的热平衡方程为

$$T_{\text{in}}^t = \left(T_{\text{in}}^{t-1} - T_{\text{out}}^t - P_{\text{h}}^t \cdot \frac{1}{K \cdot F} \right) \cdot \left(-\frac{K \cdot F}{c_{\text{air}} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot V} \cdot \Delta t \right) + \left(T_{\text{out}}^t + P_{\text{h}}^t \cdot \frac{1}{K \cdot F} \right) \quad (20)$$

将上式进行变换得到热负荷模型为

$$P_h^t = \frac{(T_{in}^t - T_{out}^t) + \frac{K \cdot F}{c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V} \cdot \Delta t \cdot (T_{in}^{t-1} - T_{out}^t)}{\frac{1}{K \cdot F} + \frac{1}{c_{air} \cdot \rho_{air} \cdot V} \cdot \Delta t} \quad (21)$$

4 考虑电网承载力电能替代潜力测算模型

建立一种电能替代潜力测算模型,考虑配电网安全稳定运行约束、设备出力约束与经济、政策约束,通过二阶锥松弛方法将潮流约束转化为二阶锥规划模型,在考虑电网安全稳定运行的情况下使电能替代负荷达到最大。

4.1 目标函数

本模型以最大化配电网系统在一个完整调度周期内容纳电能替代设备量为目标函数。具体以电锅炉、热泵、空调这三种电能替代设备在满足电网安全稳定运行约束下最多能接入配电网的个数为量化目标,衡量电能替代潜力。具体表达式为

$$\max S_e = \mu_1 N_{EB} + \mu_2 N_{HP} + \mu_3 N_{AC} \quad (22)$$

式中: S_e 为电能替代潜力; N_{EB} 为电锅炉个数; N_{HP} 为热泵个数; N_{AC} 为空调用户数; μ_1, μ_2, μ_3 为政策支持系数,满足 $\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1$,模型中的各系数可根据实际情况或仿真需求进行调整配置。

4.2 约束条件

4.2.1 支路潮流约束

辐射型配电网的支路潮流模型如图3所示。

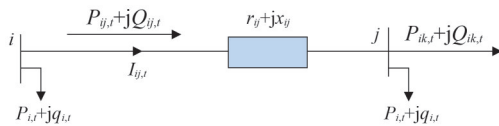


图3 支路潮流模型

Fig.3 Branch power flow model

其支路潮流应满足以下约束条件:

$$U_{j,t}^2 = U_{i,t}^2 - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2)I_{ij,t}^2 \quad (23)$$

$$P_{j,t} = P_{ij,t} - r_{ij}I_{ij,t}^2 - \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t} \quad (24)$$

$$Q_{j,t} = Q_{ij,t} - x_{ij}I_{ij,t}^2 - \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} \quad (25)$$

$$I_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{U_{i,t}^2} \quad (26)$$

式中: i, j 为节点编号; $U_{i,t}, U_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 i, j 的

电压; $I_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 的电流; $r_{ij} + jx_{ij}$ 为支路 ij 的阻抗; $P_{j,t}, Q_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 的有功、无功注入功率; $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻支路 ij 的有功、无功功率; $P_{jk,t}$ 和 $Q_{jk,t}$ 分别为 t 时刻支路 jk 的有功、无功功率; $k:j \rightarrow k$ 为连接在节点 j 上所有节点集合。

上述支路潮流约束为非线性模型,呈现显著的非凸性,求解过程复杂度高。本文应用二阶锥松弛方法,将非线性与强非凸性约束转化为混合整数二阶锥规划问题,以满足锥搜索空间的要求,从而提升求解效率。经过二阶松弛,支路潮流约束可以写成标准二阶锥形式^[27],即

$$\begin{Bmatrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ \beta_{ij,t} - \alpha_{i,t} \end{Bmatrix}_2 \leq \beta_{ij,t} + \alpha_{i,t} \quad (27)$$

式中: $\alpha_{i,t}, \beta_{ij,t}$ 分别为节点 i 电压在 t 时刻的二次方和支路 ij 电流在 t 时刻的二次方。

4.2.2 配电网安全运行约束

电压、电流应不超过国标规定波动范围,保证系统能够在电网承载力范围内安全供电。Q/GDW 10738—2022《配电网规划设计技术导则》^[28]中规定:20 kV 及以下三相供电电压偏差为标称电压的 $\pm 7\%$;电流允许的波动范围在 $\pm 10\%$ 以内。符合电网承载力范围主要体现在对节点电压和支路电流的控制,即为

$$\begin{cases} v_{i,\min} \leq v_i^t \leq v_{i,\max} \\ |i_{ij,t}| \leq i_{ij,\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中: v_i^t 为 t 时刻节点 i 电压幅值; $i_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 电流幅值; $v_{i,\min}, v_{i,\max}$ 分别为节点 i 电压幅值的最小值、最大值; $i_{ij,\max}$ 为支路 ij 电流幅值的最大值。

4.2.3 分布式能源约束

分布式能源出力均应在其出力上下限内,具体表达式为

$$P_{i,t}^{\min, DG} \leq P_{i,t}^{DG} \leq P_{i,t}^{\max, DG} \quad (29)$$

式中: $P_{i,t}^{\max, DG}$ 和 $P_{i,t}^{\min, DG}$ 分别为 t 时刻分布式能源机组在并网节点 i 处的出力上限、下限; $P_{i,t}^{DG}$ 为分布式光伏出力在 t 时段被系统消纳的有功功率。

4.2.4 可转移负荷约束

考虑负荷需求侧具有可平移属性,其转移时间约束和转移前后负荷总量不变约束为^[29]

$$\begin{cases} y_{i,t}^{\text{in}} + y_{i,t}^{\text{out}} \leq 1 \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{TRin}} \leq y_{i,t}^{\text{in}} P_{i,t,\max}^{\text{TRin}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{TRout}} \leq y_{i,t}^{\text{out}} P_{i,t,\max}^{\text{TRout}} \\ \sum_t (P_{i,t}^{\text{TRin}} + P_{i,t}^{\text{TRout}}) = 0 \end{cases} \quad (30)$$

式中: $y_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $y_{i,t}^{\text{out}}$ 分别为 t 时刻节点 i 移入和移出负荷状态变量; $P_{i,t}^{\text{TRin}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{TRout}}$ 、 $P_{i,t,\max}^{\text{TRin}}$ 、 $P_{i,t,\max}^{\text{TRout}}$ 分别为 t 时刻节点 i 移入负荷功率、移出负荷功率、移入负荷功率上限、移出负荷功率上限, 本文设定此功率上限为 t 时刻节点负荷容量的 10%。

式(30)中, 第一个公式为负荷转移时间约束, 即同一节点在同一时间不能同时发生负荷的移入和移出; 第二、第三个公式约束了节点移入、移出负荷的功率上限, 保证节点负荷不超过节点容量; 第四个公式表示一个调度周期内移入和移出负荷的总量相同。

4.2.5 设备出力约束

不同设备的出力必须分别满足其相对应功率的上下限约束条件, 每种设备具体数学表达式为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{CCHP}} \leq P_{\text{CCHP},\max} \\ 0 \leq H_{\text{CCHP}} \leq H_{\text{CCHP},\max} \\ 0 \leq H_{\text{GB}} \leq H_{\text{GB},\max} \\ 0 \leq P_{\text{EB}} \leq M_{\text{EB}} N_{\text{EB}} \\ 0 \leq P_{\text{HP}} \leq M_{\text{HP}} N_{\text{HP}} \\ 0 \leq P_{\text{AC}} \leq M_{\text{AC}} N_{\text{AC}} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $P_{\text{CCHP},\max}$ 、 $H_{\text{CCHP},\max}$ 分别为 CCHP 机组最大电、热出力的数值; $H_{\text{GB},\max}$ 为燃气锅炉的最大热出力值; M_{EB} 、 M_{HP} 、 M_{AC} 分别为单台电锅炉、热泵、空调的容量。

4.2.6 设备爬坡约束

设备在任意时刻应满足机组爬坡约束条件, 即为

$$\begin{cases} -R_{\text{CCHP}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{CCHP}}(t + \Delta t) - P_{\text{CCHP}}(t) \leq R_{\text{CCHP}}^{\text{up}} \Delta t \\ -R_{\text{GB}}^{\text{down}} \Delta t \leq H_{\text{GB}}(t + \Delta t) - H_{\text{GB}}(t) \leq R_{\text{GB}}^{\text{up}} \Delta t \\ -R_{\text{EB}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{EB}}(t + \Delta t) - P_{\text{EB}}(t) \leq R_{\text{EB}}^{\text{up}} \Delta t \\ -R_{\text{HP}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{HP}}(t + \Delta t) - P_{\text{HP}}(t) \leq R_{\text{HP}}^{\text{up}} \Delta t \end{cases} \quad (32)$$

式中: $R_{\text{CCHP}}^{\text{down}}$ 、 $R_{\text{GB}}^{\text{down}}$ 、 $R_{\text{EB}}^{\text{down}}$ 、 $R_{\text{HP}}^{\text{down}}$ 分别为 CCHP 机组、燃气锅炉、电锅炉、热泵输出有功功率的下爬坡率; $R_{\text{CCHP}}^{\text{up}}$ 、 $R_{\text{GB}}^{\text{up}}$ 、 $R_{\text{EB}}^{\text{up}}$ 、 $R_{\text{HP}}^{\text{up}}$ 分别为 CCHP 机组、燃气锅炉、电锅炉、热泵输出有功功率的上爬坡率。

4.2.7 经济性约束

为确保电能替代方案的经济可行性和可持续

性, 须从经济性入手约束设备的全周期成本, 从而提高政府、企业和消费者的能源利用率。各设备在全周期各阶段产生的累计成本必须控制在预算成本的最大限额内, 具体约束如下:

$$C \leq C_{\max} \quad (33)$$

$$C_{\text{install}} = C_{\text{install,EB}} M_{\text{EB}} N_{\text{EB}} + C_{\text{install,HP}} M_{\text{HP}} N_{\text{HP}} + C_{\text{install,AC}} M_{\text{AC}} N_{\text{AC}} \quad (34)$$

$$C_{\text{on}} = C_{\text{Ebuy}} \times (P_{\text{EB}} + P_{\text{HP}} + P_{\text{AC}}) + C_{\text{Gbuy}} \times V \quad (35)$$

$$C_{\text{om}} = \eta_{\text{om,EB}} C_{\text{on,EB}} + \eta_{\text{om,HP}} C_{\text{on,HP}} + \eta_{\text{om,AC}} C_{\text{on,AC}} \quad (36)$$

式中: C 为投资、运行、维护阶段总成本; $C_{\max}$ 为全周期成本最大限额, 本文 $C_{\max}$ 取 250 万元; $C_{\text{install,EB}}$ 、 $C_{\text{install,HP}}$ 、 $C_{\text{install,AC}}$ 分别为电锅炉、热泵、空调的单位容量年费值; $\eta_{\text{om,EB}}$ 、 $\eta_{\text{om,HP}}$ 、 $\eta_{\text{om,AC}}$ 分别为电锅炉、热泵、空调的故障发生频率; $C_{\text{on,EB}}$ 、 $C_{\text{on,HP}}$ 、 $C_{\text{on,AC}}$ 分别为电锅炉、热泵、空调的运行燃料费。

综上所述, 模型中待优化的变量主要包括以下几类。

1) 设备数量变量: 优化电锅炉、热泵和空调的数量, 以接入量最大为优化目标;

2) 设备功率变量: 包含冷热电联供系统、燃气锅炉、电锅炉、热泵和空调的出力功率, 需要满足电、冷、热负荷的需求;

3) 经济约束变量: 包括投资、运行和维护费用, 用于在经济约束下进行设备配置优化;

4) 潮流和电压控制变量: 约束配电网各节点的电压和支路电流, 确保电网的安全稳定运行;

5) 负荷需求响应变量: 用于负荷移峰填谷的可平移负荷量。

5 算例仿真

5.1 数据设置

本文选取天津市某园区综合能源系统作为算例分析案例。电锅炉选取 DZ-50KW 型号, 热泵选取 GARC-KFX45CH-50 型号, 空调选取 KFR-35GW/N8XHC1 型号, 设备参数见文献[30]。表 1 展示了三类电能替代设备的费用年值计算结果。

根据《武清区发展和改革委员会关于今冬采暖季非居民天然气销售价格有关事项的通知》^[31](津武发改[2021]1号)规定, 天津地区集中供热用气价格为 2.23 元/m³。根据《国网天津市电力公司关于 2024

年11月代理购电价格的公告》^[32],具体分时电价标准如表2所示。

表1 不同设备投资费用年值表
Table 1 Annual value table of investment costs for different equipment

设备	初始投资 W/ (元/kW)	使用年 限 n/年	费用年值 $C_{install}/(元/kW)$
电锅炉	4 300	15	500
热泵	22 255	15	2 600
空调	9 400	10	1 400

本文基于 IEEE 33 节点系统,在不同节点接入典型电能替代设备,包括电锅炉、热泵、空调,由于其安装灵活,除与主网相连节点 1 外的节点 2—33 均可安装,并设置其他设备如冷热电联供系统、电锅炉、光伏、风机的安装位置分别为节点 3、节点 6、节点 9、节点 21。节点 33 配电系统如图 4 所示。

表2 分时电价标准
Table 2 Time-of-use electricity pricing standards

时间	分时电价/(元/kWh)
谷时(23:00—6:00、12:00)	0.35
平时(7:00、11:00、13:00、21:00—22:00)	0.61
峰时(8:00—10:00、14:00—20:00)	0.97

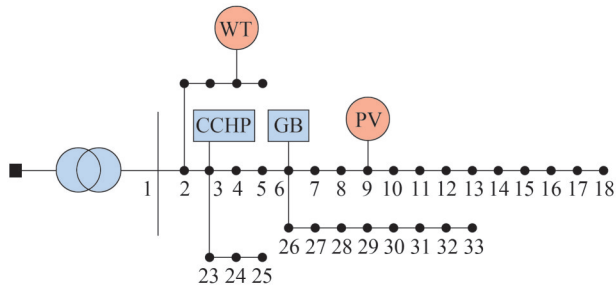


图4 33节点系统图
Fig.4 33-node system diagram

电、冷、热负荷及由 3.2 节模型得到的光伏、风机日出力信息如图 5 所示,负荷侧详细参数如表 3 所示。
为验证本文所提模型的有效性,设计 3 组对比场景进行分析,通过二阶锥松弛方法处理约束条件

后对模型求解。
场景 1:仅考虑电网承载力,对电能替代设备进行优化调度。
场景 2:在场景 1 的基础上,考虑经济约束对其进行优化调度。
场景 3:在场景 2 的基础上,考虑政策因素对其进行优化调度。

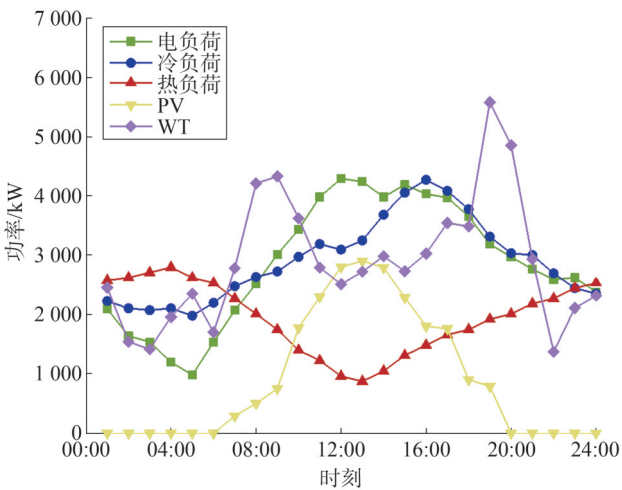


图5 电、冷、热负荷及风光出力预测图
Fig.5 Forecast chart of electricity,cooling,heating loads and wind-solar power output

表3 设备参数设置
Table 3 Equipment parameter settings

设备	容量/kW	效率	维修率/%
冷热电联供系统	2 500	0.35(电)/0.75(热)/ 0.90(冷)	
燃气锅炉	200	0.90	
电锅炉	50	0.95	2.5
热泵	50	2.00	0.8
空调	1.5	3.00	0.8

在建筑领域,天津市累计出台专项政策 9 项,聚焦发展节能建筑,推广清洁取暖技术。由出台政策可见,建筑领域对于热泵政策支持充分且运维成本较低;尽管电锅炉技术享受电价补贴政策支持,但由于其供暖效率低于热泵系统,总体经济性劣于传统燃煤锅炉,未来若有更多优惠政策支撑,有望进一步

进行电能替代。电锅炉、热泵、空调的政策支持系数分别为0.33、0.45、0.22。

5.2 仿真结果

5.2.1 接入设备数量

对场景1—场景3进行模拟,表4展示了系统可容纳的最大电能替代设备数量。总体而言,空调设备的单体功率较小,且温控负荷频繁启停,配电网能够容纳较多的空调设备。相比之下,电锅炉系统和热泵设备的功率较大,通常长时间运行,给配电网带来较大的负荷压力,因此配电网能够容纳的此类设备的数量相对较少。

在经济因素制约后,电锅炉出力增加而热泵出力有所减少,出现这一现象是因为尽管电锅炉热效率相对较低,但其较低的初始投资成本和运行维护费用在经济性评估中占据优势,从而形成两种设备配合出力的运行模式;再加入政策因素后,由于政策支持较好,热泵相比电锅炉在供暖方面仍然占优,空调出力也有所增加。

表4 电能替代设备负荷承载力极限数量

Table 4 Maximum number of load-carrying capacity of electric energy replacement equipment 单位:台

场景	电锅炉	热泵	空调
1	0	13	468
2	6	10	468
3	0	11	505

对比以上结果可知,在经济性约束下,电锅炉由于其运行成本较低,电能替代潜力有所提升,但在加入政策因素后,电能替代潜力仍不如热泵,需要通过进一步优化政策拓宽其未来发展空间。

5.2.2 经济优化结果

对模型求解可得三种场景下电能替代设备费用年值。场景1未参与经济调度,其费用年值为2 689 513元,加入经济性约束后,场景2、场景3的费用年值分别为2 455 271元、2 492 517元。

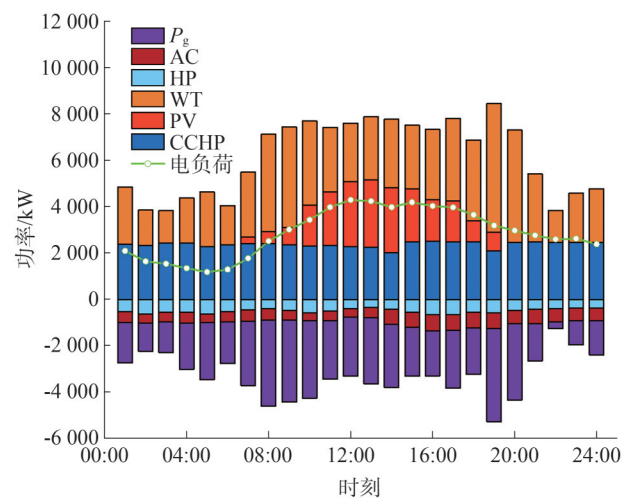
对比经济调度前后结果可知,通过电锅炉和热泵的配合出力达到一定的供能需求,其经济效果优于单一设备出力,每年能节省大约23万的成本,减少8.71%的费用年值。加入政策因素后,经济调度不再单纯追求最低成本,而是需要综合考虑环境、能

源转化效率等多方面因素。这些政策对长期可持续发展和社会效益有重要作用,但在短期内,可能通过提高电力生产和调整出力设备,使费用年值有所增加,因此场景3相较场景2提高了1.52%的费用年值。

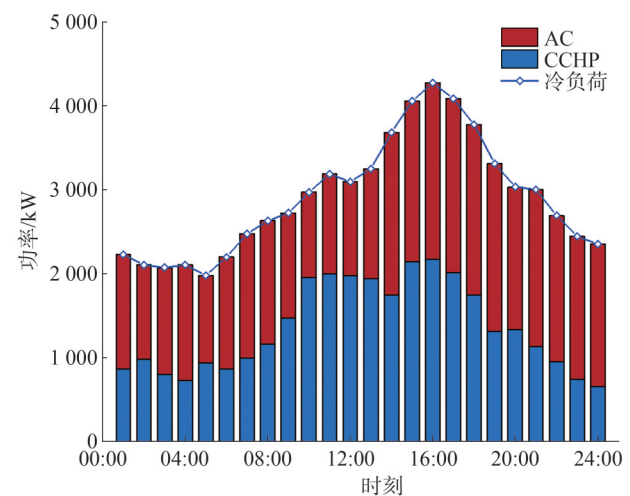
5.2.3 不同场景设备出力对比分析

场景1下综合能源系统中各设备出力如图6所示,其中 P_g 为上级电网供电。

在一个调度周期内由CCHP机组出力与风机出力来共同承担电负荷,“峰时段”增加的出力由光伏出力补偿。光照强度在12:00—14:00达到高峰,同时光伏出力也达到峰值,促进能源在本地就地转化利用,提升能源利用效率。风机出力在傍晚时刻达到最大,由于日照减少导致地表温度下降形成温差,从而产生或增强局部的风速,增加风力发电机的出力。



(a) 电负荷



(b) 冷负荷

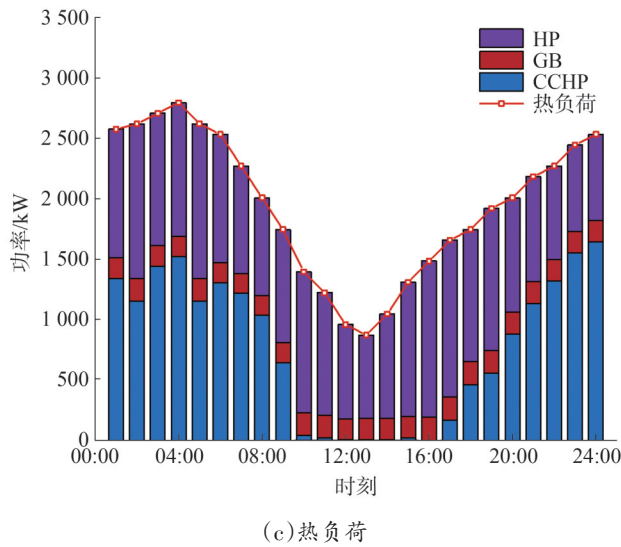


图6 场景1各设备出力

Fig.6 Scenario 1: output of each device

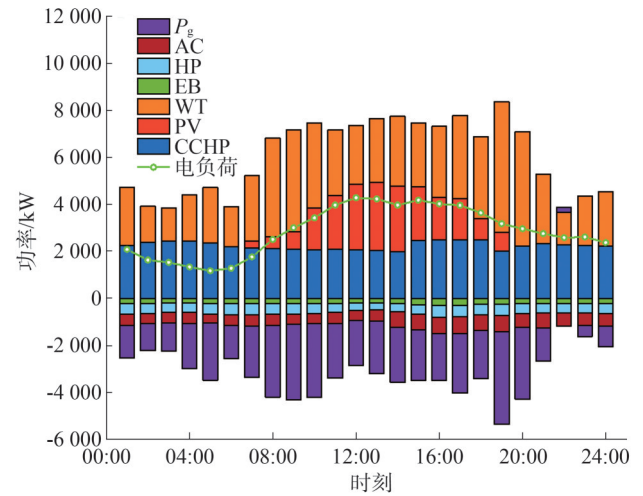
冷负荷由空调和CCHP机组共同提供;在11:00和16:00这两个冷负荷高峰时段,CCHP机组的出力保持相对稳定,而空调则通过灵活调整增加出力来适应负荷的峰谷变化,这是因为空调为灵活性资源,便于控制。

在热负荷的“谷时段”,热泵为主要供能设备。当负荷增加时,CCHP机组与热泵共同出力,20:00之后,热泵出力逐渐减少,而CCHP机组出力相应增加。这主要是因为夜间环境温度通常低于白天,导致热泵的制热效率下降。热泵通过吸收环境热量工作,环境温度降低时,其需要更多能量从低温环境中提取等值热量^[33],这会导致夜间出力减少。在整个调度周期中,燃气锅炉的出力较少,由于电锅炉的热效率低于热泵,系统中无电锅炉出力。

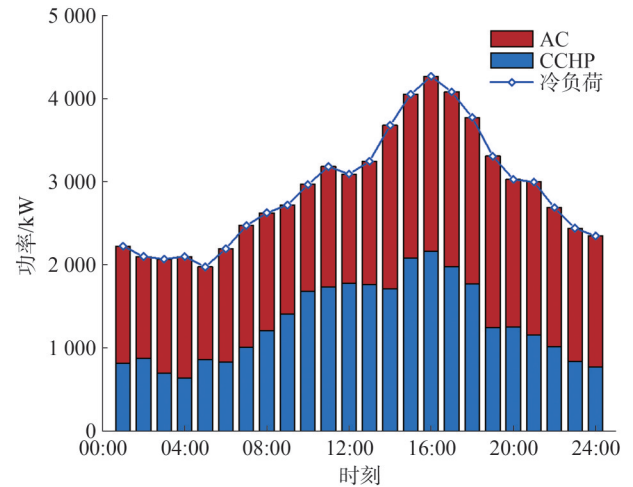
场景2下综合能源系统中各设备出力如图7所示。

与场景1相比,在加入经济性约束后,电负荷和冷负荷的出力基本保持不变。然而,热负荷方面,热泵的出力有所减少,尤其是在热负荷低谷时段,其出力也降至低谷。这是因为在热负荷低谷时段,热泵可能无法即时提供足够的热水,需要依赖储热水箱来满足需求。如果储热水箱的储水量不足或保温效果不佳,热泵在这些时段的出力就会进一步减少^[34]。尽管电锅炉的热效率低于热泵,但因其具有经济性优势,其出力有所增加,并且在各时段均匀出力;剩

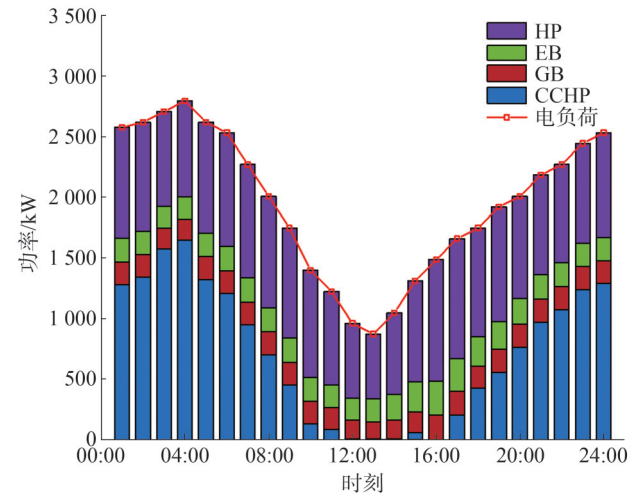
余的热负荷则继续由燃气锅炉和CCHP机组提供。



(a) 电负荷



(b) 冷负荷

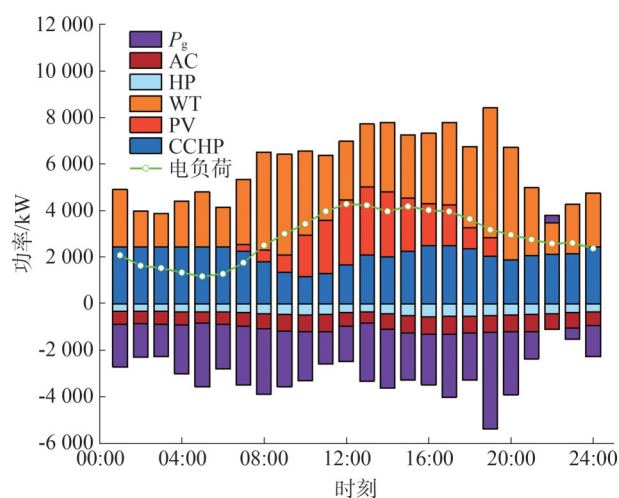


(c) 热负荷

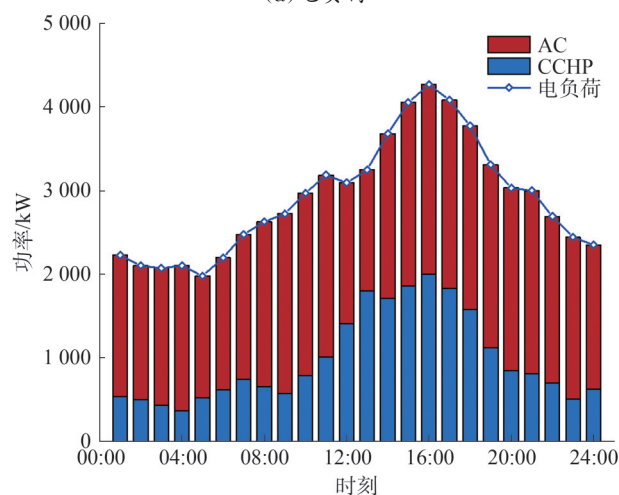
图7 场景2各设备出力

Fig.7 Scenario 2: output of each device

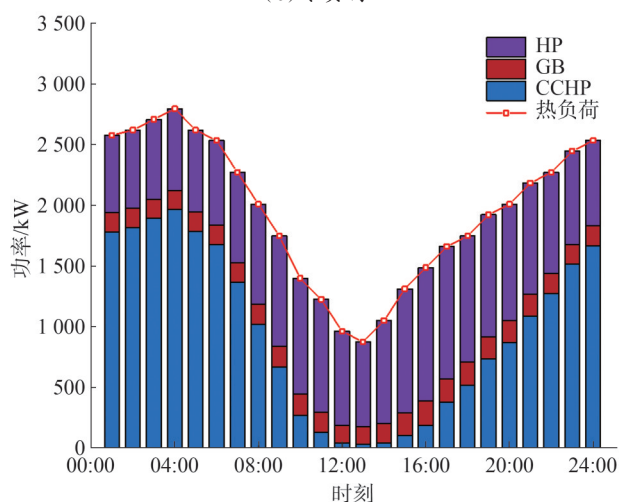
场景3下综合能源系统中各设备出力如图8所示。



(a)电负荷



(b)冷负荷



(c)热负荷

图8 场景3各设备出力

Fig.8 Scenario 3: output of each device

与场景2相比,在引入政策性因素后,CCHP机组在电负荷峰时段的出力有所减少;冷负荷方面,空调出力从每时段1 200 kW增加至1 800 kW,而CCHP机组出力相应减少;热负荷方面,热泵出力略有增加,CCHP机组在夜间至凌晨时段承担了主要出力。由于政策对热泵的支持力度相对不足,且结合效率因素后,电锅炉的经济性优势未能体现,因此电锅炉未参与出力。

与场景1相比,空调出力增加,而热泵出力减少,这与当前政策对空调的支持程度高于热泵的现状一致,进一步验证了所建模型的正确性。

5.2.4 系统安全性验证

33节点24 h电压如图9所示。

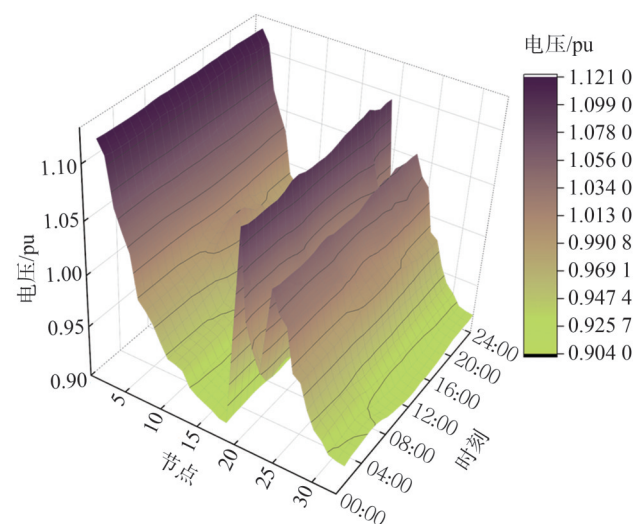


图9 33节点24 h电压图

Fig.9 24-hour voltage diagram of 33 nodes

节点1至18的电压从峰值缓慢降低,而节点19至节点22、节点23至节点25、节点26至节点33的电压均在达到区间峰值后呈现缓慢下降趋势。这种电压变化模式符合IEEE 33节点系统的潮流分布特征。整体来看,各时段电压波动较小,电压值均接近1,未出现电压越限或过低的情况。

24 h支路电流图如图10所示。

支路1与上级电网相连,沿着潮流方向电流逐渐减小,支路18、支路22、支路25为潮流分支,电流变化趋势符合IEEE 33节点系统的潮流分布。各时段电流波动幅度控制在配电网安全运行的约束范围

内,确保了电网的稳定性和可靠性,避免了因电流波动过大而可能引发的设备损坏或供电中断,从而确保电力系统的高效和安全运行。

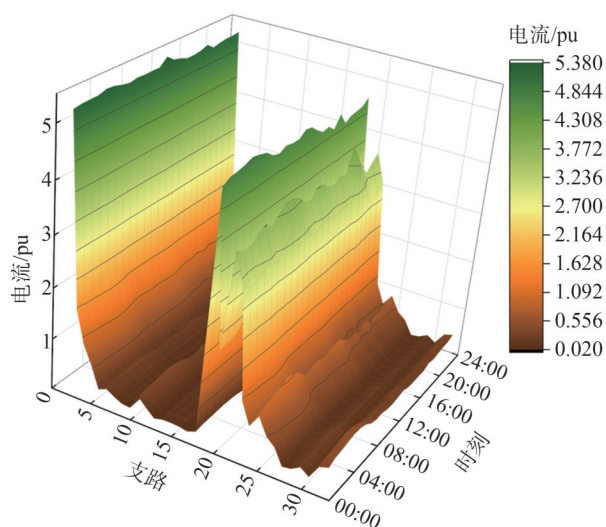


图10 24 h支路电流图

Fig.10 24-hour branch current diagram

上述节点电压和支路电流的结果表明:在加入电能替代设备后,配电网仍能安全稳定运行;在增加电能替代设备数量的同时,电压和电流并未出现大幅波动,且未超出配电网的负荷承载能力。这进一步验证了所建模型的可行性。

6 结论

以建筑领域电能替代为研究方向,选取电锅炉、热泵、空调三种典型电能替代技术进行技术、经济性分析,以综合能源系统为研究对象,考虑电网承载力、经济、政策因素测算配电网电能替代潜力。

1)通过费用年值法,测算所选电能替代技术的全周期经济性,电锅炉优势在于其投资运行成本低,热泵优势在于其制热效率高,通过算例得到二者配合下最优出力,目前热泵相较于电锅炉具有更大的市场空间,电锅炉的发展还需更多的政策支持。

2)为建筑领域电能替代经济优势提供了量化的理论支撑,通过对优化调度后的经济结果进行分析,从经济层面说明组合电能替代的效果优于单一替代,使得其经济效果可观,为相关政策制定和技术发

展提供了科学依据。

3)提出了考虑电网承载力的电能替代潜力测算模型,通过分析电压、电流结果对系统的安全性进行验证,表明了所建模型能够在电网承载力下合理分析电能替代潜力。

参考文献

- [1] 王伟,张新鹤,孙钢.中国电能替代政策分析及展望[J].华北电力大学学报(社会科学版),2020(5):33-40.
WANG Wei, ZHANG Xinhe, SUN Gang. Analysis and prospect of China's electric energy substitution policy [J]. Journal of North China Electric Power University (Social Sciences), 2020 (5): 33-40.
- [2] 岳付昌,刘晗,苏晓东,等.考虑负荷侧电能替代的区域配电网碳溯源方法[J].广东电力,2024,37(2):47-55.
YUE Fuchang, LIU Han, SU Xiaodong, et al. Carbon tracing method for regional distribution networks considering load side electricity substitution [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37 (2):47-55.
- [3] 张博华.天津市电能替代项目综合效益评价研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- [4] 陈春常.当代电能替代技术的应用[J].中国高新科技,2023(5):38-39.
CHEN Chunchang. Application of contemporary power substitution technology [J]. China High and New Technology, 2023(5):38-39.
- [5] 张强,王超,李欣蔚,等.考虑典型电能替代的配电网新能源接纳能力研究[J].可再生能源,2023,41(10):1414-1420.
ZHANG Qiang, WANG Chao, LI Xinwei, et al. Study on new energy acceptance capacity of distribution network considering wind power and photovoltaic complementation and typical power substitution [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41 (10): 1414-1420.
- [6] 杨安全,赵清松,岳颖,等.电-气-热综合能源系统多目标优化调度[J].东北电力技术,2023,44(12):1-8.
YANG Anquan, ZHAO Qingsong, YUE Ying, et al. Research on multi-objective optimization scheduling of electricity-gas-thermal integrated energy systems based on wind / photovoltaic power accommodation [J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44 (12):1-8.
- [7] 陈增.区域电能替代潜力评估体系及模型研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [8] 袁兴宇,梁俊宇,王达达,等.典型电能替代技术的成本效益分析[J].电力需求侧管理,2022,24(6):6-13.
YUAN Xingyu, LIANG Junyu, WANG Dada, et al. Cost and benefit analysis of the typical electric energy substitution technology [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6):6-13.

- [9] 傅旭,李富春,杨欣,等.清洁供暖电能替代方案经济性分析[J].电力需求侧管理,2021,23(5):5-9.
FU Xu, LI Fuchun, YANG Xin, et al. Economic analysis of alternative electricity for clean heating [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5): 5-9.
- [10] 邓晨成,黄庆祥,张紫丹.电能替代供冷供热技术与燃气分布式能源的技术经济性对比分析[J].工业加热,2020,49(2):64-68.
DENG Chencheng, HUANG Qingxiang, ZHANG Zidan. Technical and economical comparison of electric energy alternative cooling and heating technologies and gas distribution energy [J]. Industrial Heating, 2020, 49(2): 64-68.
- [11] 陈吉奂,卢毓东,苗博,等.基于逻辑回归模型的电能替代用户辨识研究[J].浙江电力,2020,39(1):16-21.
CHEN Jihuan, LU Yudong, MIAO Bo, et al. Research on discrimination of electric energy substitution users based on logistic regression model [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(1): 16-21.
- [12] 孙毅,周爽,单葆国,等.多情景下的电能替代潜力分析[J].电网技术,2017,41(1):118-123.
SUN Yi, ZHOU Shuang, SHAN Baoguo, et al. Analysis of electric power alternative potential under multi-scenario [J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 118-123.
- [13] 魏琪峰.双碳背景下我国电能替代潜力预测及其效益研究[D].北京:华北电力大学,2023.
- [14] 廖敏乐,黄重阳,戴承承,等.基于时间序列和BP神经网络的电能替代潜力分析方法[J].综合智慧能源,2022,44(3):38-43.
LIAO Minle, HUANG Chongyang, DAI Chengcheng, et al. Analysis method of electric energy substitution potential based on time series and BP neural network [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(3): 38-43.
- [15] 袁新润,吴亮,张剑,等.天津电能替代形势与电采暖经济性分析[J].电力需求侧管理,2015,17(5):24-29.
YUAN Xinrun, WU Liang, ZHANG Jian, et al. Situation of energy substitution and economic analysis of electric heating in Tianjin [J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(5): 24-29.
- [16] 张铭泽,华晟辉,李轶立,等.考虑电能替代负荷的配电网承载力评估方法[J].电力需求侧管理,2023,25(5):1-8.
ZHANG Mingze, HUA Shenghui, LI Yili, et al. Evaluation method of distribution network hosting capacity considering electric energy substitution load [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(5): 1-8.
- [17] 陈蓉珺,何永秀.西气东输电能替代经济性评估与模式研究[J].山东电力技术,2017,44(7):25-27.
CHEN Rongjun, HE Yongxiu. Economic evaluation and mode study of electricity substitution for west-to-east gas transmission [J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(7): 25-27.
- [18] 盖超,张凯,陈佳,等.考虑需求响应的典型场景综合能源系统规划研究[J].山东电力技术,2023,50(11):75-86.
GAI Chao, ZHANG Kai, CHEN Jia, et al. Research on the planning for integrated energy system planning of typical scenarios considering demand response [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(11): 75-86.
- [19] 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.
- [20] 冯振,阎俏,迟青青,等.综合能源网络建模与运维技术研究综述[J].山东电力技术,2024,51(5):9-18.
FENG Zhen, YAN Qiao, CHI Qingqing, et al. A review of modeling, operation and maintenance technologies for multi-energy coupled integrated energy network [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(5): 9-18.
- [21] 汪惟源,窦飞,程锦闽,等.一种风光联合出力概率模型建模方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):22-29.
WANG Weiyuan, DOU Fei, CHENG Jinmin, et al. A modeling method for a wind and photovoltaic joint power probability model [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 22-29.
- [22] SALAMEH Z M, BOROWY B S, AMIN A R A. Photovoltaic module-site matching based on the capacity factors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(2): 326-332.
- [23] 葛罗,冯焯,胡凯,等.新型电力系统下空调负荷聚合建模及可调控潜力评估[J].浙江电力,2023,42(4):45-53.
GE Luo, FENG Xuan, HU Kai, et al. Air conditioning load aggregation modeling and the schedulable potential evaluation in the context of new-type power system [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(4): 45-53.
- [24] 魏震波,马新如,郭毅,等.碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行[J].电力建设,2022,43(1):1-9.
WEI Zhenbo, MA Xinru, GUO Yi, et al. Optimized operation of integrated energy system considering demand response under carbon trading mechanism [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 1-9.
- [25] 丁历威,吕洪坤,韩高岩,等.计及综合需求响应的三联供系统容量配置优化[J].浙江电力,2023,42(12):117-125.
DING Liwei, LYU Hongkun, HAN Gaoyan, et al. Capacity configuration optimization for the CCHP system considering integrated demand response [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(12): 117-125.
- [26] LI Y, WANG C L, LI G Q, et al. Improving operational flexibility of integrated energy system with uncertain renewable generations considering thermal inertia of buildings [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 207: 112526.

- [27] 宋亮,邢志同,毛晨旭,等.基于智能光储软开关的柔性有源配电网潮流优化[J].山东电力技术,2024,51(6):36-42.
SONG Liang, XING Zhitong, MAO Chenxu, et al. Power flow optimization of flexible active distribution network based on photovoltaic-energy storage SNOP[J].Shandong Electric Power, 2024,51(6):36-42.
- [28] 国家电网有限公司.配电网规划设计技术导则:Q/GDW 10738—2022[S].北京:国家电网有限公司,2022.
- [29] 姚艳,康家乐,汪雅静,等.考虑综合需求响应和多能储能装置的综合能源系统优化调度[J].浙江电力,2022,41(8):65-72.
YAO Yan, KANG Jiale, WANG Yajing, et al. Optimal dispatching of integrated energy system considering integrated demand response and multi-energy storage devices[J].Zhejiang Electric Power, 2022,41(8):65-72.
- [30] 李振,高智溥.北方冬季供暖技术的评价与选择[J].中国煤炭, 2018,44(12):135-140.
LI Zhen, GAO Zhipu. Evaluation and selection of supply heating methods in northern winter [J]. China Coal, 2018, 44 (12) : 135-140.
- [31] 天津市武清区发改委.武清区发展和改革委员会关于今冬采暖季非居民天然气销售价格有关事项的通知[EB/OL].(2021-01-18)[2024-08-18].https://www.tjwq.gov.cn/zwgk/zcwj/wqqzc/qfzggw/202101/t20210119_5328670.html.
- [32] 国网天津市电力公司.国网天津市电力公司关于2024年11月代理购电价格的公告[EB/OL].(2024-10-28)[2024-11-01].
http://www.tj.sgcc.com.cn/html/main/col2774/2024-10/28/20241028231609186219013_1.html.
- [33] 曹敏,巨健,白泽洋.供暖领域电能代替技术环保效益模糊评价研究[J].环境科学与管理,2021,46(2):159-163.
CAO Min, JU Jian, BAI Zeyang. Research on fuzzy evaluation of environmental protection benefits of electric energy substitution technology in heating field [J]. Environmental Science and Management, 2021,46(2):159-163.
- [34] 刘鹤翔.地区电能替代效益及综合潜力评价体系分析[D].昆明:昆明理工大学,2019.

收稿日期:2024-10-15

修回日期:2025-03-06

作者简介:

庞 超(1995),通信作者(643576637@qq.com),男,硕士,工程师,主要研究方向为综合能源系统建模、优化调度;

丁 一(1990),男,硕士,副高级工程师,主要研究方向为电网低碳运行、优化调度;

赵晨阳(1989),男,硕士,副高级工程师,主要研究方向为新能源并网、优化调度;

霍现旭(1986),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为电网安全规划、优化调度。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.07.007

基于L-M优化BP算法的多因素协同电力负荷预测

白 卓¹, 郭 啸^{2*}, 孙华忠³

(1. 国网天津市电力公司城南供电分公司, 天津 300201; 2. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

3. 国网山东省电力公司潍坊供电公司, 山东 潍坊 261000)

摘要: 电力负荷预测对电网的规划与营运尤为重要, 可以帮助电网公司对电力资源进行合理调度, 更好地平衡电力资源, 从而提高电力系统的经济性和稳定性。针对现有神经网络算法精度差、收敛性不高等缺点, 提出基于列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, L-M)优化反向传播(back propagation, BP)算法的多因素协同电力负荷预测方法, 在改进BP算法的基础上利用L-M算法, 融合最速下降法和高斯-牛顿法克服了训练慢、易陷入局部极值、预测误差大等缺点, 通过Trainlm、Traingd、Trainrp等对L-M算法进行训练, 考虑包含温度、气温、日期等影响电力负荷的因素并协同冷、热负荷对电力负荷进行预测, 最后以某居民小区为例验证所提方法的有效性。与其他方法相比, L-M优化BP算法的多因素协同电力负荷预测在解决非线性复杂预测问题上表现出色, 不仅准确度较高而且计算速度更快、误差更小。

关键词: L-M; BP算法; 协同; 负荷预测; 误差

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)07-0068-08

Multi-factor Collaborative Power Load Forecasting Based on L-M Optimized BP Algorithm

BAI Zhuo¹, GUO Xiao^{2*}, SUN Huazhong³

(1. State Grid Tianjin Electric Power Company Chengnan Power Supply Branch, Tianjin 300201, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid at Tianjin University, Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

3. State Grid Weifang Power Supply Company, Weifang 261000, China)

Abstract: Power load forecasting is particularly important for the planning and operation of the power grid, as it can help power grid companies to make reasonable scheduling of power resources, better balance power resources, and thus improve the economy and stability of the power system. This article proposes a multi-factor collaborative power load forecasting method based on Levenberg Marquardt (L-M) optimized backpropagation (BP) algorithm to address the shortcomings of existing algorithm optimized BP neural networks, such as poor accuracy and low convergence. On the basis of improving the BP algorithm, the L-M algorithm is used to integrate the steepest descent method and Gaussian Newton method to overcome the disadvantages of slow training, easy fall into local optima, and large prediction errors. Trainlm, Traingd, Trainrp, etc., are used to train the L-M algorithm, considering factors that affect power loads such as temperature, air temperature, and date, and to predict power load in conjunction with cooling and heating loads. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified using a residential community as an example. Compared with other methods, the L-M optimized BP algorithm for multi-factor collaborative power load forecasting performs well in solving nonlinear and complex forecasting problems with high accuracy, faster calculation speed, and smaller errors.

Keywords: L-M; BP algorithm; coordination; load forecasting; error

0 引言

电力系统的负荷预测对调度运行及生产计划具

有深远影响, 其准确性对增强系统安全性、稳定性及经济效益至关重要。随着电力市场的日益成熟与扩展, 负荷预测的重要性愈发凸显, 成为推动电力系统高效运作的关键因素。

电力负荷预测是指通过对历史电力负荷的分析和建模, 来预测未来一段时间内的电力负荷情况^[1],

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(520604230004)。
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(520604230004)。

为保证发电量和用电量的动态平衡,考虑用户的用能特点和负荷变化的不确定性,做好电力负荷的精确预测^[2],可以有效帮助发电生产进行规划安排,对电网运行的可靠性和安全性进行分析并制定维护计划^[3]。目前,在电力负荷预测领域,针对负荷预测的研究工作已形成了较为系统的分类体系,大致可分为3类:统计方法、机器学习法和深度学习方法。从维度上看,预测研究主要从时间与空间两个维度开展。在时间尺度上,依据预测时长的差异可分为中长期预测、短期预测和超短期预测。空间尺度上,预测对象依据其范围和特性的不同,分为集群预测和单一预测等。

统计方法中包含线性外推^[4]、灰色理论^[5]、时间序列^[6]、卡尔曼滤波^[7]、小波变换^[8]等方法,在早期负荷预测中发挥了一定作用,但这类方法往往基于历史数据的简单趋势分析,难以应对复杂多变的电力负荷情况,对于非线性关系的捕捉能力有限。文献[9]将灰色理论加入配电网负荷预测中,分析灰色模型对负荷预测中消除累计误差的作用,但是灰色模型对数据要求高并且长期预测精度会降低,难以涵盖所有因素。文献[10]采用数据分解与卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)-双向长短期记忆神经网络(bidirectional long-short term memory neural network, BiLSTM)结合,提高了预测精度,实验中指标表现较好,但是其计算资源需求大、解释性差且未涉及异常值处理。文献[11]利用互补集合经验模态分解数据,结合支持向量回归和自回归积分滑动平均预测模型,考虑气象因素,对电力负荷进行预测,预测精度较高,但是其数据处理方法较复杂,计算成本较高。

深度学习方法中包含CNN、循环神经网络^[12]、长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)、BiLSTM等,此类方法存在计算资源需求大、训练时间长、模型解释性差、易过拟合、对数据量和质量要求高、参数调整复杂等缺点。文献[13]提出了一种基于LSTM的电力负荷预测模型,通过LSTM网络的输出串联,对电力短期负荷进行了预测,但是预测方法存在对数据要求高、模型复杂等缺点,在一些小型电力企业或计算设备性能较低的场景下,存在无法有效运行本模型的可能。文献[14]针对短期电力负荷预测,提出基于改进麻雀搜索算法优化的CNN、双

向门控循环单元及注意力机制的组合预测模型,预测精度高,经与其他模型对比及特征筛选实验验证,在短期电力负荷预测中表现出色,但是其在应对智能电网发展和新能源并网带来的复杂变化时创新不足,特征因素有待加强。文献[15]提出经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)-猎人猎物优化(hunter prey optimization, HPO)-BiLSTM模型,先EMD分解数据,用HPO优化BiLSTM,仿真精度较高,但未考虑气象等因素。

机器学习法包含遗传算法^[16]、神经网络^[17]、人工神经网络等方法,在电力负荷预测中占有一定的比重,但是大部分文献存在效率和局部最优问题,并且在原始数据处理以及多特征描述方面考虑不全面。文献[18]提出基于遗传算法的反向传播(back propagation, BP)神经网络算法,利用遗传算法改善了BP算法的权值和阈值的选取,但算法的搜寻速度有待提升。文献[19]提出基于遗传模拟退火算法改进的BP神经网络,考虑了4个影响因子作为输入变量,通过优化节点连接权值提高预测精度和鲁棒性,但未考虑冷热负荷对电负荷的影响。文献[20]提出改进人工蜂群算法优化BP神经网络的负荷预测方法,考虑了负荷数据与温度、湿度等天气数据但未考虑工作日与双休日、四季等的变化对电力负荷数据的影响。文献[21]提出基于串行式遗传算法-BP神经网络模型的预测方法,虽采用灰色关联分析确定了负荷主要影响因素,但增加了算法的复杂度,降低了算法的实用性。文献[22]中利用猫群算法对BP神经网络的权值和阈值进行优化,同样未考虑工作日对负荷的影响,此外此方法只能用于短期负荷预测,无法用于中长期电力负荷预测。文献[23]中提出多岛遗传算法优化的BP神经网络,虽然通过选择、交叉和变异等操作过程可以增加准确度,但是同时也增加了程序的繁琐性。

综上所述,国内外已有很多学者对相关电力负荷预测进行了探究,通过不同方法的多元尺度分析实现了电力负荷长短期预测,但是鲜有文献将影响电力负荷的不同因素考虑在内,而且针对电力负荷预测问题采用的方法或者模型解释性不高、易过拟合。因此提出基于列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, L-M)优化BP算法的多因素协同电力负荷预测方法,在综合考虑包含温度、天气、节日等多

种因素后还协同冷、热负荷对电力负荷进行预测,采用归一化以及反归一化的数据处理方法降低预测的复杂度,增加预测的精确度,为电力系统负荷预测提供新的有效途径。

1 L-M改进的BP算法预测

标准BP算法训练慢、易陷入局部极值,预测误差大,难以满足电力预测需求,采用改进BP算法进行预测,而L-M算法融合最速下降法(快速下降初期)和高斯-牛顿法(后期精确搜索),优化了迭代过程。采用一阶偏导数来近似L-M算法中的 $H^{(s)}$ 。具体为

$$H^{(s)} = J^T J \quad (1)$$

L-M法的调整公式为

$$w_{s+1} = w_s - [H^{(s)} + \mu I]^{-1} \nabla E(w_s) \quad (2)$$

式中: $H^{(s)}$ 为海森矩阵,由二阶偏导数构成,表示函数的局部曲率; J 为雅可比矩阵; w_{s+1} 、 w_s 分别为第 $s+1$ 次、第 s 次迭代时的网路权值; μ 为自适应调整的值; I 为单位矩阵; $\nabla E(w_s)$ 为梯度。

采用某区域1年间的电力负荷数据作为输入进行神经网络学习,将训练函数分别设置为trainlm、traingd、trainrp,3种训练函数的训练结果如图1—图3所示。

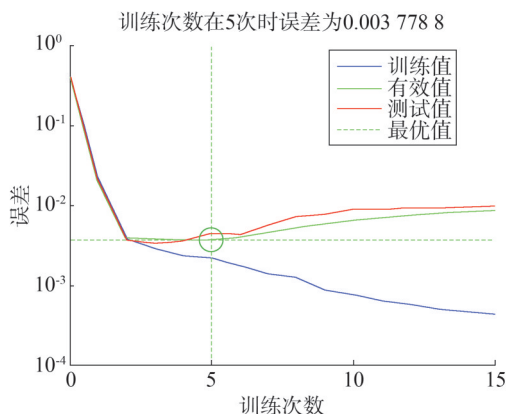


图1 Trainlm训练结果

Fig.1 Trainlm training results

从图1中可以看出,Trainlm函数相比Trainrp(1 000次)和Traingd(244次)训练函数而言,仅进行了5次就完成了训练目标,体现了基于L-M算法优化后的BP神经网络对负荷预测的优越性。

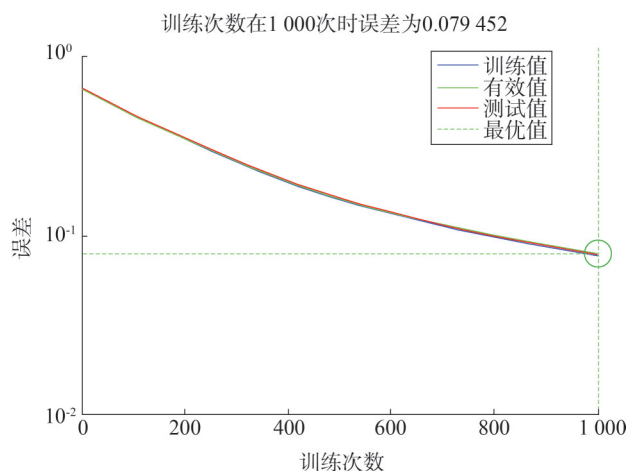


图2 Traingd训练结果

Fig.2 Traingd training results

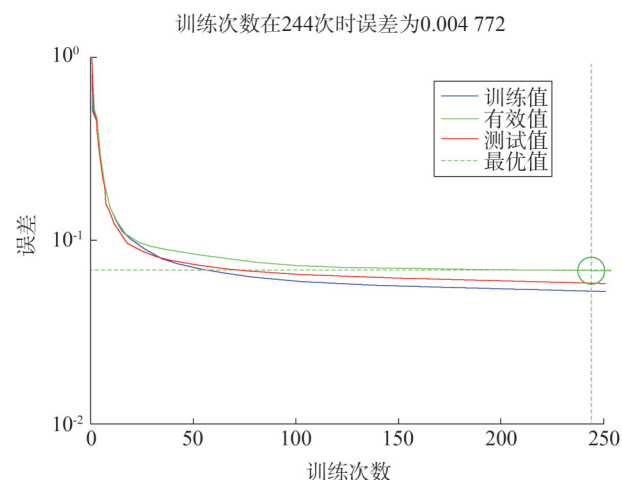


图3 Trainrp训练结果

Fig.3 Trainrp training results

电力负荷通常与冷、热负荷的变化有一定的关联,因此在基于L-M改进BP神经网络负荷预测中,输入层的神经元在原来的基础上加入热电比、冷电比数据增加预测的准确性,基本步骤如图4所示。

2 样本数据处理及结构确定

2.1 历史数据的选取及预处理

在电力负荷预测之前,需要先对数据进行处理。主要包括对遗漏的数据补充、识别并去除潜在的坏点、对偏差较大的数据修正或调整等。由于多种复杂因素的存在,在收集的每日负荷数据中某些数据点可能会与真实值产生显著偏差,形成所谓的“异

点”。直接利用异常数据预测将导致误差,为确保准确性,须平滑处理这些异点,方法包括水平处理和垂直处理。

电力负荷的变动在正常条件下呈现平稳连续性,意味着相邻时刻的负荷值差异通常不大。当差异显著时,可能源于设备记录误差或人为因素。针对此类异常点,可采用水平处理策略以减小其整体数据的影响。某时刻电力负荷取值计算如

式(3)所示。

$$\begin{cases} |Y(d,t) - Y(d,t-1)| > \alpha(t) \\ |Y(d,t) - Y(d,t+1)| > \beta(t) \\ Y(d,t) = \frac{Y(d,t-1) + Y(d,t+1)}{2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha(t)$ 、 $\beta(t)$ 分别为 t 时刻前向、后向负荷阈值; $Y(d,t)$ 为第 d 天 t 时刻电力负荷。

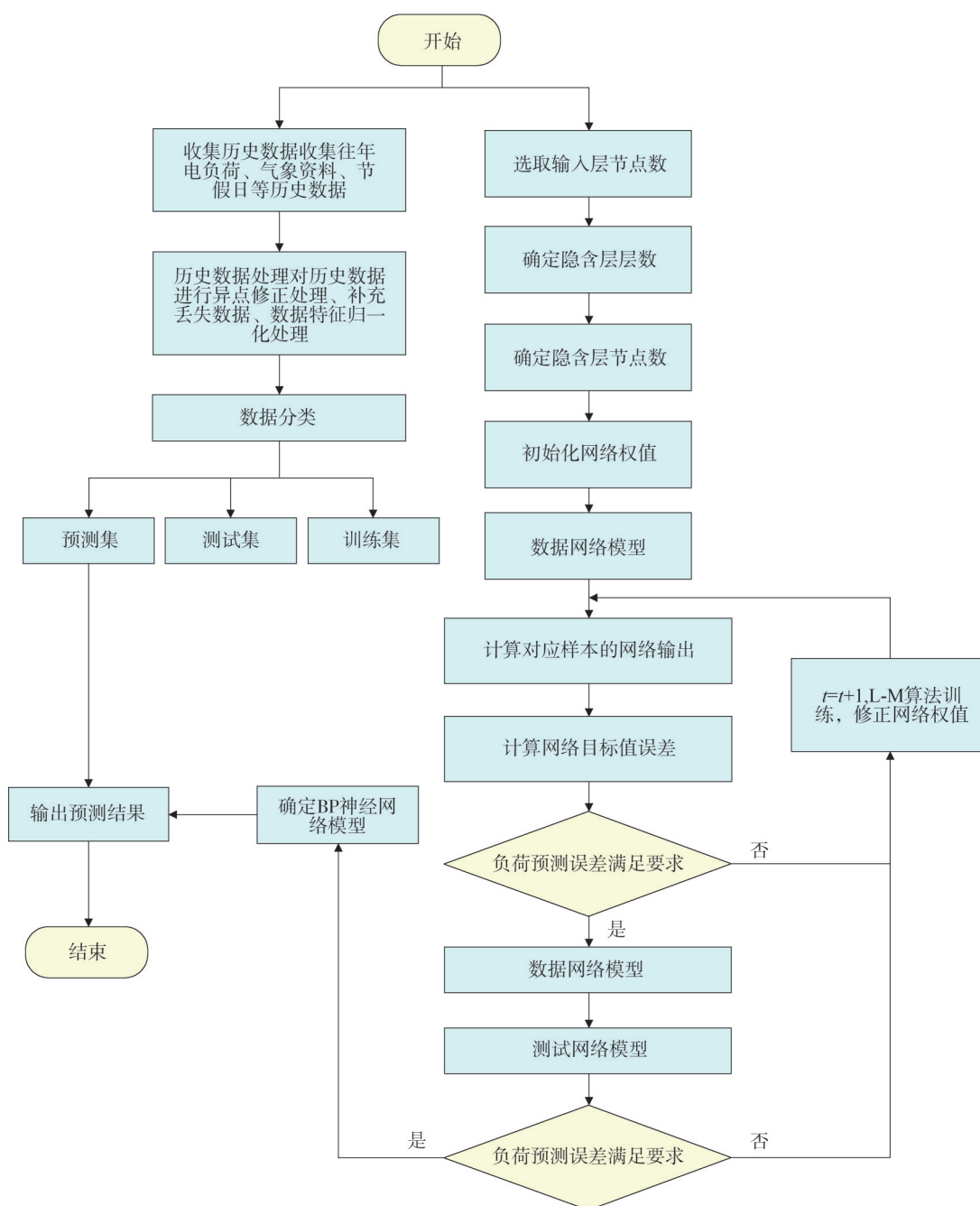


图4 负荷预测的基本步骤图

Fig.4 Basic steps diagram of load forecasting

负荷特性的日周期性分析表明,连续两天在相同时间点的负荷数据通常呈现相似性。若这些数据间出现显著偏差,超过预设阈值,则可能被视为异常或不良数据,需要进一步审核和校正,如式(4)和式(5)所示。

$$|Y(d,t) - m(t)| > r(t) \quad (4)$$

则

$$Y(d,t) = \begin{cases} m(t) + r(t), & Y(d,t) > m(t) \\ m(t) - r(t), & Y(d,t) < m(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $m(t)$ 为相邻一天在 t 时刻的负荷数据; $r(t)$ 为负荷数据在 t 时刻的误差阈值。

此外由于负荷具有一定的周期性,所以可以利用前一天或后一天同时刻的数据来替代因某些因素丢失的数据,保证数据的连续型,方便后续进行处理。

2.2 样本数据的归一化及量化处理

当使用未经任何处理过的数据时,由于纲量及单位不统一,无法直接进行计算,所以需要对数据进行归一化处理,保证数据的统一性,方便后续的计算。

1) 数据归一化。

将数据转化到 $[0,1]$,公式^[24-25]为

$$\begin{cases} P_n = \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \\ T_n = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ 分别为历史输入数据中的最大值、最小值; $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为目标样本数据中的最大值、最小值; P_n 为归一化输入数据; T_n 为归一化目标数据; T 为目标负荷样本; P 为训练样本。

训练结果还需反归一化,公式为

$$\hat{Y} = (T_{\max} - T_{\min})Y_n + T_{\min} \quad (7)$$

式中: $\hat{Y}$ 为训练结果反归一化值; Y_n 为归一化输出。

2) 影响因素的归一化和量化处理。

气象因素是负荷变动的主要影响者,工作日与休息日同样具有显著影响。除特殊节假日如春节、清明节、中秋节外,构建BP神经网络时,将这些影响因素作为输入并归一化处理。

(a) 温度和天气归一化处理。

为更准确地进行分析,根据前述归一化方法,将

温度的最大、最小值和平均值调整至区间 $[0,1]$ 内,将春、冬归为一类,夏、秋归为另一类,量化结果如表1和表2所示。

表1 春冬天气处理

Table 1 Spring and winter weather treatment

天气状况	量化值
暴雪	0
大雪	0.1
中雪	0.2
小雪	0.3
雨夹雪	0.4
大雨	0.5
中雨	0.6
小雨	0.7
阴	0.8
多云	0.9
晴	1.0

表2 夏秋天气处理

Table 2 Summer and autumn weather treatment

天气状况	量化值
暴雨	0.1
雷阵雨	0.2
阵雨	0.3
大雨	0.4
中雨	0.5
小雨	0.6
阴	0.7
多云	0.8
雾	0.9
晴	1.0

(b) 日期处理。

工作日取0,双休日、法定节假日取1,此量化旨在区分不同日期对负荷的影响。

2.3 确定网络的拓扑结构

BP神经网络中,输入和输出层均仅有一层,而隐含层的设计则具有灵活性,可根据具体需求选择一层或多层。在构建网络时,需根据实际应用场景

和需求来合理确定隐含层的层数。

初始值在 $(-1,1)$ 或 $(0,1)$ 范围内选取,采用每小时采集的电力负荷和热电比数据,输入样本涵盖前一天的历史负荷、热电比、温度范围、天气类型、日期分类(工作日、双休日、节假日等)和经济数据,总计57个输入节点。输出为24个节点,包含日内24 h时负荷预测值。此外,主要使用单隐含层的BP网络,利用特定公式来预测合适的节点数,并选择全局误差最小的节点数作为最终设置,公式为

$$j = \sqrt{i + k} + \alpha \quad (8)$$

式中: j 为隐含层的节点数; i 为输入节点数; k 为输出节点数; α 为 $[1,10]$ 之间的常数。令 $i=57, k=24$,根据仿真结果,确定隐含层的节点数为 $j=19$ 。

根据上述相关因素构建BP神经网络,如图5所示。输入层为包含电、热、冷负荷以及温度、气象、日期和经济等数据在内的57个神经元;输出层为某天24 h的负荷预测数据。

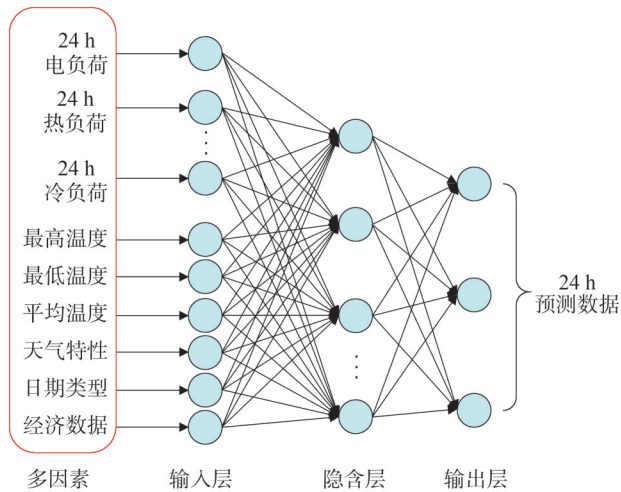


图5 BP神经网络负荷协同预测模型

Fig.5 BP neural network load collaborative forecasting model

3 实例分析

以某居民小区为例,分析24 h电力负荷、热电比、温度、天气、经济 and 日期数据,并将这些数据归一化或量化作为输入。采用前两年每日24 h负荷数据,其中一年为训练集,另一年为测试集。通过第二年某日数据预测次日负荷,目标误差设定为0.001。

应用L-M算法对网络进行训练。隐含层节点数

选取如表3所示,19个节点时平均误差为 1.73×10^{-4} ,误差为最小值,可视为最佳选择。

表3 各参数之间的关系

Table 3 The relationship between various parameters

节点数	平均误差	步数
13	1.64×10^{-4}	9
14	1.73×10^{-4}	8
15	1.81×10^{-4}	6
16	1.81×10^{-4}	6
18	1.81×10^{-4}	5
19	1.73×10^{-4}	5
20	2.17×10^{-4}	5
22	1.86×10^{-4}	5

图6和图7对比了协同优化算法预测的负荷与实际负荷,显示两者电负荷特性相似。

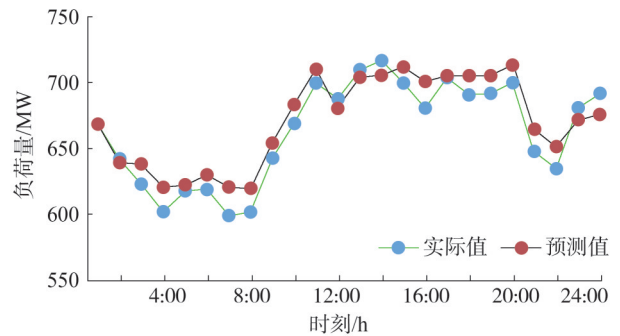


图6 负荷预测输出对比曲线

Fig.6 Comparison curve of load forecasting output

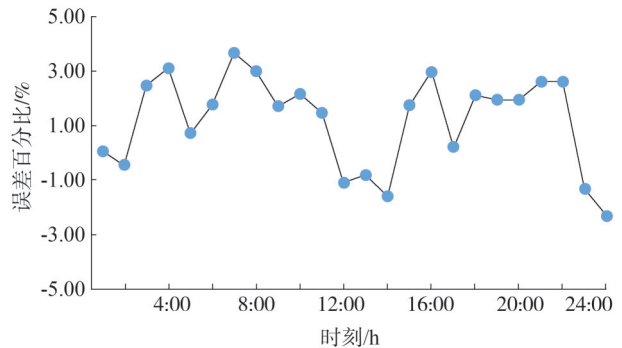


图7 电负荷相对误差百分比曲线

Fig.7 Relative error percentage curve of electrical load

其他预测方法的相对误差与平均相对误差与本文方法对比如表4所示。标准BP网络、灰色预测、本

文预测方法的平均相对误差分别为6.10%、2.32%、1.83%。采用的L-M优化BP算法的多因素协同电力负荷预测在精度上优于其他方法,平均相对误差比灰色预测和标准的BP算法要小很多,最大误差3.66%,最小0.06%,平均误差1.83%,均符合电力负荷预测误差标准。

表4 各方法预测误差百分比

Table 4 Percentage of prediction error for each method

单位:%

相对误差百分比绝对值				相对误差百分比绝对值			
时 刻	标准 BP 网络	灰色 预测	本文 预测 方法	时 刻	标准 BP 网络	灰色 预测	本文 预测 方法
01:00	7.92	2.06	0.06	13:00	8.13	2.14	0.81
02:00	3.37	3.17	0.44	14:00	9.57	2.80	1.59
03:00	2.34	1.65	2.45	15:00	9.18	1.83	1.74
04:00	9.21	1.92	3.10	16:00	1.81	1.78	2.97
05:00	5.53	2.19	0.74	17:00	4.88	1.34	0.23
06:00	9.38	1.77	1.77	18:00	1.93	2.54	2.10
07:00	5.42	1.63	3.66	19:00	9.85	3.13	1.94
08:00	5.71	2.07	2.99	20:00	7.91	4.94	1.95
09:00	5.53	3.21	1.72	21:00	3.16	3.50	2.60
10:00	9.69	1.22	2.15	22:00	5.46	2.14	2.62
11:00	1.17	1.21	1.46	23:00	9.93	3.42	1.31
12:00	2.15	1.78	1.09	24:00	7.28	2.34	2.32

4 结束语

提出基于L-M优化BP的多因素协同电力负荷的预测方法,在BP算法的基础上利用L-M算法对其进行改进,融合最速下降和后期精确的搜索能力克服了训练慢、易陷入局部极值、预测误差大等缺点,借助Trainlm、Traingd、Trainrp等多种训练函数对其进行训练,并协同冷、热负荷对电力负荷进行了预测,最后通过实例分析验证了所提协同预测方法的有效性。相较于其他预测方法,L-M优化BP的多因素协同电力负荷的预测方法可解释性和准确度较高、计算速度更快、误差更小,未来研究将进一步优化算法以提升计算速度,加强对极端天气、突发社会事件等特殊情况的分析与数据采集,提高模型对复杂情况的适应性,不断完善多因素协同电力负荷预

测方法的准确性。

参考文献

- [1] 林厉烽. 电力负荷预测在智能电网中的应用[J]. 机电信息, 2016(3):17.
LIN Lifeng. Application of power load forecasting in smart grid[J]. Mechanical and Electrical Information, 2016(3):17.
- [2] 闫照康, 马刚, 冯瑞, 等. 基于改进LSTM算法的综合能源系统多元负荷预测[J]. 分布式能源, 2024,9(2): 30-38.
YAN Zhaokang, MA Gang, FENG Rui, et al. Multiple load forecasting of integrated energy system based on improved LSTM algorithm[J]. Distributed Energy, 2024,9(2): 30-38.
- [3] 赵军, 苏鹏伟, 安青松, 等. 面向分布式能源系统优化的负荷预测研究进展[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018,30(8):12-18.
ZHAO Jun, SU Pengwei, AN Qingsong, et al. Progress in researches on load forecasting technology for optimization of distributed energy system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(8): 12-18.
- [4] YANG J, TANG Y C, DUAN H B. Application of fuzzy support vector machine in short-term power load forecasting[J]. Journal of Cases on Information Technology, 2022, 24(5):1-10.
- [5] YIN C, MAO S H. Fractional multivariate grey Bernoulli model combined with improved grey wolf algorithm: application in short-term power load forecasting[J]. Energy, 2023, 269:126844.
- [6] TZORTZIS A M, PELEKIS S, SPILIOITIS E, et al. Transfer learning for day-ahead load forecasting: a case study on European national electricity demand time series[J]. Mathematics, 2023, 12(1):19.
- [7] HOU D L, LIN C C, KATAL A, et al. Dynamic forecast of cooling load and energy saving potential based on Ensemble Kalman Filter for an institutional high-rise building with hybrid ventilation[J]. Building Simulation, 2020, 13(6):1259-1268.
- [8] TAN X Y, AO G, QIAN G C, et al. Research on power load forecasting using deep neural network and wavelet transform[J]. International Journal of Information Technologies and Systems Approach, 2023, 16(2):1-13.
- [9] 雷涛, 吕勇, 马淑慧. 基于改进灰色理论的主动配电网中长期负荷预测[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(9):22-28.
LEI Tao, LÜ Yong, MA Shuhui. Mid-long term load forecasting of active distribution network based on improved grey theory[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(9):22-28.
- [10] 徐帅, 刘丹丹. 基于时间序列组合模型的电力负荷预测[J]. 电子设计工程, 2023, 31(23):1-6.
XU Shuai, LIU Dandan. Power load forecasting based on time series combination model[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(23):1-6.
- [11] 徐英豪, 姜茜, 吕玉超, 等. 基于时间序列分解的混合短期电力负荷预测[J]. 电子设计工程, 2023, 31(7):62-67.
XU Yinghao, JIANG Xi, LV Yuchao, et al. Hybrid short-term

- power load forecasting based on time series decomposition [J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31 (7): 62-67.
- [12] 林永君, 张世成, 杨凯, 等. 基于时钟循环神经网络的光伏故障诊断[J]. 山东电力技术, 2024, 51(1): 52-58.
- LIN Yongjun, ZHANG Shicheng, YANG Kai, et al. Photovoltaic fault diagnosis based on CW-RNN[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(1): 52-58.
- [13] 董添. 基于深度学习的电力负荷模式识别与预测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [14] 杨凯. 基于CNN和双向GRU组合模型的短期电力负荷预测研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [15] 陈晓华, 吴杰康, 蔡锦健, 等. 基于猎人猎物优化算法优化BiLSTM的电力负荷短期预测[J]. 山东电力技术, 2024, 51(4): 64-71.
- CHEN Xiaohua, WU Jiekang, CAI Jinjian, et al. Short-term load prediction based on BiLSTM optimized by hunter - prey optimization algorithm[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(4): 64-71.
- [16] AL-QAYSI A M M, BOZKURT A, ATEŞ Y. Load forecasting based on genetic algorithm-artificial neural network-adaptive neuro-fuzzy inference systems: a case study in Iraq[J]. Energies, 2023, 16 (6): 2919.
- [17] 张淑清, 李君, 姜安琦, 等. 基于FPA-VMD和BiLSTM神经网络的新型两阶段短期电力负荷预测[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3269-3279.
- ZHANG Shuqing, LI Jun, JIANG Anqi, et al. A novel two-stage model based on FPA-VMD and BiLSTM neural network for short-term power load forecasting[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3269-3279.
- [18] 岑柏霖. 改进GA-BP算法在电力系统负荷预测模型中的应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(11): 53-57.
- CEN Bolin. Application of improved GA-BP algorithm in power system load forecasting model[J]. Automation & Instrumentation, 2023(11): 53-57.
- [19] 徐扬, 张紫涛. 基于遗传模拟退火算法改进BP神经网络的中长期电力负荷预测[J]. 电气技术, 2021, 22(9): 70-76.
- XU Yang, ZHANG Zitao. Medium and long-term power load forecasting based on BP neural network improved by genetic simulated annealing algorithm[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(9): 70-76.
- [20] 马松龄, 代一楠, 徐军昶, 等. 改进人工蜂群优化神经网络的短期负荷预测[J]. 机械设计与制造, 2021(7): 50-53.
- MA Songling, DAI Yinan, XU Junchang, et al. Improved short-term load forecasting of artificial bee colony optimization neural network[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(7): 50-53.
- [21] 张海, 李士心, 石军, 等. 基于串行式GA-BP的短期负荷预测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4): 97-101.
- ZHANG Hai, LI Shixin, SHI Jun, et al. Short-term load forecasting method based on serial GA-BP[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(4): 97-101.
- [22] 王克杰, 张瑞. 基于改进BP神经网络的短期电力负荷预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(24): 115-121.
- WANG Kejie, ZHANG Rui. Research on short-term power load forecasting method based on improved BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 115-121.
- [23] 王帅哲, 王金梅, 王永奇, 等. 基于MIGA-BP神经网络的短期电力负荷预测[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2019, 40(2): 145-150.
- WANG Shuaizhe, WANG Jinmei, WANG Yongqi, et al. Short-term load forecasting based on MIGA-BP neural network[J]. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2019, 40(2): 145-150.
- [24] 陈晓华, 吴杰康, 陈盛语, 等. 基于EMD和IABC-SVM算法的复合电压暂降源辨识方法[J]. 广东电力, 2022, 35(2): 11-18.
- CHEN Xiaohua, WU Jiekang, CHEN Shengyu, et al. Compound voltage sag source identification method based on EMD and IABC-SVM algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(2): 11-18.
- [25] 陈晓华, 王志平, 吴杰康, 等. 基于VMD和IAO-SVM的电压暂降源识别方法[J]. 广东电力, 2023, 36(1): 59-67.
- CHEN Xiaohua, WANG Zhiping, WU Jiekang, et al. Voltage sag source identification method based on VMD and IAO-SVM[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(1): 59-67.

收稿日期: 2024-09-30

修回日期: 2024-12-20

作者简介:

白 卓(1997), 女, 从事电力系统、输配电及用电工程工作;

郭 啸(2000), 通信作者(111perfect@163.com), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统规划与运行;

孙华忠(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统规划工作。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.07.008

·输变电·

变压器短路实验下基于WOA-SVM的顶层油温声学反演方法

杨超¹, 薛帅¹, 李承振¹, 郭昊鑫^{2*}, 杨梦娇¹

(1. 国网山东省电力公司超高压公司, 山东 济南 250021;

2. 山东大学电气工程学院山东省特高压输变电技术与装备重点实验室, 山东 济南 250061)

摘要: 变压器绕组的顶层油温作为一种重要的健康监测指标,能够有效表征其内部状态和潜在缺陷。基于超声传感技术在穿透性强和对温度变化灵敏方面的优势,提出了一种融合超声传感技术和鲸鱼算法优化支持向量机(whale optimization algorithm-optimized support vector machine, WOA-SVM)的新型反演方法。以35 kV变压器作为研究对象,通过进行短路实验实现变压器内部升温,同时采集携带丰富温度信息的超声波信号。深入探讨了20℃~50℃,不同温度条件下变压器内部的超声波信号变化特性,通过提取和处理声波信号的关键特征参数,如波峰幅值、峰峰值、均方根、波形因子、裕度因子、方差等,成功实现了对顶层油温的精准反演。研究表明,该方法在变压器顶层油温的反演中表现出较高的准确率(97.95%),为变压器健康监测提供了一种新的技术路径。

关键词: 油浸式电力变压器;顶层油温;超声检测;支持向量机

中图分类号: TM411+.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)07-0076-10

Acoustic Inversion Method for Top-oil Temperature in Transformers Based on WOA-SVM Under Short-circuit Testing

YANG Chao¹, XUE Shuai¹, LI Chengzhen¹, GUO Haoxin^{2*}, YANG Mengjiao¹

(1. State Grid Shandong Electric Extrahigh Voltage Company, Jinan 250021, China;

2. Shandong Provincial Key Laboratory of UHV Transmission Technology and Equipment, School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The top-oil temperature of transformer windings serves as a crucial health monitoring indicator, effectively characterizing the internal state and potential defects. Leveraging the advantages of ultrasonic sensing technology, known for its strong penetrative power and sensitivity to temperature changes, a novel inversion method combining ultrasonic sensing technology with whale optimization algorithm-optimized support vector machine (WOA-SVM) is proposed. This study focuses on a 35 kV transformer, where internal temperature rise is induced through short-circuit testing, and ultrasonic signals carrying temperature information are collected. An in-depth exploration is conducted on the characteristics of ultrasonic wave signals inside the transformer under different temperature conditions ranging from 20℃ to 50℃. By extracting and processing key acoustic signal parameters, such as peak amplitude, peak-to-peak value, root mean square, waveform factor, crest factor, and variance, accurate inversion of the top-oil temperature was successfully achieved. The research results demonstrate that this method exhibits high accuracy (97.95%) in the inversion of transformer top-oil temperature, providing a new technical avenue for transformer health monitoring.

Keywords: oil-immersed power transformer; top-oil temperature; ultrasonic testing; support vector machine

0 引言

作为电能传输和分配的核心设备,变压器能够

实现不同电压等级之间的转换,确保电能可在发电站和用户之间高效、安全地传输。其在电网中扮演着至关重要的角色,其正常运行对电网的稳定性和效率具有决定性影响^[1-2]。而变压器内部温度过高对变压器运行的危害极为严重。首先,高温会加速绝缘材料的老化过程,缩短变压器的使用寿命^[3-5]。绝

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(2022A-125)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(2022A-125)。

缘材料一旦老化,其电气绝缘性能会显著下降,增加了发生电气故障的风险,如绕组短路。此外,在极端情况下,高温甚至会引起变压器油的热分解或燃烧,造成火灾事故,严重威胁设备及周边环境的安全。因此,及时监控和控制变压器内部温度,对确保变压器安全、稳定和高效运行至关重要。

相比于目前的直接测温法^[6-7]和间接测温法^[8-11],超声测温技术^[12-13]是一种基于超声波信号在介质中的传播特性来测量温度的方法,具备多个显著优点。首先,超声测温技术是一种非接触性测量方式,可以在不直接接触测量对象的情况下测量温度,这使其特别适合应用在高温、有毒或难以接近的环境中。其次,超声测温技术响应速度快,能够实现几乎实时的温度监测,对动态温度变化的跟踪能力强^[14]。此外,它还能提供较高的空间分辨率,适用于对温度分布有精细要求的场合^[15]。目前,超声测温已广泛应用于多个关键领域。在火力发电厂,它用于监控燃煤锅炉的内部温度,确保操作安全和效率^[16-18]。在航天领域,此技术对火箭发动机尾焰进行温度监测,助力发动机设计的优化和安全评估^[19-21]。此外,超声测温还被用于探索海底热液口的环境^[22],这些应用展示了其在极端环境下的测温能力和在科研及工业应用中的广泛适用性^[23]。虽然超声波测温技术在电气设备特别是变压器中尚未得到应用,但已有研究通过超声成像技术实现了变压器内部绕组变形的无损检测^[24-25],这表明超声波技术在无损检测领域具有显著的应用潜力。

然而,变压器内部复杂的介质环境和多重折射现象可能对超声信号产生干扰,影响测温精度。为了克服这一挑战,本文提出使用鲸鱼算法优化支持向量机(whale optimization algorithm - optimized support vector machine, WOA-SVM)对接收到的超声信号进行深度分析,以实现更为精准的温度监测^[26]。WOA-SVM结合了支持向量机的强大分类能力和鲸鱼优化算法的全局搜索优势,特别适用于处理非线性和小样本数据集。通过鲸鱼算法优化SVM的核函数参数和惩罚系数,以确保模型在训练过程中达到最佳的分类性能^[27-28]。这种精细化的模型训练方法不仅显著提高了变压器温度监测的准确性,也提升了系统在复杂环境下的可靠性,展示了人工智能技术在传统工业问题中的应用潜力^[29]。

以一台 35 kV 油浸式变压器作为研究对象,通过短路实验系统地采集 20 ℃ ~ 50 ℃ 范围内不同温度情况下的超声信号,这种技术通过分析超声波在变压器内部介质中的传播特性变化来准确测定温度,从而克服了传统测温方法中的多项局限。当这些超声波信号数据被采集后,通过提取相关特征并结合 WOA-SVM 算法来实现变压器顶层油温的反演,这不仅提高了温度监测的精确性,也优化了数据处理的效率。基于 210 组超声样本数据进行的实验验证,证实了该温度分类方法的高准确性。超声测温技术与人工智能算法的结合为变压器温度管理提供了一个高效、精确且先进的解决方案,显著提升了电网设备的可靠性和安全性。此外,这种技术的成功实施展示了现代智能化技术在提升传统电力系统运行效率和稳定性中的巨大潜力,为未来更广泛的工业应用奠定了基础。

1 变压器温升实验及声波数据采集

1.1 声学测温实验平台

变压器超声测温实验系统主要由函数信号发生器、功率放大器、超声传感器、油浸式变压器、前置放大器、示波器、计算机组成,实验平台如图1所示。

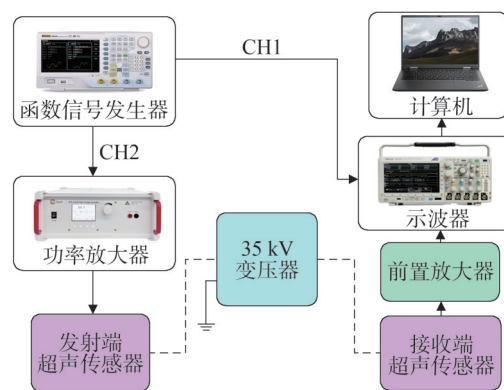


图1 声学测温实验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of the acoustic temperature measurement experiment platform

发射端超声传感器和接收端超声传感器均紧贴于变压器外壁,为了确保超声波途经阻碍少、正对收发路径能从变压器绕组相间油隙穿过,传感器贴装位置如图2所示。测试过程中,控制函数信号发生

器CH1通道发出500 ms方波,并利用方波信号上升沿触发CH2通道连续发出频率为80 kHz、幅值为2.5 V的5个正弦波。信号经功率放大器放大40倍后激励发射端超声传感器发生振动产生超声波。超声波进入变压器后会携带变压器内部温度信息,而长距离信号传输以及介质阻碍会导致信号幅值衰减到毫伏级别,因此设置40 dB前置放大器对接收超声信号进行100倍放大。采用示波器和计算机显示并存储波形信息,示波器通道1—通道4分别采集函数信号发生器CH2发出的80 kHz正弦波、变压器侧面超声接收信号、发射传感器对侧超声接收信号和对侧偏上方超声接收信号。

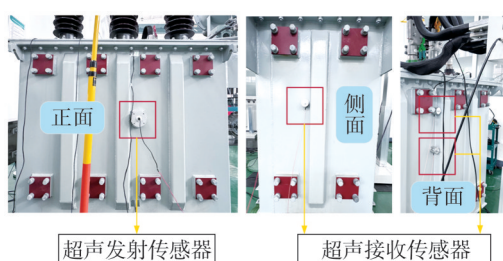


图2 超声传感器布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the ultrasonic sensor arrangement

1.2 变压器短路温升实验

对35 kV油浸式变压器进行短路温升实验。实验前,在变压器四周布置4个温度传感器用于监测环境温度,同时在变压器外壳顶部测温槽中插入温度传感器以对变压器顶层油温进行测量,温度传感器布置情况如图3所示。为了方便超声传感器贴装,对变压器散热片进行拆除。拆除片散后,考虑到额定通流情况下变压器产热远大于散热,为了避免



(a)环境温度监测传感器

(b)油温监测传感器

图3 环境温度传感器和油温传感器布置位置

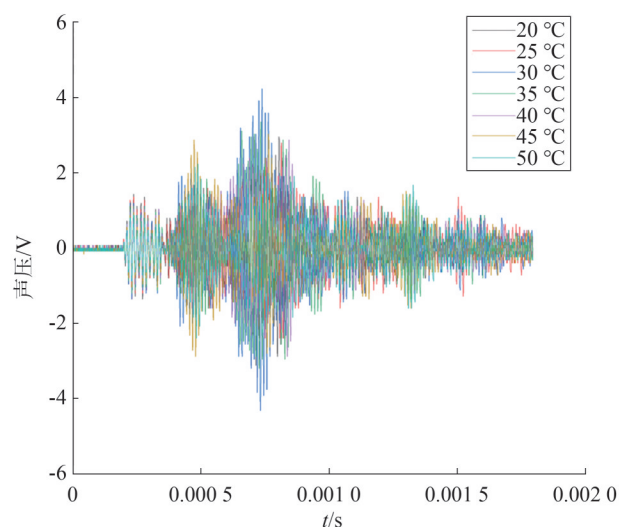
Fig.3 Location of ambient temperature sensors and oil temperature sensors

安全事故发生,实验时高压侧施加较低电压860 V,通恒定电流14.8 A,并将低压侧用短路排短接。当油面温升为30℃左右时停止实验。温升实验过程中,变压器顶层油温每升高1℃,进行一次温度记录,同时也对同一时刻的超声波形进行收发采集,以便进行后续的数据分析和温度预测。

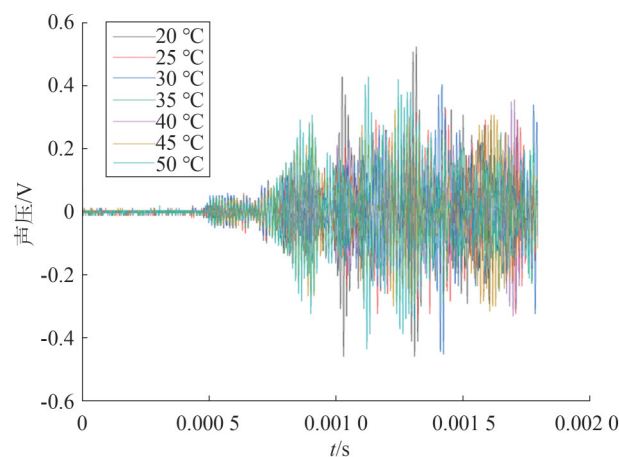
2 超声波形分析

不同温度下,超声传感器接收信号波形如图4所示。

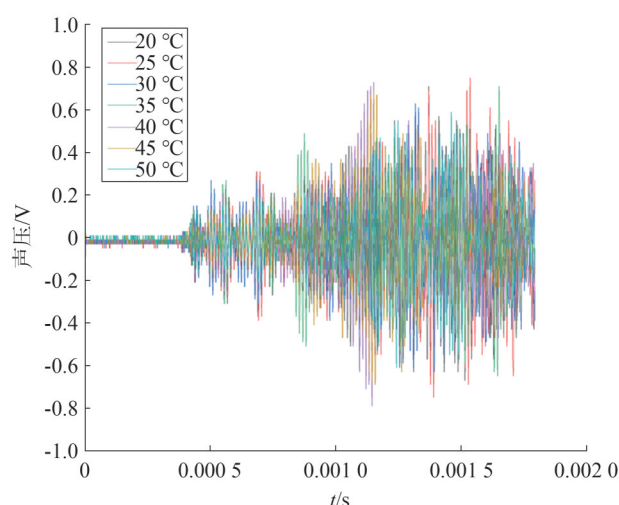
由声波传播规律可知,发射端传感器发出超声后接收端传感器首次接收到的声波信息是有效的,而在此之后接收的波形一般是经多次折反射声波混叠的结果。因此,为了探究超声接收波形随温度变



(a)变压器侧面超声传感器接收信号



(b)发射传感器正对侧位置接收信号



(c) 对侧偏上方超声传感器接收信号

图4 不同位置下超声传感器接收信号

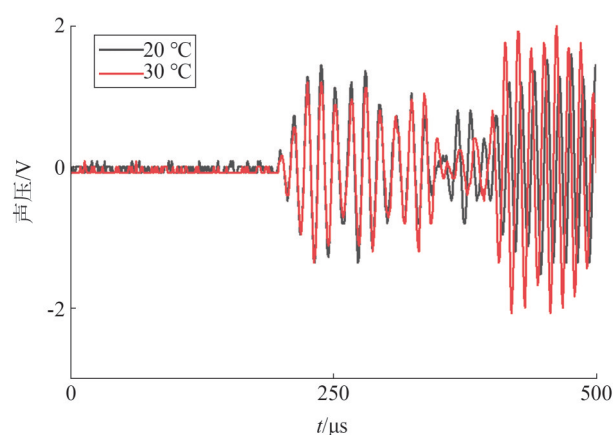
Fig.4 Signal received by the ultrasonic sensor at different positions

化规律,仅对0.5 ms附近的波形成分进行分析。为了更清晰地展示不同温度下波形幅值的变化,以变压器侧面超声传感器接收信号为例,采用分图方式展示温度区间内波形的变化情况,如图5所示。

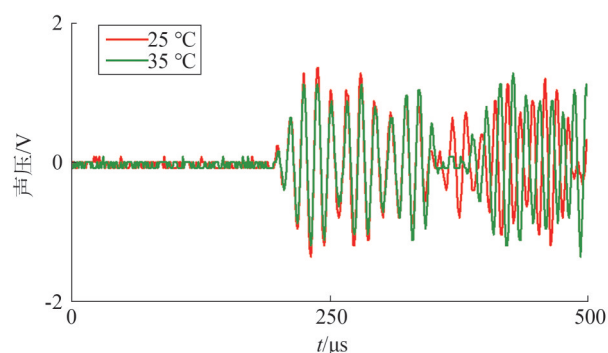
通过将温度相差10 °C的超声波形进行两两对比,可以发现随着变压器油温度升高,首次接收到的超声波形中的前10个波峰幅值明显下降,且在此之后的波形会有明显的滞后现象,即从第14个波开始,之后每个声波波峰对应的时间会随着温度升高而延后。为了更清楚地观察超声波信号中峰值的变化,特别选取幅值较大的第3个波峰,并将其峰峰值进行图形展示,如图6所示。从图6中可以明显看出,随着温度的逐渐升高,该波峰的幅值呈现出显著的衰减趋势。

声波在介质中的传播速度取决于介质的密度和弹性模量。在流体介质中,声速可由体积弹性模量与密度之比的平方根表示。随着温度升高,变压器油密度与体积弹性模量均会下降,而体积弹性模量下降程度更大,因此整体上油中声速减小,进而引起波形峰值时间后延。弹性模量是描述介质抵抗形变的物理量,当弹性模量显著降低时,介质变得更易于压缩和伸展。这意味着声波在传递时,部分能量将转化为介质的局部形变能,而不是全部以波的形式传播,因而导致超声接收信号幅值有所衰减。

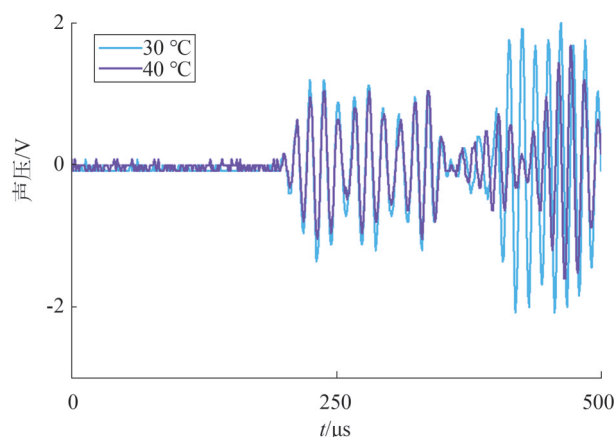
此外,发射端传感器对侧接收的超声信号可能由于变压器内部结构复杂、声波穿过介质较多等原因,波形随温度的变化规律并不如侧面接收信号明显。但经过分析对比发现,两路接收信号波形也会随温度变化表现出相应差异。对侧正对超声接收信号0.72 ms内的波形幅值随温度升高整体上呈现先上升后下降趋势,对侧偏上方超声接收信号0.72 ms



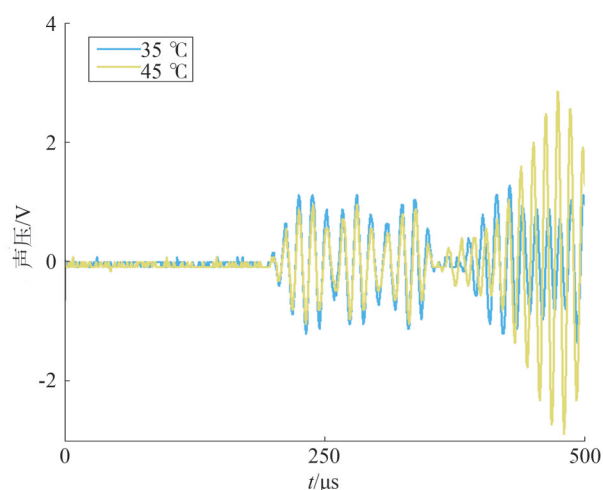
(a) 20 °C与30 °C超声波形对比图



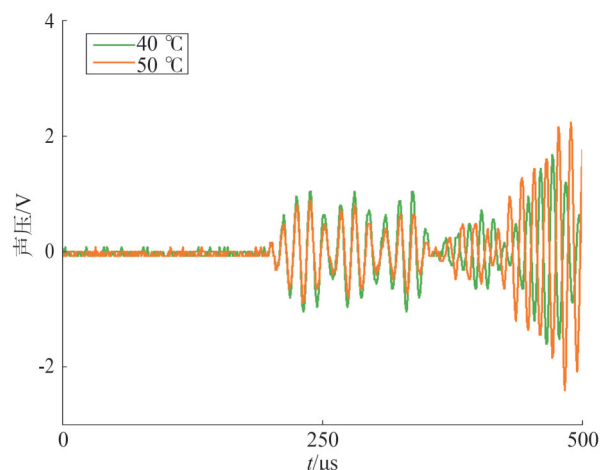
(b) 25 °C与35 °C超声波形对比图



(c) 30 °C与40 °C超声波形对比图



(d) 35 °C与45 °C超声波形对比图



(e) 40 °C与50 °C超声波形对比图

图5 不同温度下采集声波波形对比图

Fig.5 Comparison chart of collected acoustic waveforms at different temperatures

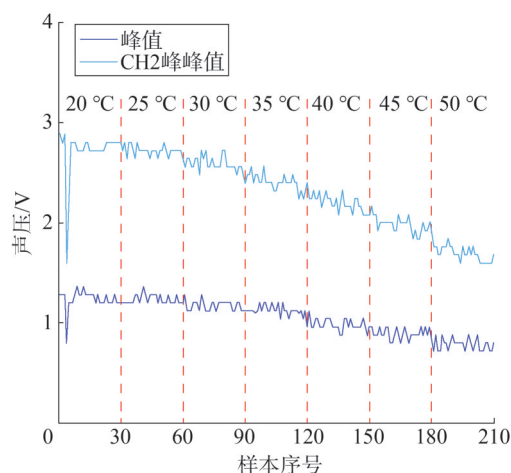


图6 不同温度下峰值和峰峰值变化图

Fig.6 Peak and peak-to-peak value variations at different temperatures

附近的波形幅值随温度升高不断减小,0.72 ~ 1 ms时间段内的波形幅值随温度升高总体上呈先减小后增大的趋势。这些变化反映了温度对超声传播特性的影响,说明接收超声波形的部分特征与温度之间存在明显的对应关系。

3 变压器油温预测模型

鉴于采集超声波形与变压器顶层油温之间具有密切相关性,对接收超声信号数据进行特征参量提取,选择超声波形中随温度变化明显的特征,并结合机器学习算法建立接收超声信号特征与变压器油温之间的映射关系,搭建变压器油温预测模型。

3.1 特征选择

特征工程对于提升油温识别准确度、算法数据处理效率具有重要意义。对于变压器侧面超声接收信号,由于0.36 ms内的波形随油温上升幅值下降明显,故提取超声波形中前10个波峰幅值、0 ~ 0.36 ms区间内波形的峰峰值、均方根作为油温识别的特征参量。对于发射端传感器对侧接收的超声信号,虽然其波形特征随温度变化情况较为复杂,但部分特征依然与温度之间存在明显的对应关系。因此,对0.72 ms时间内对侧正对超声接收信号以及0.5 ~ 1 ms时间内对侧偏上方超声接收信号的最大值、峰峰值、均方根、波形因子、裕度因子、方差进行提取。其中,峰峰值、裕度因子可以反映信号动态范围,均方根值反映信号平均功率水平,方差反映信号幅度的分散程度,而波形因子可度量信号形状。通过使用相关性特征选择(correlation-based feature selection, CFS)方法,本研究评估了不同特征参数与温度之间的相关性。CFS方法不仅确定了每个特征与目标变量之间的关联程度,还考虑了特征之间的相互作用。通过这种分析,根据CFS分数对所有特征参数进行排序,以明确其对预测温度的贡献大小。在这一过程中,特别关注那些CFS分数接近1或者高于1的特征,因为这些分数表明特征与温度有较高的相关性并且在统计上具有显著性。CFS分数排序如图7所示。选取这部分高分数的特征进行后续应用,可以有效提升模型的预测准确性和解释能力。综上,对于每个温度样本提取CFS分数高于1的16

个特征参数。

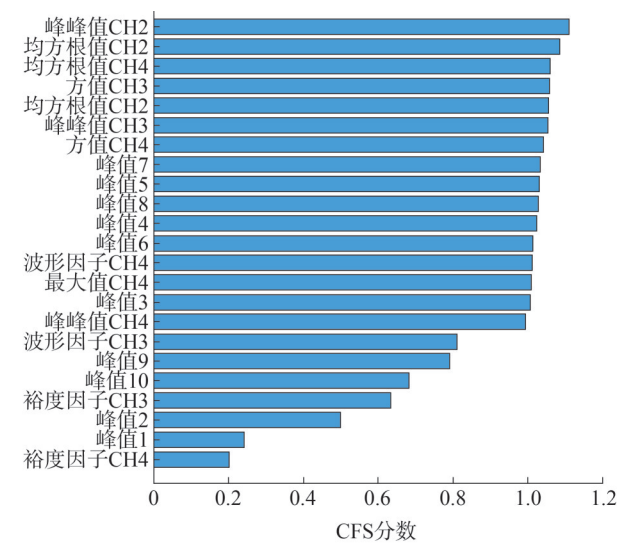


图7 CFS分数排序图

Fig.7 CFS score ranking chart

3.2 WOA-SVM

采集210组样本信息,样本分布在19℃~51℃范围内多个不同的温度条件下。将这些样本划分为7个温度区间:[19℃,21℃]、[24℃,26℃]、[29℃,31℃]、[34℃,36℃]、[39℃,41℃]、[44℃,46℃]和[49℃,51℃]。每个温度样本的样本分布如表1所示。

表1 样本分布
Table 1 Distribution of samples

温度值/℃	类别标签	样本数目
[19,21]	1	30
[24,26]	2	30
[29,31]	3	30
[34,36]	4	30
[39,41]	5	30
[44,46]	6	30
[49,51]	7	30

考虑到变压器油温与超声波形特征之间的非线性关系,以及采集样本数较少,采用支持向量机算法对变压器顶层油温进行分类预测。支持向量机

(support vector machines,SVM)是一种强大的监督学习算法,适用于解决非线性、小样本问题。SVM核心思想是在特征空间中找到能有效分类的超平面,且超平面能够最大化不同类别之间的边界。SVM通过引入非线性核函数,将输入数据映射到更高维的特征空间中,构建拉格朗日函数来优化超平面位置并使得边界最大化,从而达到良好分类效果。在支持向量机中,惩罚因子 C 和核参数 γ 是影响分类性能至关重要的超参数,分别用于平衡模型的复杂性和泛化能力,以及控制数据在特征空间中的分布。 C 值增大通常会减少训练误差,但会增加过拟合的风险,而 γ 值减小会增强模型的泛化能力,但可能会忽略数据中的重要细节,导致欠拟合。因此,必须选择合适的 C 、 γ 值,以帮助模型在拟合精度和泛化能力之间找到平衡。手动选择 C 和 γ 参数通常依赖于经验,而不是系统的全局搜索,这可能导致参数选择并不是最优的。采用鲸鱼优化算法,可以系统全面地探索参数空间,找到 C 和 γ 的最优组合,使SVM性能最大化。

鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm, WOA)是一种新型的自然启发优化算法,灵感来源于座头鲸捕食行为。WOA-SVM算法流程如图8示,首先设定种群数量、最大迭代次数,以及初始化鲸鱼位置。每个鲸鱼所在位置代表一个潜在的解,即一个 $[C,\gamma]$ 参数组合。而优化问题最优解作为猎物位置。利用SVM对样本进行分类,计算每个鲸鱼对应的适应度值。在每次迭代过程中找到当前最佳的解,即适应度值最高的鲸鱼,并根据当前最优鲸鱼所在位置对种群中所有鲸鱼位置进行更新。通过不断迭代更新每个鲸鱼的位置试图找到使得目标函数达到最小(或最大)值的最优解。

在鲸鱼优化算法中,位置更新机制是算法核心部分。座头鲸主要有环绕猎物以及气幕捕鱼两种捕食方式,采取何种捕食策略通过 $[0,1]$ 区间内随机生成参数 p 决定。当 $p\geq 0.5$ 时,鲸鱼捕食采用气幕捕鱼法,通过在猎物下方吐出螺旋状气泡,最终形成气幕大网来围捕猎物。这是一种利用当前最优解附近的信息进行局部搜索的方法,通过螺旋更新位置公式来紧密逼近全局最优解,即

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = D e^{bl} \cos(2\pi l) + \mathbf{x}^*(t) \\ D = |\mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(t)| \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为当前迭代次数; $\mathbf{x}(t)$ 为位置向量(即解向量); $\mathbf{x}^*(t)$ 为当前得到的最优位置; D 为距离; b 为定义螺旋形状的常数, 通常取 1; l 为 $[-1, 1]$ 范围内随机数。

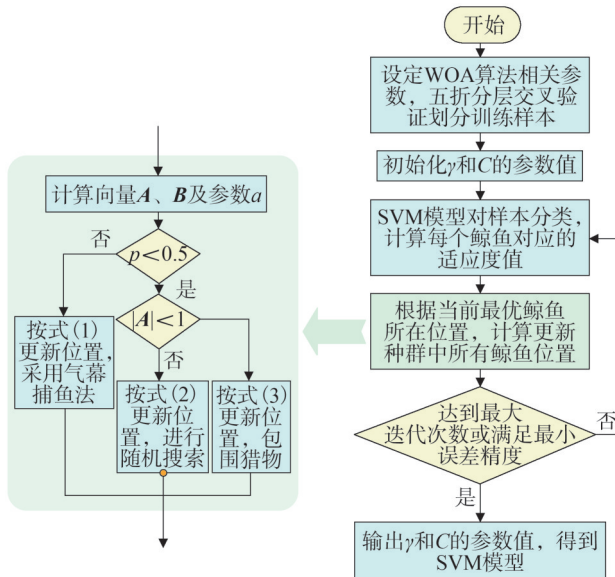


图8 基于WOA的SVM参数优化流程图

Fig.8 Flowchart of SVM parameter optimization based on WOA

当 $p < 0.5$ 时, 鲸鱼以环绕猎物方式进行捕猎。在此策略下, 根据系数向量 A 的模值决定更新位置是向全局最优解靠近还是向其他随机选择的鲸鱼靠近。如果 $|A| < 1$, 鲸鱼将向当前最优解靠近, 这有助于算法聚焦于当前已知的最佳区域, 加速收敛, 位置更新公式如式(2)所示。当 $|A| \geq 1$ 时, 鲸鱼会向随机选择的其他鲸鱼的位置移动, 有助于探索新区域, 避免陷入局部最优, 可以增强算法的全局搜索能力, 更新公式如式(3)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{x}^*(t) - A \cdot D \\ D = |B \cdot \mathbf{x}^*(t) - \mathbf{x}(t)| \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = \mathbf{x}_{\text{rand}}(t) - A \cdot D \\ D = |B \cdot \mathbf{x}_{\text{rand}}(t) - \mathbf{x}(t)| \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{x}_{\text{rand}}(t)$ 为当前随机鲸鱼的位置; A 、 B 为系数向量, 其中 A 向量于决定下一步搜索的方向和距离, 计

算公式为:

$$A = 2a \times r_1 - a \quad (4)$$

$$B = 2 \times r_2 \quad (5)$$

式中: a 为收敛因子; r_1 、 r_2 为模在 $[0, 1]$ 之间的随机向量。

整个迭代过程中, a 随着迭代次数的增加, 从 2 逐渐递减至 0, 这种递减模拟了搜索行为从全局探索逐渐转向局部寻优的过程。通过这种方式, 鲸鱼优化算法可以有效地探索解空间, 并且可以很好地平衡全局搜索与局部搜索, 从而找到问题的最优解。

采用鲸鱼算法对 SVM 参数进行寻优时, 设定核参数搜索范围为 $[0, 1]$, 惩罚因子搜索范围为 $[1, 100]$, 鲸鱼种群数量为 30, 最大迭代次数为 100, 以五折分层交叉验证下分类准确率作为适应度函数值。当最优惩罚因子 C 为 70.08, 最优核参数 γ 为 0.27 时, WOA-SVM 模型分类准确率最高, 为 97.14%, 混淆矩阵如图 9 所示, 其中有 6 个分类错误样本, 主要集中在 $20^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 。这是由于温度较低时, 超声波受温度变化影响较小, 同时变压器本身振动也会对样本数据产生干扰, 导致分类出现偏差, 但总体分类效果较好。结果表明, 本文提出的基于 WOA-SVM 的变压器油温声学反演方法可有效预测变压器顶层油温, 为变压器内部温度监测提供了新的思路。

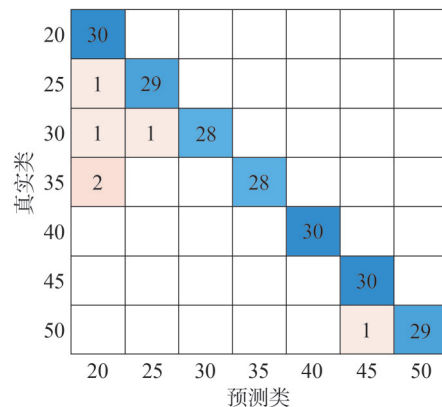


图9 WOA-SVM模型分类结果

Fig.9 Classification results of the WOA-SVM model

为了展示 WOA-SVM 算法的优势, 使用传统

SVM和PSO-SVM算法进行了对比测试。SVM和PSO-SVM的分类准确率分别为89.52%和94.28%。混淆矩阵如图10和图11所示。通过对比可知,WOA-SVM显示了更优越的分类性能。这一提升主要得益于WOA算法在自动寻优 C 和 γ 参数方面的能力,这使得寻找最优的参数配置更为高效,相比手动设置参数的传统方法更加精准。此外,与PSO算法相比,WOA的搜索策略更为复杂多样,这帮助算法避免陷入局部最优解,从而更全面地进行优化。这些结果表明,WOA-SVM在处理具有挑战性的分类任务时具有明显的优势。

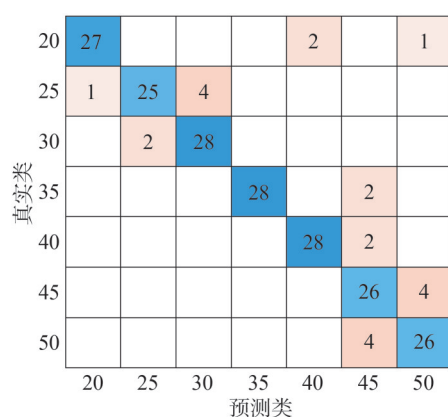


图10 SVM模型分类结果

Fig.10 Classification results of the SVM model

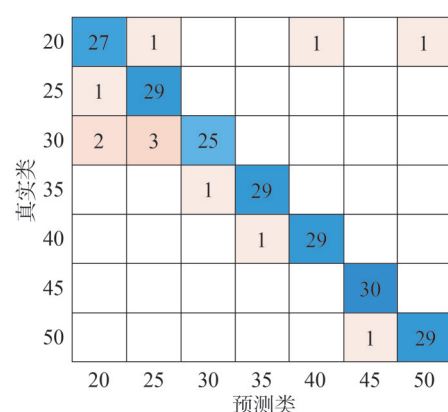


图11 PSO-SVM模型分类结果

Fig.11 Classification results of the PSO-SVM model

4 结论

本文首次研发提出变压器超声测温方法,分析了接收超声信号波形随温度变化规律,并结合人工

智能算法实现了变压器顶层油温反演识别,主要研究结论如下:

1)当变压器正面布置超声传感器发射超声信号时,侧面接收超声波形中的前10个波峰幅值随变压器油温升高明显持续下降,且在此之后的波形峰值对应时间会有明显的滞后现象。相比于变压器背面传感器,侧面传感器接收波形随温度变化规律更明显、且变化原因可解释性更强,符合简单声波传播规律。

2)通过对接收超声信号提取有效特征,并结合WOA-SVM算法构建了变压器温度识别模型,准确率高达97.14%,表明本文所提声学测温方法能有效预测分类变压器油温,具有一定的工程实践意义,由于每种变压器的独特构造和运行条件可能会对超声波信号的特性产生影响,未来将通过仿真和实验方法来扩展样本数据库。从而适应不同类型的变压器和其运行环境,同时适当调整算法参数,优化模型的稳定性和可靠性,进而实现一种非侵入式的变压器温度监控方法,为变压器内部温度监控技术提供了新的视角。

参考文献

- [1] 张瑞强, 仝秋波, 齐国栋, 等. 变压器油色谱在线监测装置运行故障分析[J]. 山东电力技术, 2023, 50(12): 68-75.
ZHANG Ruiqiang, QI Qiubo, QI Guodong, et al. Operation Fault analysis of transformer oil chromatography on-line monitoring device[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(12): 68-75.
- [2] 姜雄伟, 王文浩, 邵先军, 等. 结合响应面法的变压器绕组温度快速计算方法[J]. 浙江电力, 2023, 42(12): 20-27.
JIANG Xiongwei, WANG Wenhao, SHAO Xianjun, et al. A fast calculation method of transformer winding temperature based on response surface methodology[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(12): 20-27.
- [3] 邵先军, 高一冉, 金凌峰, 等. 油浸式变压器内部温度的热-流场耦合仿真与特性分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(12): 36-44.
SHAO Xianjun, GAO Yiran, JIN Lingfeng, et al. Thermal-fluid field coupling simulation and characteristic analysis on internal temperature of oil-immersed transformers[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(12): 36-44.
- [4] 尚星宇, 庞磊, 卜钦浩, 等. 大功率高频变压器绝缘问题研究综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-18[2024-07-25]. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230393>.
SHANG Xingyu, PANG Lei, PU Qin hao, et al. Research review on

- insulation issues of high-power high-frequency transformers [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-18 [2024-07-25]. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230393>
- [5] 赵莉华,王释颖.油浸式变压器高温绝缘材料的研究现状[J].绝缘材料,2016,49(4):1-6.
- ZHAO Lihua, WANG Shiyong. Research status of high-temperature insulating materials used in oil-immersed transformers [J]. Insulating Materials, 2016, 49(4): 1-6.
- [6] 杨志,黄雯利,赵丽娟.光纤传感技术在油浸式电力变压器状态监测应用的研究进展[J].高压电器,2023,59(6):137-146.
- YANG Zhi, HUANG Wenli, ZHAO Lijuan. Research progress of fiber-optic sensing technology in condition monitoring and application in oil-immersed power transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 137-146.
- [7] 张石,张博,夏晖,等.基于分布式光纤传感器的变压器油温度实时监测研究[J].制造业自动化,2023,45(8):153-157.
- ZHANG Shi, ZHANG Bo, XIA Hui, et al. Research on real-time monitoring of transformer oil temperature based on distributed optical fiber sensor [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(8): 153-157.
- [8] 廖才波,阮江军,蔚超,等.基于改进支持向量机的变压器实时热点温度预测方法研究[J].高压电器,2018,54(12):174-179.
- LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, WEI Chao, et al. Research on real-time hot-spot temperature prediction method for transformer based on improved support vector machine [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 174-179.
- [9] 李鑫,徐晓刚,邓建刚,等.35 kV油浸式变压器绕组热点温度计算分析[J].高压电器,2017,53(1):144-150.
- LI Xin, XU Xiaogang, DENG Jiangang, et al. Calculation and analysis of hot spot temperature in 35 kV oil-immersed transformer windings [J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 144-150.
- [10] 王永强,岳国良,何杰,等.基于Kalman滤波算法的电力变压器顶层油温预测研究[J].高压电器,2014,50(8):74-79.
- WANG Yongqiang, YUE Guoliang, HE Jie, et al. Study on prediction of top oil temperature for power transformer based on Kalman filter algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(8): 74-79.
- [11] 张健,胡玉耀,宋士瞻,等.基于数值求解的油浸式变压器瞬态热点温度计算[J].高压电器,2023,59(6):103-110.
- ZHANG Jian, HU Yuyao, SONG Shizhan, et al. Transient hot spot temperature calculation of oil immersed transformer based on numerical calculation [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 103-110.
- [12] 赵义鋈,赵俭.声学测温研究现状及发展总结[J].计测技术,2021,41(6):7-16.
- ZHAO Yijun, ZHAO Jian. Current research status and development review of acoustic thermometry [J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(6): 7-16.
- [13] 杨庚,沈国清,李铁林,等.声学测温在工程中的应用研究[C]//2019年全国声学大会论文集.深圳:中国声学学会,2019.
- YANG Geng, SHEN Guoqing, LI Tielin, et al. Application of acoustic temperature measurement in engineering [C] // Proceedings of the 2019 National Acoustics Conference, Shenzhen: Acoustical Society of China, 2019.
- [14] KONOSHENKO A V, SHVEDOVA E V. Study of dependence of nonlinear acoustic parameter in transformer oil on medium temperature [C] // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE, 2019: 1-5.
- [15] LIU K, GUO L, CHEN B D, et al. Analysis of ultrasonic propagation characteristics of partial discharge in oil immersed power transformer [C] // 2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA). IEEE, 2020: 66-70.
- [16] CHAO F J, WANG S H, ZHOU F Q, et al. Reconstruction of furnace temperature field by ultrasonic transducer [C] // 2021 IEEE 15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE, 2021: 219-223.
- [17] 孔倩.炉内非均匀温度场的声学测温及泄漏声源定位方法研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [18] 吴莉,陈励军.炉膛声学测温中声波飞渡时间测量的实验研究[J].声学技术,2018,37(3):211-216.
- WU Li, CHEN Lijun. Experimental research on 'time of flight' measurement in acoustic pyrometry for furnace [J]. Technical Acoustics, 2018, 37(3): 211-216.
- [19] 许琳,王高,吕国义,等.超声测温技术在模拟航空发动机燃烧室温度测量中的应用[J].测试技术学报,2019,33(2):178-184.
- XU Lin, WANG Gao, LÜ Guoyi, et al. Ultrasonic temperature measurement technology for simulated aero-engine combustion chambers [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2019, 33(2): 178-184.
- [20] CUI J G, TIAN Y, CUI X, et al. A method for fault diagnosis of aviation engine gas system [C] // 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2020: 4244-4248.
- [21] 那佳琪.固体火箭发动机尾焰温度场超声检测系统研究[D].太原:中北大学,2023.
- [22] 蔡勇,樊炜,泮红文,等.考虑声波折射补偿的海底热液口声学原位测温方法[J].电子测量技术,2017,40(9):163-168.
- CAI Yong, FAN Wei, PAN Hongwen, et al. Study on the acoustic in situ measurement techniques for determining temperature field around seafloor hydrothermal vents taking into account the refraction compensation of sound waves [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(9): 163-168.
- [23] JIA Y L, SKLIAR M. Ultrasonic measurements of temperature distribution and heat fluxes across containments of extreme

- environments [C] // 2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS).IEEE,2019:940-943.
 - [24] 杨卓.变压器内部结构超声成像检测方法的研究[D].沈阳:沈阳工程学院,2020.
 - [25] 冯翼,杜好阳,李一木,等.基于脉冲编码激励超声扩频测距的变压器绕组变形检测技术[J].高电压技术,2020,46(11):3960-3969.
FENG Yi, DU Haoyang, LI Yimu, et al. Transformer winding deformation detection technology based on pulse coded excitation ultrasonic spread spectrum measuring distance [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3960-3969.
 - [26] 安国庆,史哲文,马世峰,等.基于RF特征优选的WOA-SVM变压器故障诊断[J].高压电器,2022,58(2):171-178.
AN Guoqing, SHI Zhewen, MA Shifeng, et al. Fault diagnosis of WOA-SVM transformer based on RF feature optimization[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 171-178.
 - [27] 葛红平,刘晓波,黄朝晖,等.粒化幅值感知排列熵和WOA-SVM的滚动轴承故障诊断[J].噪声与振动控制,2021,41(4):101-108.
GE Hongping, LIU Xiaobo, HUANG Chaohui, et al. Fault diagnosis method of rolling bearings based on granulation amplitude aware permutation entropy and WOA-SVM [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(4): 101-108.
 - [28] JI P, ZHU Q. Power quality disturbances classification based on WOA-SVM algorithm [C] // 2023 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA).IEEE, 2023: 879-884.
 - [29] YANG J W, LU W G, LIU X. Prediction of top oil temperature for oil-immersed transformers based on PSO-LSTM [C] // 2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE).IEEE, 2021: 278-283.
- 收稿日期:2024-07-29
修回日期:2024-11-27
作者简介:
杨 超(1995),男,主要从事特高压交直流设备的设备绝缘与故障诊断工作;
薛 帅(1996),男,硕士,高级工程师,主要从事特高压交直流设备的设备绝缘与故障诊断工作;
李承振(1990),男,硕士,工程师,主要从事特高压交直流设备的设备绝缘与故障诊断工作;
郭昊鑫(1999),通信作者(ghx2356115387@163.com),男,硕士在读,工程师,主要研究方向为变压器等电气设备在线监测与故障诊断;
杨梦娇(1995),女,硕士,主要从事特高压交直流设备的设备绝缘与故障诊断工作。
- (责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.07.009

基于数字化映射的开关柜状态监测技术研究

霍凌宇, 苏国强, 和家慧*, 刘合金, 张林利

(国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

摘要:随着电力系统的进步,对电网可靠性的要求不断增加。作为关键电力设备,开关柜在运行中的放电和过热状态常引发多种类型的故障,从而严重影响供电的可靠性。现有的开关柜检测方法主要侧重于二维图表的分析,难以在三维空间中全面反映多物理场状态。针对此问题,采用多物理场耦合有限元模型,探究了开关柜运行状态下的温度和电场分布,并基于仿真结果结合现场运行状态,构建了基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络的开关柜代理模型,可大幅缩短仿真时间。此外,还研究了基于自适应神经模糊推理系统(adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS)的开关柜故障诊断算法,并借助Unity实现了开关柜状态信息的可视化呈现,据此提升开关柜数据监测的准确性和实时性,为开关柜预防性运维提供新思路。

关键词:开关柜;多物理场;故障诊断;可视化

中图分类号: TM591

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)07-0086-11

Research on Switchgear Condition Monitoring Technology Based on Digital Mapping

HUO Lingyu, SU Guoqiang, HE Jiahui*, LIU Hejin, ZHANG Linli

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

Abstract: With the progress of power system, the requirements for grid reliability are increasing. As a key power equipment, the discharge and overheating states of switchgear in operation often trigger multiple types of faults, thus seriously affecting the reliability of power supply. Existing switchgear detection methods mainly focus on the analysis of two-dimensional diagrams, which is difficult to comprehensively reflect the multi-physics field state in three-dimensional space. Therefore, in this study, a multi-physics field coupled finite element model is adopted to explore the temperature and electric field distribution of the switchgear under the operating state. Besides, on the basis of the simulation results combined with the on-site operating state, an agent model of the switchgear based on radial basis function (RBF) neural network is constructed, which can significantly shorten the simulation time. In addition, a switchgear fault diagnosis algorithm based on adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) is also studied, and the visual presentation of switchgear state information is realised with the help of Unity, which improves the accuracy and real-time performance of switchgear data monitoring and provides a new way of thinking for preventive operation and maintenance of switchgear.

Keywords: switchgear; multi-physics field; fault diagnosis; visualization

0 引言

随着电力系统的发展,开关柜等变电设备的数量不断增多,由于其在电力系统电能产生、输配与转换的过程起着控制和保护用电器的作用,其安全运

行直接决定电力系统的稳定性。建设智能电网目标的提出,对开关柜的状态监测和故障诊断提出了新的要求。

目前,开关柜的缺陷检测方法大多集中在单一特征量的二维图表分析上,主要包括局部放电检测^[1]、温升检测^[2]和泄漏电流检测。刘嘉欣等人^[3]对三维声纹监测技术和三维紫外技术等多种局部放电带电检测技术进行研究,构建不同局部放电带电检

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520626230014)。
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(520626230014)。

测技术,并检测相关设备运行状态;张晓新等人^[4]对典型绝缘缺陷下的局部放电进行特高频段试验,分析局部放电信号的时频域特征和工频相位相关性,并设计了一款局部放电在线监测系统;易鹏飞等人^[5]研究了基于测量开关柜表面超声波信号的局部放电故障预警方法,可有效检测出开关柜故障信息;张帆^[6]搭建了特高频局部放电检测平台,采用粒子群优化支持向量机(particle swarm optimization-support vector machine, PSO-SVM)算法进行故障诊断,准确率有一定提升;李杏等人^[7]在故障定位诊断时引入了紫外成像检测技术,提高了局放检测定位的精准性,但上述方法检测特征单一,不能全面反映开关柜状态;王建新等人^[8]利用传感器获取低压开关柜的运行数据,对特征值使用马氏距离算法进行计算,从而在线监测其运行状态;郭志伟等人^[9]实时监测开关柜各类型电气量和非电气参数,采取最小冗余最大相关(max-relevance and min-redundancy, mRMR)算法获得最优特征子集判别开关柜的故障状态;董政等人^[10]给出了典型的开关柜内部缺陷诊断分析和定位方法,并对后续的安装和施工提出几点建议;郑莹莹等人^[11]实现了金属尖端、悬浮电极、自由金属颗粒和绝缘气隙等缺陷的模拟;李琮等人^[12]研究了一种新型的基于声表面波(surface acoustic wave, SAW)传感器的无线无源测温技术,实现远程温升预警及状态监测,上述方法虽检测特征覆盖面较广,但仍停留在二维图表分析,未能直观系统地展示开关柜运行状态。

为更好地利用多特征信息,综合分析开关柜多物理场状态,实现开关柜运行状态的直观、准确监控。首先研究了开关柜热电耦合仿真,基于仿真结果搭建了基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络的开关柜代理模型;进一步采用自适应神经模糊推理系统(adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS)模糊神经网络构建开关柜故障诊断系统;最后结合上述研究内容在 Unity 中实现开关柜状态信息可视化并提出针对性建议,实现主动运维。

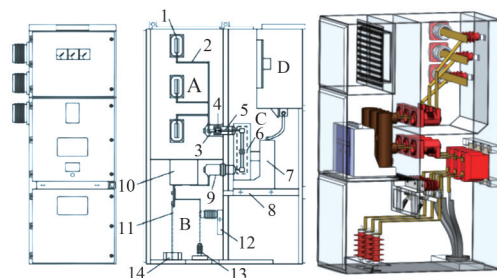
1 基于RBF神经网络的开关柜代理模型搭建

为了快速预测高压开关柜在不同环境温度中内部温度场的分布,本节在 KYN28 型高开关柜数字化

建模基础上,通过有限元软件在不同环境温度下对其精细网格模型进行热电耦合仿真,获得其合理的内部温度分布。然后采用模型网格粗化和字典树节点去重的方法,构建开关柜降维模型的轻量化空间节点;基于精细网格的空间节点及温度仿真数据,使用 K-近邻(K nearest neighbors, KNN)算法和高斯径向基插值构造降维节点的高精度温度数据,形成降维模型的模拟仿真数据集,进一步利用不同环境温度下的降维仿真数据集采用立方体曲面(Cubic)核函数的 RBF 神经网络训练每个节点的代理模型。当环境温度改变时,通过调用代理模型计算降维模型节点温度数据并进行云图重构,从而实现基于 RBF 神经网络代理模型的开关柜热电耦合快速模拟仿真。

1.1 开关柜三维建模

KYN28 型高压开关柜由于性能可靠、体积较小、安装方便得到广泛运用,其高×深×宽为 2 300 mm×1 500 mm×800 mm,由母线室、电缆室、手车室、仪表室四部分组成,主母线和分支母线分别为 125 mm×10 mm 和 125 mm×8 mm 的 TMY 矩形铜排,断路器、接地开关、电流互感器、避雷器以及触头盒分别采用实际型号参数,三维建模结构如图 1 所示。



1-主母线;2-分支母线;3-静触头;4-梅花触头;5-动触头
6-断路器手车;7-断路器;8-可抽出式水平隔板;9-触头盒;
10-电流互感器;11-电缆开关;12-接地手车操作结构;13-避雷器;14-接地母线;A-母线室;B-电缆室;C-手车室;D-仪表室

图1 KYN28系列12 kV开关柜结构

Fig.1 KYN28 series 12 kV switchgear structure

1.2 开关柜热电耦合仿真

由于开关柜内部结构复杂,在进行仿真分析时按图 2 所示对模型进行简化。多个触臂两两一对由弹簧固定并联而成的梅花触头简化为接触面、省略穿墙套管和触头盒、同时将螺栓、螺栓孔以及

接地开关结构件进行省略,经仿真验证表明,简化模型仿真结果与实际模型几乎相同,对后续分析没有影响。

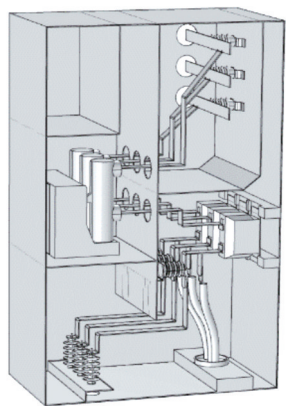
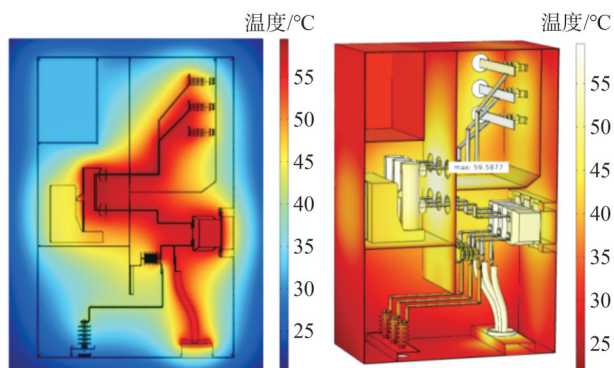


图2 开关柜简化三维模型

Fig.2 Simplified 3D model of switchgear

设置开关柜电流通路为铜材质,柜体采用结构钢,绝缘套管、绝缘子等使用环氧树脂材料,电流互感器使用锌材质;额定电流 630 A,并采用对流换热方式,其换热系数采用层流经验值 $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,在环境温度 20°C 时,仿真结果如图 3 所示。



(a) 温升仿真二维图像 (b) 温升仿真三维图像

图3 开关柜热电耦合仿真结果

Fig.3 Simulation results of switchgear thermoelectric coupling

从有限元仿真结果可以得到:进线三相母排温升存在较小差异,B相温升最大,且母线接头转角处温升最大;由于大电流和接触电阻,开关柜通电回路及周围区域存在温升,断路器进线处以及电缆接头

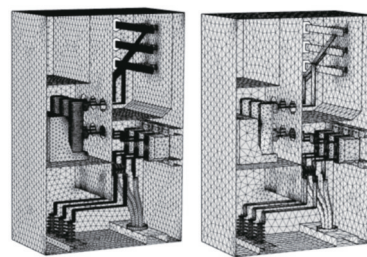
处温升较大。

1.3 开关柜模型网格节点降维

开关柜内部零部件较多、组件结构复杂,将数据降维方法与代理模型相结合,可以提高模型在预测高维复杂问题的效果。

开关柜三维模型的节点空间位置复杂且大量重复,同时温度数据也呈非线性分布,因此选取仿真模型粗化网格和字典树去重算法,实现开关柜模型网格节点的降维;进一步利用 KNN 算法构造降维网格模型的温度,最终实现开关柜降维模型的模拟仿真。

首先在精细网格的基础上,对开关柜部件网格进行合理粗化,初步实现开关柜空间节点降维,前者网格节点数为 512 844 个,粗化后节点数量为 203 946 个,压缩率达 39.77%,效果如图 4 所示。



(a) 初始网格 (b) 粗化网格

图4 开关柜网格粗化降维

Fig.4 Switchgear grid coarsening for dimensionality reduction

初始粗化压缩后网格节点数量仍然不能满足轻量化的要求。根据网格节点分布在三维三角形笛卡尔坐标系中,由表面法线和右手定则排序而形成顶点,网格内大量节点重复共用,因此采用了字典树去重的策略进行逐一排除降维,如图 5 所示。

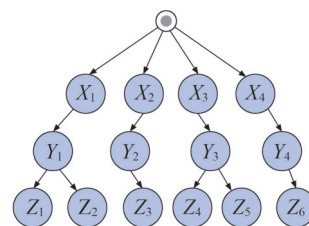


图5 网格节点字典树去重法

Fig.5 Grid node dictionary tree de-emphasis method

将空间节点 (X, Y, Z) 看作由三个坐标组成的字符串,从根节点 X 出发到目标节点 Z 的路径,组成一个空间节点坐标。去重后,初始、粗化后、去重后三种模型的节点数量如图6所示,最终得到的降维模型的复杂度为原模型的5.89%,大大降低了模型仿真计算量。

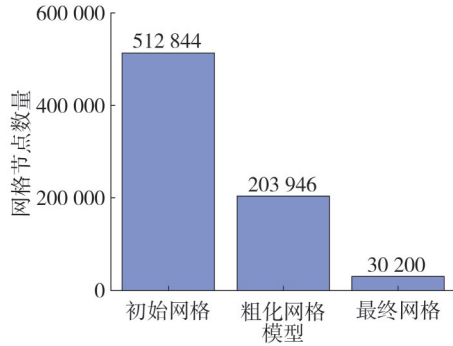


图6 网格节点降维模型比较

Fig.6 Comparison of grid node dimensionality reduction models

由于网格节点降维后,生成的网格节点不在原先网格节点的位置,需要进行局部的近似分析计算。因此,选取非参数、有监督的KNN算法来对降维之后的网格节点进行局部近似,能够避免训练数据的资源消耗。

KNN算法在已知网格节点中寻找 K 个与当前待识别点最相近的网格节点来预测当前点的温度。假设初始网格模型中所有节点空间位置及温度表示为 $X^1 = \{X_1^1, X_2^1, \dots, X_n^1\}$,降维模型节点 $x^1 = \{x_1^1, x_2^1, \dots, x_n^1\}$ 作为待求点。对于待求点 x_i ,集合 X 中欧氏距离与

它最近的 K 个点记为 $X_{iK} = \{X_{i+1}, X_{i+2}, \dots, X_{i+K}\}$,其中欧式距离的计算公式为

$$d(X_j^1, x_i^1) = \sqrt{(X_{jx}^1 - x_{ix}^1)^2 + (X_{jy}^1 - x_{iy}^1)^2 + (X_{jz}^1 - x_{iz}^1)^2} \quad (1)$$

式中: $X_{jx}^1, X_{jy}^1, X_{jz}^1$ 分别为已知点 j 的三维坐标; x_{ix}, x_{iy}, x_{iz} 分别为待求点 i 的三维坐标。从而KNN把 x_i 划分在 X_{iK} 的温度属性中,如图7所示。

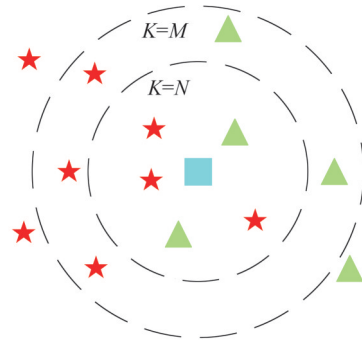


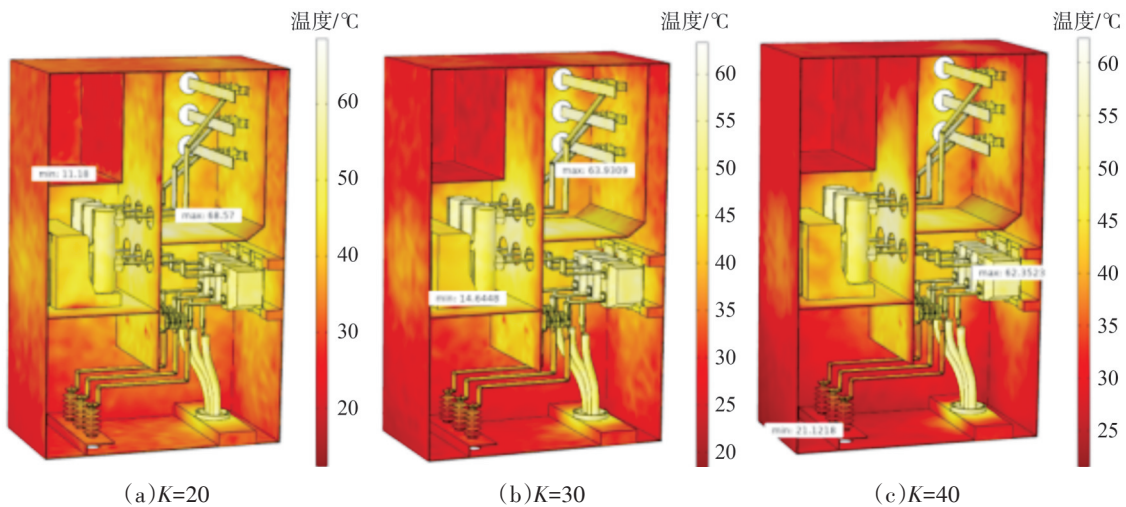
图7 KNN算法

Fig.7 KNN algorithm

由KNN算法原理可知,为提高预测鲁棒性和泛化能力,需要增大 K 值;但为不混入过多无关温度属性节点,减小训练误差, K 值也不能过大。当环境温度为 20°C 时,对 K 分别取20、30、40、50、60、70时进行验证,并进一步重构,重构后如图8所示。

由图8可知,当 $K \leq 50$ 时,开关柜重构模型最高温度和最低温度重构不准确,重构图像也较为粗糙;比较不同 K 值下温度极值,如图9所示。

K 值变化时温度预测误差如图10所示。当



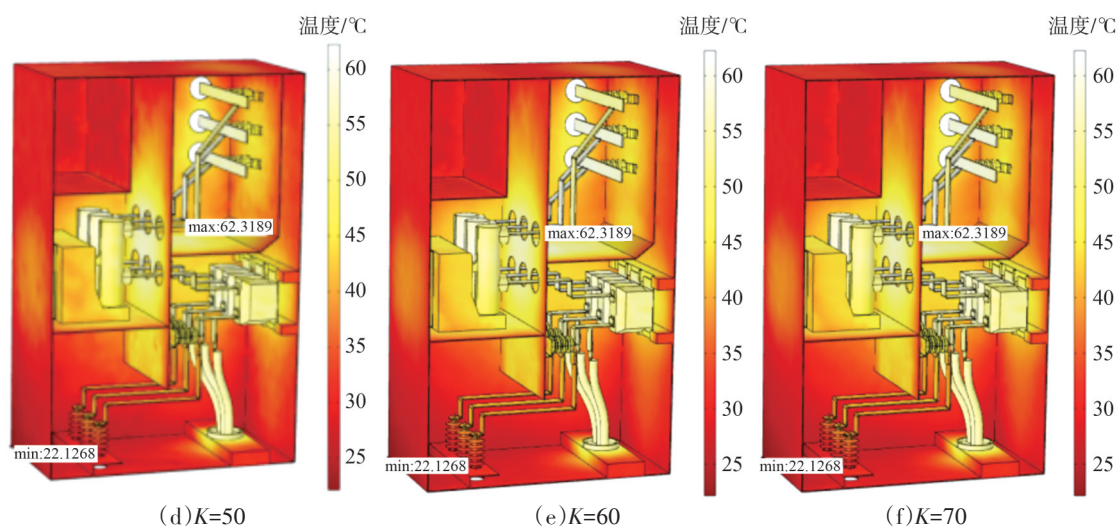


图8 K值变化重构云图

Fig.8 K value change reconstructed cloud map

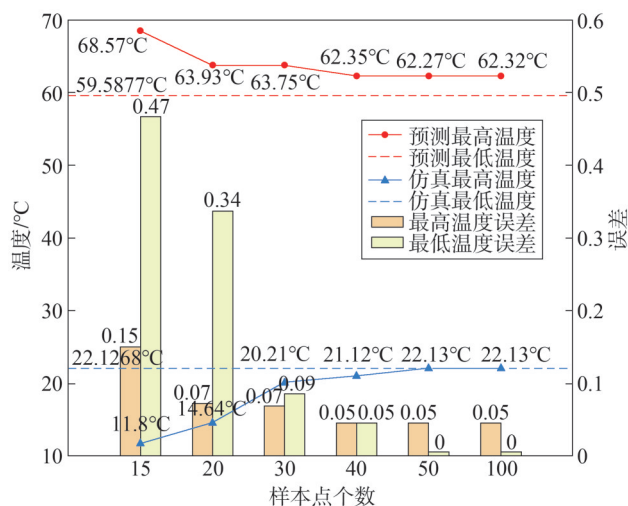


图9 不同K值的温度极值对比

Fig.9 Comparison of temperature extremes with different K values

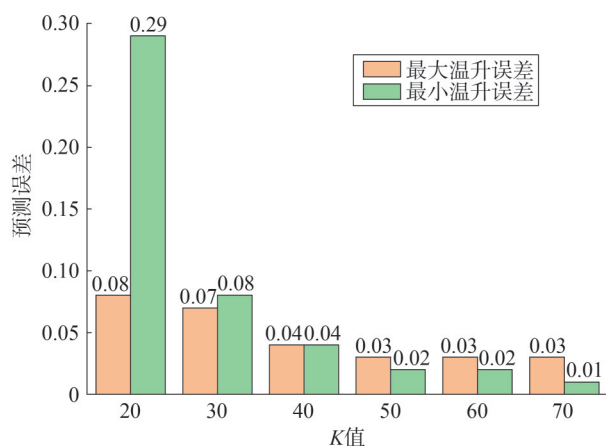


图10 K值变化时温度预测误差

Fig.10 Temperature prediction error when K varies

$K \geq 50$ 时,预测最高温度误差不足 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,预测最低温度误差几乎为0,并且 K 值越大计算的复杂程度越高,因此选择 $K=50$ 结合高斯径向基插值方式预测降维节点温度,能够反映开关柜温升真实情况。

1.4 基于RBF的代理模型仿真

RBF 在基函数的基础上进行加权和插值,对解决非线性问题有较强的鲁棒性,对于开关柜非线性温度分布具有较好的拟合性,因此选取 RBF 插值进行代理模型仿真。

以室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为中心,选择 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 共 8 个环境温度进行初始网格仿真,使其能够拟合该温度区间内的温度情况,在该区间内均匀选择温度作为训练数据集,以使得该区间内能够更好的训练和预测。进一步利用前文所述的降维方法对 8 个模型进行降维仿真。在降维后 30 200 个节点,构建每个节点在 8 个温度下的 RBF 函数。假设每个空间节点 (x_i, y_i, z_i) ,降维仿真模型提供了 8 种环境温度 T_i 下的网格节点温度数据 t_i ,将这 8 个温度数据作为插值节点 $(T_i, t_i) | i=1, 2, \dots, 8$ 。则 RBF 插值函数为

$$\hat{f}(T) = \sum_{i=1}^N \omega_i \varphi(\|T - T_i\|) \quad (2)$$

式中: N 为插值节点个数; T 为等待插值的节点温度; ω_i 为插值矩阵; φ 为基函数矩阵。

将节点带入 RBF 函数为

$$\begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1N} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \varphi_{N1} & \varphi_{N2} & \cdots & \varphi_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\Phi = [\varphi_{ij}]$ 为总的插值矩阵, 且有 $\varphi_{ij} = \varphi_{ji} = \varphi(\|T_j - T_i\|)$, 同时 Cubic 基函数写为 $\varphi(\eta) = \eta^3$, 所以对于第 j 行为

$$\hat{f}(T_j) = t_j = \sum_{i=1}^N \omega_i \varphi(\|T_j - T_i\|) \quad (4)$$

因此求解方程为

$$W = \Phi^{-1} t' \quad (5)$$

式中: t' 为目标温度。

各模型仿真时间对比如图 11 所示。由图 11 可知, 运用 RBF 进行代理模型的模拟仿真有效节省了计算资源, 能实现降维模型秒级的模拟仿真, 为后续可视化奠定了基础。

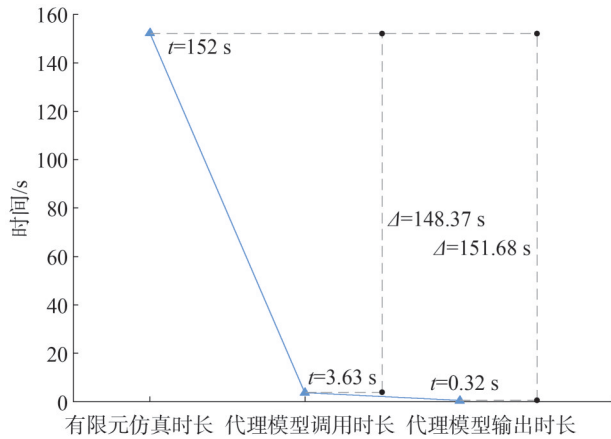


图 11 各模型仿真时间对比

Fig.11 Comparison of simulation time for various models

2 开关柜故障诊断模型

2.1 故障诊断模型搭建

故障诊断是保证电力设备安全稳定运行的关键技术手段^[13], 开关柜故障诊断技术可以分为 3 种类型: 模型驱动的智能故障诊断方法、知识驱动的智能故障诊断方法和数据驱动的智能故障诊断方法^[14]。随着计算能力不断增强, 基于深度学习的数据驱动的故障诊断方法成为了智能故障诊断领域的热点研究方向。

经典的深度学习模型通常包括: 深度置信网络 (deep belief network, DBN)^[15]、卷积神经网络

(convolutional neural network, CNN)^[16]、自编码器及其变体 (auto - encoder, AE)^[17]、循环神经网络 (recurrent neural network, RNN)^[18]。其中, DBN 训练效率低、容易局部最优, CNN^[19-21]需要大量标签数据, AE^[22]较难捕捉特征的相关性, RNN^[23-24]存在梯度消失或梯度爆炸的问题。

本文在上述深度学习神经网络算法的基础上, 采用基于模糊理论和神经网络的自适应模糊神经推理系统 (adaptive - network - based fuzzy inference system, ANFIS), 用于高压开关柜故障诊断方法研究。ANFIS 可从训练集中提取用以描述故障状态的模糊参考模型, 在故障诊断时, ANFIS 得到当前系统的模糊模型描述, 并将其与各个参考模型相匹配, 从而对开关柜各设备运行状态得到正确的分类, 隶属度函数参数在训练时会随着迭代次数不断优化和调整, 寻求 ANFIS 模型中输入和输出之间的最优关系, 以此提高诊断准确率。

ANFIS 有 x^2 和 y^2 两个输入, f 为其输出, 采用 $O_{a,b}$ 来表示第 a 层第 b 个结点的输出, 是 Sugeno 型模糊推理系统的典型应用, 其需要满足两条模糊规则:

$$f_1 = p_1 x + q_1 + r_1, x = A_1 \text{ 且 } y = B_1 \quad (6)$$

$$f_2 = p_2 x + q_2 + r_2, x = A_2 \text{ 且 } y = B_2 \quad (7)$$

其中: f_1, f_2 分别为规则 1、2 所对应的输出结果; A_1, A_2, B_1, B_2 为规则 1、2 对应的非线性参数; p_1, q_1, r_1 为规则 1 的结论参数; p_2, q_2, r_2 为规则 2 的结论参数。

ANFIS 的基本结构如图 12 所示, 其中 Π 为相加。基于 ANFIS 的故障诊断流程如图 13 所示。

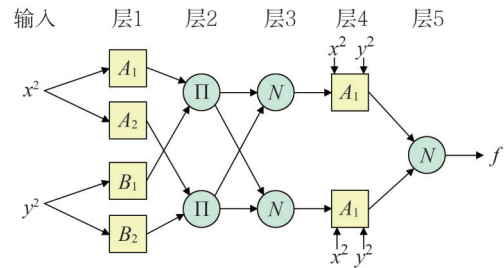


图 12 ANFIS 基本结构

Fig.12 The basic structure of ANFIS

2.2 故障诊断模型优化

由于模糊神经网络的输入信息紫外脉冲频率和设备温升有不同的量纲, 且数据跨度较大, 因此首先

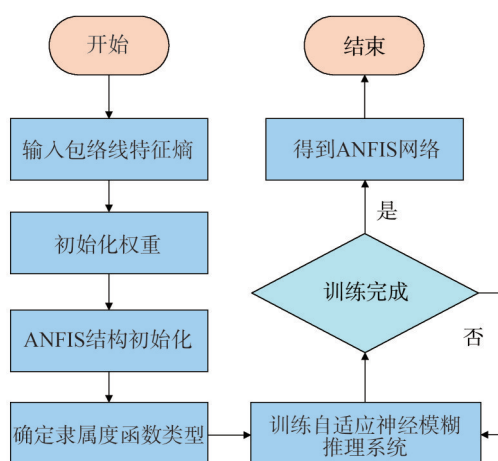


图13 ANFIS故障诊断流程

Fig.13 The fault diagnosis process of ANFIS

采用归一化处理将采集数据归一化至0和1之间,如式(8)所示。

$$X' = \frac{X^2 - X_{\min}^2}{X_{\max}^2 - X_{\min}^2} \quad (8)$$

式中: X' 为归一化后的数值; X^2 为归一化前的数值; $X_{\max}^2$ 、 $X_{\min}^2$ 分别为一组数据中的最大值和最小值。

为进一步探讨训练轮次对网络效果的影响,对故障诊断模型进行训练,结果如图14和图15所示。

由图14和图15可知,进行归一化处理后,迭代次数不再是影响模型准确性的因素。当迭代次数为100和200时,分别比较归一化和未归一化建立的模型中状态评估误差发现:进行归一化处理后,状态评估误差明显降低,模型准确性得以提升。因此,将通过实验获得的300组数据输入到模糊神经网络中进行训练,其中50组数据通过随机选取得到用于测试,保证了网络训练和测试的覆盖性和鲁棒性。将测试数据输入到网络中进行测试,得到网络预测与测试数据,结果如图16所示,绝对误差在0.06℃以内,网络有较好的预测效果。各方法预测误差如表1所示,其中本文所提ANFIS相比于常见的开关柜温升预测模型——BP神经网络^[25]和SVM回归预测^[26],误差分别减少了40%和70%,能够满足实际

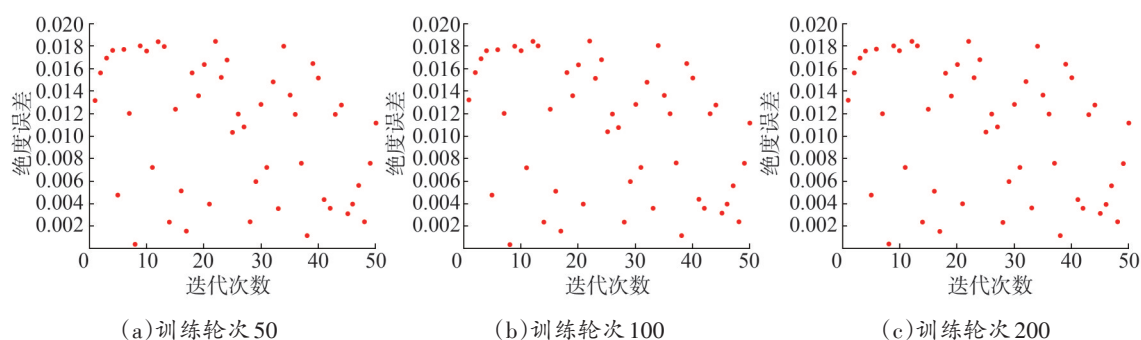


图14 迭代次数对绝对误差的影响

Fig.14 The influence of iteration number on absolute error

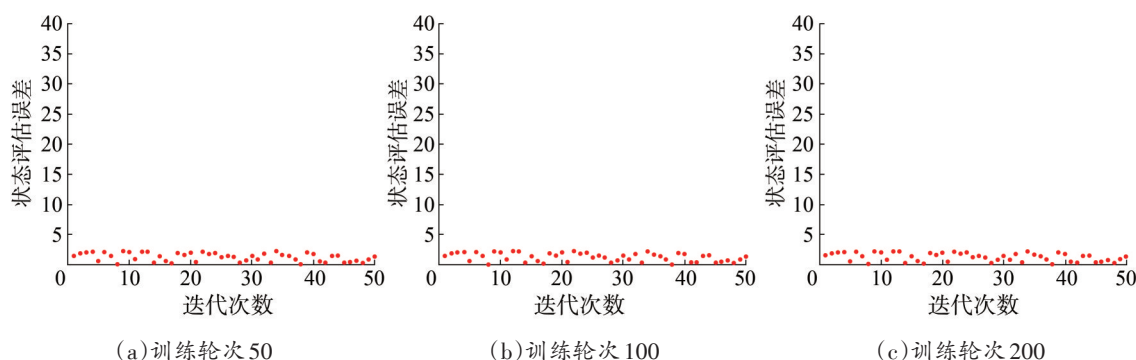


图15 迭代次数对状态评估误差的影响

Fig.15 The influence of iteration number on state evaluation error

使用需求,优于现有方法。

3 开关柜状态信息可视化

基于 Unity3D 的开关柜三维温度可视化监测系统,一方面需要展示完整的温度场域分布,另一方面要针对元部件进行展示。通过剖分域算法,将开关柜内部零件生成的一种可互换的文件格式(stereolithography, STL)文件顶点数据,与开关柜整体的温度数据集进行匹配,查找任意零部件其有限元节点温度值,生成仅包含该元件的温度数据集,进而通过温度空间-颜色空间映射转化,使用 Unity3D 的 Mesh 渲染方式,实现零件的三维可视化监测,为了保证数据传输的时效性和可靠性,采用 socket 通信方式,基于 TCP 协议进行传输。

基于虚实的开关柜温度监测系统架构于 PyQt 框架进行可视化呈现。其中,通过 Python 统一接受、解码传感器数据,依据用户指令调用指定的重建渲染接口,并通过三维图形界面将重构结果可视化呈现。系统可供使用的指令有开关柜整体温升分布,绝缘子、避雷器、母排、出线电缆局部温升分布选中切换指令,指令按钮位于正上方。可视化界面分为 4 个区域,上方为指令选择区域,下方左侧图片为现场相机实拍图呈现,中间图片为依据指令渲染重构得到的开关柜整体或局部温升分布,右上

方图为选定元件的温升概率分布曲线,右下方图为开关柜历史数据温升最大值的记录结果,如图 17 所示。

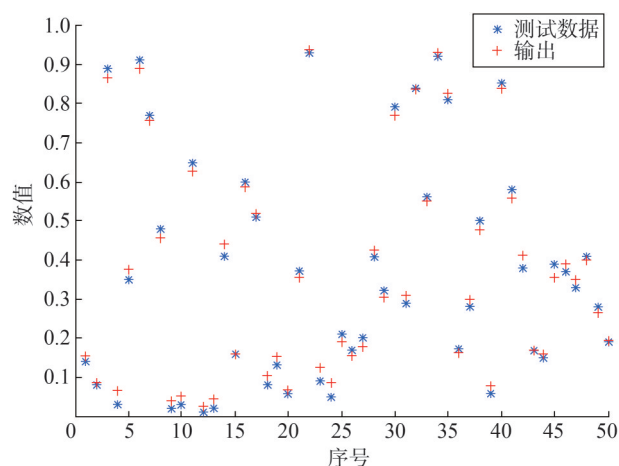


图 16 网络预测对比

Fig.16 Comparison of network forecasts

表 1 常见方法预测误差对比

Table1 Comparison of prediction errors of common

methods		单位/℃
模型	预测误差	
BP 神经网络	0.10	
SVM	0.20	
ANFIS(本文)	0.06	

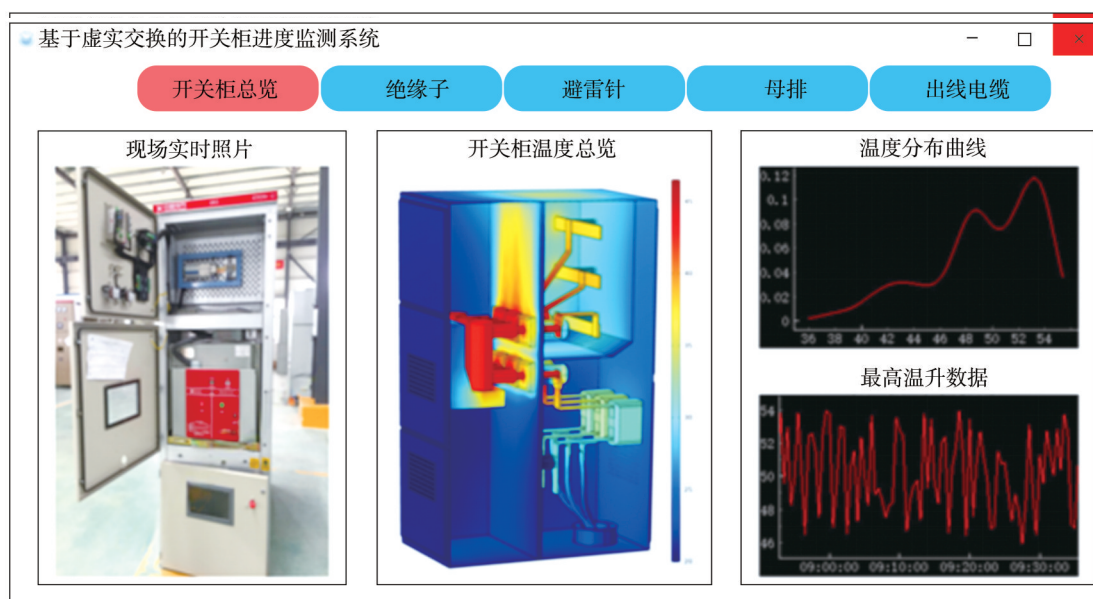


图 17 可视化界面 UI

Fig.17 Visualisation interface UI

图 17 中分为 5 个区域,最上方为元件选择区域,通过鼠标点击选择可以切换下方中间图呈现结果,被选中的部分通过标红加以凸显。下方最左边区域为数字孪生中实物呈现部分,基于数字孪生的监测系统是一个虚实互相映射的系统,通过在上述区域呈现相机实际拍摄的结果,将其与虚拟实体进行互相映射。下方中间图片为基于 RBF 插值神经网络训练重构得到的开关柜温升分布结果,通过可视化呈现,支持三维拖拽,放大缩小操作,为专家故障诊断和预测提供必要的图像数据。右侧上方图片为基于高斯核函数的温升概率分布曲线,在每个特定的时刻,通过将温度数据集进行核函数卷积,可以得到该时刻的温升概率分布曲线。高斯核函数在温

度分析中常用于模拟温度分布,其形式为

$$K(g, g_i) = \exp(-(g - g_i)^2 / (2 \cdot \sigma^2)) \quad (9)$$

式中: g_i 为温度数据集中的一个数据点; g 为当前时刻温度值; σ 为高斯核函数的标准差,控制曲线的宽度。通过将高斯核函数应用于温度数据集的每一个数据点,并对所有结果进行求和,可以得到当前时刻的温升概率分布曲线。温升概率分布曲线可以用于预测潜在的温度变化趋势,有利于故障诊断预测分析。

用户界面还提供监测信息的展示区域,如图 18 所示。折线图和柱状图分别为经过紫外、红外数据处理后 1 s 内的紫外脉冲频率特征和红外温升特征;界面中表格部分为实时数据记录窗口和历史特征回

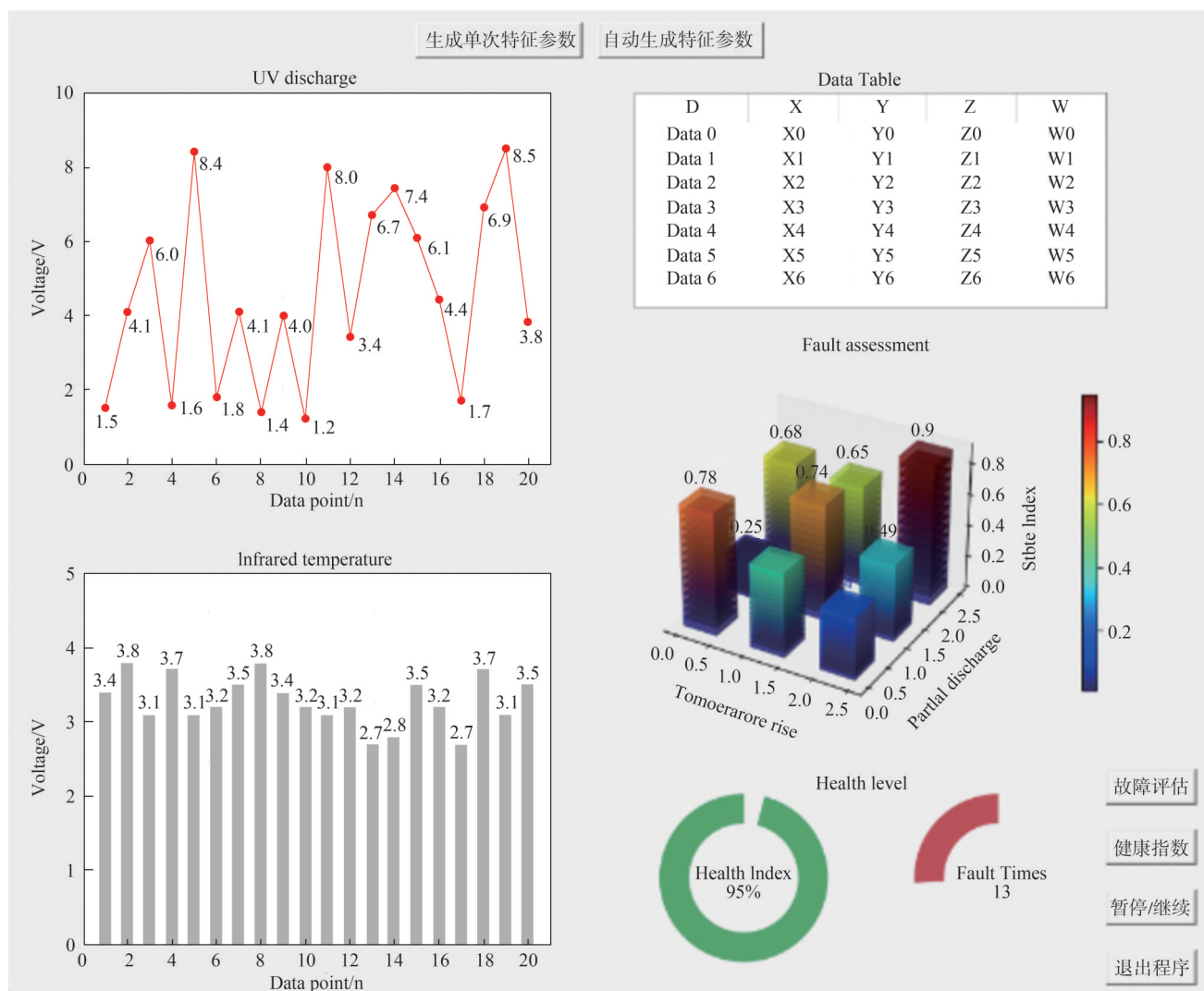


图 18 状态分析和故障诊断 GUI 主界面

Fig.18 Main interface of the GUI for condition analysis and fault diagnosis

调窗口;三维柱状图融合了 ANFIS 网络输出的评估结构后,将二维评估数值进行三维化的展示, X 坐标为温升状态评估, Y 坐标为放电状态评估, Z 坐标则为综合温升、放电数据后的评估指数,此外将状态指数与柱体高度和颜色参数相关联,实现根据故障状态柱体颜色的渐变功能;饼图为整体健康指数评估以及故障次数的记录,当健康指数低于 70% 或故障次数高于 30 次(可设置阈值),则发出警报。通过 Python 中开发的状态分析与故障诊断图形用户界面(graphical user interface, GUI)结合 LabVIEW 中的状态实时监测 GUI,将 Excel 作为数据连接的桥梁,实现了数据的保存,还同时实现了状态的实时监测、异常提示、故障警报、历史查询以及特征数据与评估状态展示等功能。

4 结论

通过代理模型搭建、故障诊断系统研究以及开关柜三维状态可视化实现了虚实结合的开关柜数字化诊断,得到了以下结论:

1)通过网格粗化和节点去重的方法实现了开关柜网格节点的降维,节点数量变为初始的 5.89%,并利用 KNN 和 RBF 实现了高效模拟仿真;

2)采用了基于模糊理论和神经网络的自适应模糊神经推理系统,并对其进行了归一化优化,绝对误差在 0.06 °C 以内,预测效果良好;

3)通过 Unity3D 和 PyQt 搭建了开关柜三维温度可视化监测系统,能展现实物、虚拟实物和温升概率分布曲线,可预测潜在的温度变化趋势,有利于故障诊断预测分析。

参考文献

- [1] 尹志贵.配网开关柜的超声波局部放电和暂态地电压联合分析方法[J].山东电力技术,2019,46(7):30-32.
YIN Zhigui. Ultrasonic partial discharge and transient ground voltage combined analysis method for distribution network switch cabinet[J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(7): 30-32.
- [2] 刘东明,李军,王军波,等.高压开关柜无线红外在线测温系统设计[J].山东电力技术,2019,46(12):55-59.
LIU Dongming, LI Jun, WANG Junbo, et al. Design of wireless infrared on-line temperature measurement system for high voltage switchgear[J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(12): 55-59.
- [3] 刘嘉欣,于浩,莫中岳.高压开关柜局部放电故障缺陷诊断技术

- 分析[J].机械设计与制造工程,2022,51(10):97-100.
LIU Jiaxin, YU Hao, MO Zhongyue. Analysis of partial discharge fault diagnosis technology for high voltage switchgear[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022, 51(10): 97-100.
- [4] 张晓新,刘莹莹,林峰,等.基于特高频法的开关柜局放监测系统研究[J].电力电子技术,2023,57(6):42-45.
ZHANG Xiaoxin, LIU Yingying, LIN Feng, et al. Research on partial discharge monitoring system of switchgear based on UHF method[J]. Power Electronics, 2023, 57(6): 42-45.
- [5] 易鹏飞,邹平,梁科,等.基于超声波技术的开关柜故障预警方法研究[J].电工技术,2021(2):108-109.
YI Pengfei, ZOU Ping, LIANG Ke, et al. Research on fault warning method of switch cabinet based on ultrasonic technology [J]. Electric Engineering, 2021(2): 108-109.
- [6] 张帆.基于特高频的开关柜局部放电检测与故障诊断[J].能源与节能,2021(11):120-122.
ZHANG Fan. Partial discharge detection and fault diagnosis of switch cabinets based on UHF[J]. Energy and Energy Conservation, 2021(11): 120-122.
- [7] 李杏,陈浩.基于紫外成像技术的开关柜局部放电故障精准定位[J].电气开关,2021,59(6):96-99.
LI Xing, CHEN Hao. Precise location of partial discharges in switchgear based on ultraviolet imaging technology [J]. Electric Switchgear, 2021, 59(6): 96-99.
- [8] 王建新,李铁军,朱军,等.低压开关柜运行在线监测和诊断系统设计[J].电气工程学报,2021,16(4):189-195.
WANG Jianxin, LI Tiejun, ZHU Jun, et al. Design of on-line monitoring and diagnosis system for low-voltage switchgear operation [J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(4): 189-195.
- [9] 郭志伟,徐子涛,刘波,等.基于最优特征量选取的开关柜故障判别方法研究[J].电测与仪表,2023,60(8):85-91.
GUO Zhiwei, XU Zitao, LIU Bo, et al. Research on switchgear fault judgment method based on optimal feature quantity selection [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(8): 85-91.
- [10] 董政,王小朋,魏彬,等.35 kV 开关柜内部局部放电异常分析[J].山东电力技术,2020,47(10):49-53.
DONG Zheng, WANG Xiaopeng, WEI Bin, et al. Analysis of the partial discharge fault in 35 kV switchgear [J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(10): 49-53.
- [11] 郑莹莹,吕俊涛,黄锐,等.高压开关柜内部缺陷的局部放电信号特征研究[J].山东电力技术,2018,45(12):40-45.
ZHENG Yingying, LYU Juntao, HUANG Rui, et al. Partial discharge signal characteristics for internal defects of high voltage switch cubicles [J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(12): 40-45.
- [12] 李琮,孙英涛,吕学宾,等.高压开关柜温度在线监测技术研究[J].山东电力技术,2017,44(9):77-80.

- LI Cong, SUN Yingtao, LV Xuebin, et al. Research on on-line temperature monitoring technology for high voltage switchgear[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(9): 77-80.
- [13] 刘柳. 高压开关柜故障诊断系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [14] 王祥. 基于深度学习的配网设备故障诊断方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [15] HINTON G E, SALAKHUTDINOV R R. Reducing the dimensionality of data with neural networks[J]. Science, 2006, 313(5786): 504-507.
- [16] LECUN Y, BOTTOU L, BENGIO Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(11): 2278-2324.
- [17] SHAO H D, JIANG H K, ZHAO H W, et al. A novel deep autoencoder feature learning method for rotating machinery fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 95: 187-204.
- [18] SCHMIDHUBER J. Deep learning in neural networks: an overview [J]. Neural Networks, 2015, 61: 85-117.
- [19] MOHAMED A R, DAHL G E, HINTON G. Acoustic modeling using deep belief networks [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2012, 20(1): 14-22.
- [20] LECUN Y, BOSER B, DENKER J, et al. Handwritten digit recognition with a back-propagation network [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 1989.
- [21] ZHAO G Q, ZHANG G H, LIU Y F, et al. Lithium-ion battery remaining useful life prediction with Deep Belief Network and Relevance Vector Machine [C] // 2017 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). IEEE, 2017: 7-13.
- [22] GUO Y M, LIU Y, OERLEMANS A, et al. Deep learning for visual understanding: a review[J]. Neurocomputing, 2016, 187: 27-48.
- [23] FUNAHASHI K I, NAKAMURA Y. Approximation of dynamical systems by continuous time recurrent neural networks [J]. Neural Networks, 1993, 6(6): 801-806.
- [24] HOANG D T, KANG H J. A survey on Deep Learning based bearing fault diagnosis[J]. Neurocomputing, 2019, 335: 327-335.
- [25] 王印松, 刘佳微, 贾思宇, 等. 基于改进 PSO-LSTM 算法的风电机组状态监测方法研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(5): 30-37.
- WANG Yinsong, LIU Jiawei, JIA Siyu, et al. Research on wind turbine status monitoring methods based on improved PSO-LSTM algorithm[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(5): 30-37.
- [26] 周超, 沈浩, 刘辉, 等. 输电线路杆塔状态监测网络低延时技术研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(12): 27-31.
- ZHOU Chao, SHEN Hao, LIU Hui, et al. Research on low-latency technology of transmission line tower status monitoring network [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(12): 27-31.
- 收稿日期: 2024-05-10
修回日期: 2024-08-17
- 作者简介:
- 霍凌宇(1976), 男, 高级工程师, 从事电网规划领域的研究工作;
苏国强(1989), 男, 博士, 高级工程师, 从事配网运检、配电设备状态评估相关工作;
和家慧(1997), 通信作者(hjh_ncepu@163.com), 女, 硕士, 工程师, 从事配网运检、配电设备状态评估相关工作;
刘合金(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 从事配网运检、配电设备状态评估相关工作;
张林利(1979), 男, 博士, 高级工程师, 从事配电自动化相关工作。
- (责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.07.010

架空输电线路舞动风险定量评价方法研究

何勇军¹, 孙国磊¹, 张斌¹, 赵彬^{2*}, 程剑¹

(1. 国网山东省电力公司建设公司, 山东 济南 250021; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055)

摘要:近年来,舞动已成为危害架空输电线路安全的主要灾害之一,但目前线路舞动风险及防舞装置有效性评价方法,尤其是定量化、全局性评估方法缺失。在充分考虑诱发机理、线路结构和气象因素基础上,首先确定须重点考虑的两个关键量化维度——覆冰厚度和风速。再基于统计加权原理,提出一种舞动风险数值定量计算方法,来综合反映线路加装防舞装置前后,舞动区、风区、冰区等设计工况与线路舞动风险的整体关联关系,然后以百分比形式给出评价数值。最后,以某段500 kV线路工程为例,利用所提方法分析其防舞必要性和加装防舞者前后差异性,定量说明防舞措施的合理性。研究成果为后续线路规划设计和运维技改环节防舞装置优化应用,提供了参考。

关键词:架空输电线路;覆冰舞动;定量评价;统计加权;防舞设计

中图分类号:TM726.1

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)07-0097-08

Research on Quantitative Evaluation Method for Galloping Risk of Overhead Transmission Lines

HE Yongjun¹, SUN Guolei¹, ZHANG Bin¹, ZHAO Bin^{2*}, CHENG Jian¹

(1. Construction Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250021, China;

2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

Abstract: In recent years, galloping has emerged as a significant threat to the safety of overhead transmission lines. However, there is a dearth of effective evaluation methods for line galloping risk as well as anti-galloping devices, particularly those that are quantitative and comprehensive. This paper, grounded in a thorough examination of triggering mechanisms, line structures, and meteorological factors, identifies two critical elements to focus on: ice thickness and wind speed. Utilizing statistical weighting, a numerical quantification method for galloping risk is introduced. This method comprehensively assesses the interrelationships among design conditions, such as galloping zones, wind zones, and icy zones, and the risk of line galloping both before and after the installation of anti-galloping devices. The evaluation results are presented in percentage form. Using a 500 kV transmission line project as an example, the study analyzed the necessity of anti-galloping measures and the differences before and after the installation of anti-galloping devices, quantitatively demonstrating the rationality of these measures. The findings of this study offer a reference for optimizing the application of anti-galloping devices in anti-galloping design work of line design, operation, maintenance, or technical upgrades.

Keywords: overhead transmission lines; galloping; quantitative evaluation; statistical weighting; anti-galloping design

0 引言

近年来,架空导线频繁出现的覆冰舞动现象,成

为威胁输电线路安全运行的常见自然灾害之一^[1-2]。在线路工程规划设计和运维技改环节,利用力学计算或试验方法,开展线路故障风险评估,对加装防舞者^[3-4]前后防舞能力差异和提升效果进行评价,是考量其防舞能力的重要环节^[5-6]。

现有的覆冰导线舞动风险和防舞效果评价指标,大都关注临界起舞风速、舞动幅值和动张力三种因素之一或两种^[7-10],但考虑工况条件有限,缺乏全

基金项目:国网山东省电力公司科技项目“舞动导致相间间隔棒故障机理及防治技术研究”(2023A-127)。
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Study on the Mechanism and Prevention Technology of Inter-phase Spacer Fault Caused by Galloping” (2023A-127).

局性。

预测预警是舞动风险评估工作成果的应用领域之一,也是近年来热点领域。其中,梁允、李清、褚双伟和廖峥等^[11-14]将数值天气预报和人工智能预测模型,如灰色聚类分析模型、误差反传(back propagation, BP)神经网络模型等,开展输电线路舞动风险预测预警研究,将舞动风险概率值和通过频次法划分的舞动分区相结合,基于风速、降水等案例统计数据,来分析确定白化权函数和指标权重值等关键系数,再计算综合风险系数,评估了未来不同时间段内某地区输电线路舞动导致故障的概率,为电网调度和线路运维提供技术支撑。徐文宝^[15]围绕电网危控区的风险态势展开研究,针对架空输电线路舞动等预警问题,提出了输电设备危控区的划分方法,建立了危控区风险事件的预警模型。李鑫等^[16]基于历史冰害案例,训练了一种梯度提升树模型,可通过调整权重系数,对线路状态进行等级划分,确认跳闸风险。朱墨^[17]针对舞动故障风险预测问题,建立基于模糊理论的覆冰厚度级故障风险预测模型,分析了冰灾对线路修复时间影响,基于序贯蒙特卡洛法进行系统的风险评估,建立了多点停运的线路失效模型,并分析了冰灾期间重冰区和非重冰区负荷节点运行,为降低冰灾对电网的冲击提供了理论支撑。陈立征^[18]分析总结了影响覆冰过程的风速、降水等因素,结合极端冰雪下电力系统故障特征,提出了考虑极端冰雪事件的电力系统混合仿真的评估方法与仿真框架,为线路冰害防治提供了参考。除此以外,李军辉、杨加伦等^[19-22]根据线路所在气象、地理信息,与历史舞动时间诱因耦合度统计方法,提出了舞动区分布定量分析和评估方法。

然而,预测预警工作采用的人工智能或常规统计模型,虽然广义概念上也是舞动风险评估方法,但缺乏线路结构动力学特征考量,无法体现舞动诱发和响应过程具体细节,与本文所提定量评估方法的适用范围和具体问题方面,存在较大差异。

考虑到覆冰导线舞动诱发条件所包含的复杂耦合因素,截至目前,尚未提出一种统一、规范且标准的定量方法,可以将现有的多种舞动诱发条件、结构特征和环境因素充分融合考虑,并利用直观、有效的量化指标,来准确描述某线路(耐张)段的舞动故障风险,表述防舞措施采取前后舞动风险变化和防舞

效能力差异。

基于此,本文提出综合性定量评价方法,用合理数字指标,来直观展示不同线路段舞动风险大小,力图解决上述问题。

1 主要量化维度

明确所需的主要量化维度,是提出定量评价方法必要的基础前提条件,可为后续分析、评估方法指明方向。从线路结构特征、环境因素和诱发机理判据方法3个方面论证量化维度选取范围和合理性。

1.1 线路结构特征

现有研究表明,舞动诱发涉及的架空导线本体结构参数包含4类23种^[23-24],具体如表1所示。

表1 舞动诱发涉及的本体结构特征
Table 1 The structural features involved in galloping induction

序号	设备	特征参数
1	导线	截面积
2		外径
3		弹性模量
4		运行张力
5		自阻尼
6		线密度
7		耐张段长度
8		档距
9		架空走向
10		弧垂
11		分裂数
12		分裂间距
13	金具 (间隔棒和防舞器)	质量
14		阻尼
15		刚度
16		数量
17	绝缘子	类型
18		刚度
19		长度
20		数量
21	杆塔	呼高
22		高差

由于舞动本身的强非线性特征,每类参数的极小变化,都会对架空导线的起舞风速、幅值、频率和模态等响应特征造成一定影响,给定量评价工作带来巨大挑战。

1.2 环境因素

现阶段输电工程设计过程中,首先根据电压等级等情况,对导线、杆塔和绝缘子等主要设备选型,初步明确本特征参数,再考虑环境要素,来确定具体防舞方案。而需要考虑的环境要素,包含风场和覆冰两方面。

1)风场因素。风是自然界中可对线路造成常态化、多种形式影响的气象要素之一。基于历史案例,历次舞动现象中,风场会受到地貌类型、地形起伏、水文植被等多重因素影响,产生一定转向、脉动或随机扰动因素。一般来讲,风场的作用可分解为风速和风向两个要素,分析过程中,须将风速值转化为垂直于线路走向的分量值,即垂直风速值。为简化表述,后续提及的“风速”均代表垂直风速。

2)覆冰因素。诱发导线舞动所需要的覆冰因素,一般强调偏心厚度特征,进而明确其气动外形引起的气动力效应。然而,由于含液滴空气流场与导线表面复杂的热-流-力场耦合效应,是舞动诱发过程展现出强非线性特征的原因之一。

基于前期大量试验数据和理论成果,可将这种复杂的耦合影响机制,简化为风场对偏心覆冰导线的单向作用。此时,对偏心覆冰的定量描述,可以简化为覆冰截面形状和覆冰厚度两类关键参数,常见偏心覆冰截面形状和特征厚度如图1所示,图中, d 为覆冰特征厚度。

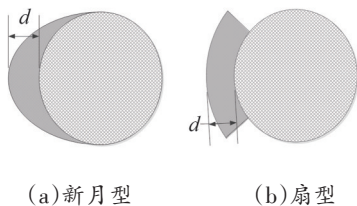


图1 常见的偏心覆冰截面形状和特征厚度

Fig.1 Common eccentric ice section shape and characteristic thickness

需要注意的是,此处的覆冰厚度,是偏心覆冰的

特征厚度,非冰区图中的等值覆冰厚度,但前者可基于后者换算得到。

1.3 判据方法

判断诱发舞动的条件,是舞动诱发机理研究关注的重要内容之一。诱发机理研究已持续了百年,是舞动防治领域的重要基础性成果之一^[25]。总结现阶段主要机理内涵和判据方法,阐述如下。

1)Den Hartog 机理。

Den Hartog 机理主要揭示了覆冰导线垂直方向出现自激振动原因。偏心覆冰导线在风场作用下,垂向自由度出现气动负阻尼,进而诱发舞动^[25]。其中关键参数——垂直方向的气动负阻尼的判断公式为

$$2m\delta_y\omega_y + \frac{1}{2}\rho U D \left(\frac{\partial C_L}{\partial \theta} + C_D \right) < 0 \quad (1)$$

式中: m 为导线单位长度质量,kg; δ_y 为导线纵向阻尼比系数; ω_y 为导线纵向自由度固有圆频率, π/s ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; U 为风速, m/s ; D 为导线外径, m ; C_L 和 C_D 分别为不同偏心覆冰截面下,导线所受的气动升力和阻力系数,取值方法和案例参见文献[5]或[6]; θ 为风攻角, $^\circ$ 。

2)Nigol 机理。

Nigol 机理旨在揭示舞动扭转特征的机理。覆冰导线在风场作用下,扭转自由度出现负阻尼,且与垂向自由度固有频率一致,进而诱发舞动^[25]。其中判断参数——扭转方向的气动负阻尼的判断公式为

$$2I\delta_t\omega_t + \frac{1}{2}\rho U^2 D^2 \frac{\partial C_M}{\partial \theta} \frac{D}{2U} < 0 \quad (2)$$

式中: I 为导线截面的转动惯量, $kg \cdot m^2$; δ_t 为导线扭转阻尼比系数; ω_t 为导线纵向自由度固有圆频率, π/s ; C_M 为不同偏心覆冰下,导线所受的气动扭矩系数,取值方法和案例参见文献[5]或[6]。

3)偏心惯性耦合机理。

偏心惯性耦合机理的内涵为:导线背风面出现偏心覆冰后,风速的扰动引起攻角变化,使相应的气动升力对横向振动形成正反馈,不断加剧后者,振动能量逐渐增大,诱发导线失稳^[25]。

4)稳定性机理和内共振失稳机理。

利用稳定性机理来判断覆冰导线是否发生舞动的核心方法,是Routh-Hurwitz判据^[10]。内共振失稳

机理是在此基础上,根据导线3自由度耦合舞动方程,解耦降维得到的平均方程来判断。二者的内涵分别是偏心覆冰和大风共同作用下,导线耦合系统整体出现线性或非线形动力学失稳。

综合考虑式(1)和式(2)以及其他机理所表示的舞动诱发关键要素可知,虽然上述几种机理各有特点,但存在共同点,即舞动是架空导线在特定风场和偏心覆冰共同作用下激发的振动现象。因此,提出舞动风险定量评价方法,将选取二者作为主要维度,明确其变化与舞动特征变化的映射关系,在此基础上构建定量评价模型。

2 定量评价方法

根据现有风区、冰区和舞动分布图,在舞动特征研究方法基础上,提出统计加权方法,用数值来直观地量化舞动风险。

2.1 现有手段梳理

新建线路路径规划或在运线路改造段确定后,可查询最新舞动分布图,来明确防舞方案的必要性。然后,再参考所在的风区和冰区分布等级,来明确风速值区间和冰厚区间两个条件。最后,即可采用下述方法之一和多重结合,分析不同风速和冰厚组合工况下,线路是否发生舞动。

1)机理方法:依据 Den Hartog、Nigol 或者稳定性机理等理论判断方法和计算公式,明确是否诱发失稳。

2)近似计算:利用近似解析和数值仿真方法,计算舞动响应幅值情况,明确是否发生非线性失稳。

3)试验测试:利用风洞试验或真型线路方法,测试不同风速工况下,试验导线模型的舞动幅值响应情况。

3种方法需要考虑的输入条件基本相同,唯一区别是输出结果的颗粒度有所不同(一般来说,这3种方法所得结论颗粒度之间,存在图2所示的包容性关系)。例如,机理方法只能通过经验公式判断是否发生舞动,但剧烈程度无法获悉;近似计算可以给出幅值、频率、起舞风速和模态;而试验方法,可以在解析方法基础上,进一步得出具体的动态张力波动情况。

总体来讲,不论利用上述何种方法来分析评估

线路舞动特征,最终得到的结果可以简单分“是”和“否”舞动两种情况。需要说明的是,本文后续部分,把是否舞动的判断标准默认设为舞动幅值是否为0。实际工作中,也可根据实际需要,设为其他阈值,如0.5 m或1 m。低于此阈值,则可理解为无危害轻微舞动。

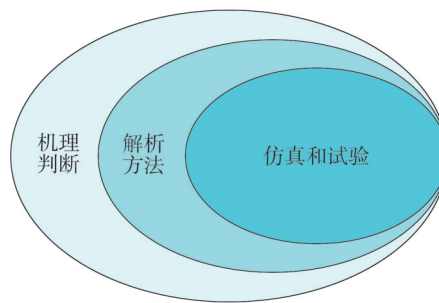


图2 三种分析方法关系

Fig.2 Relationship among three analysis methods

2.2 加权取值设定

以风速值为横坐标(可根据线路所在区域查询风区图来得到,此处选择常见的0~27 m/s为例),以覆冰厚度区间为纵坐标(需要结合冰区图和运维经验来决定,根据以往观测数据,诱发舞动的覆冰厚度一般 ≤ 30 mm。覆冰过大,会导致导线重量、气动阻力和黏滞阻尼大幅增大,舞动诱发条件被破坏)来考虑这两个关键性的定量条件,构建基本的坐标系,如图3所示。再考虑典型覆冰截面形状(以图1所示截面类型之一,新月形为例)来对分析结果进行统一展示和取值。以文献[6]为例,利用图3所示典型计算流程图,得到不同冰厚和风速下的舞动包络线及分布区间。

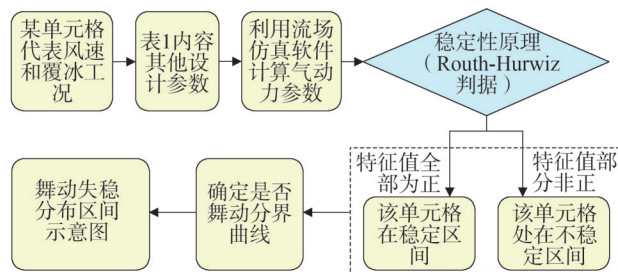


图3 典型计算流程图

Fig.3 Typical calculation flowchart

图4为舞动失稳分布区间示例图。图4中抛物线框内区域,代表舞动诱发工况集合,即包络线内部点对应的冰厚和风速组合工况,全部可诱发舞动;外部为不发生舞动。此处覆冰厚度和风速取值间隔分别为2 mm和1 m/s。之后,参考面域积分方法,对包络区域进行计数和积分。

图4所示的包络线,是根据历史案例及线路运行实际情况,选取图1新月形截面计算得到的包络线,也可选取2~3种或更多截面,选取几种的并集来绘制包络线。

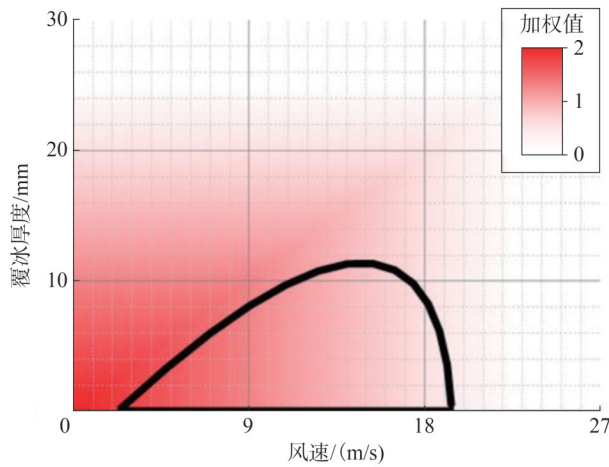


图4 舞动失稳分布区间示例图

Fig.4 Schematic diagram of the distribution range of galloping

进一步需要注意的是,对于各地实际运行环境来说,较低风速(如 ≤ 10 m/s)、较小厚度的覆冰(如 ≤ 10 mm)出现时段相对较多,寒潮天气下耦合出现的风险也更大,同时较小的风速和较小厚度的覆冰耦合诱发舞动的防治必要性也更大。因此,图5所示各个单元格代表的加权值应差异化取值。如1号、2号和3号方框所代表的面积加权值应具有以下关系 $S_{e,1} > S_{e,2} > S_{e,1}$,此时计算得到的舞动风险大小,才更具实际指导价值。

此时,再引入加权因子 ε ,需要说明的是,冰厚和风速共同决定加权值大小,如图5所示。首先,根据运维经验,由于较大冰厚或风速耦合诱发舞动的风险较低,因此从舞动故障工况考虑设防的必要性相对较低(主要是冰或风载荷超标等其他故障),因此,可人为设定加权因子下限 $\varepsilon_{\min} = 0$,对应考察风速区

间上限27 m/s以及覆冰厚度区间上限30 mm的组合工况;反之,较小冰厚和风速更容易出现,诱发舞动的风险也更大,因此,可设定加权因子上限 $\varepsilon_{\max} = 2$,对应风速和冰厚二者均为数值接近0的组合工况;最后,加权因子中值 $\varepsilon_{\text{mid}} = 1$,对应历史舞动案例中,风速(或冰厚)分布概率极大值50%时,风速(或冰厚)数值。因此,设定加权因子 ε 取值区间为 $[0, 2]$ 。

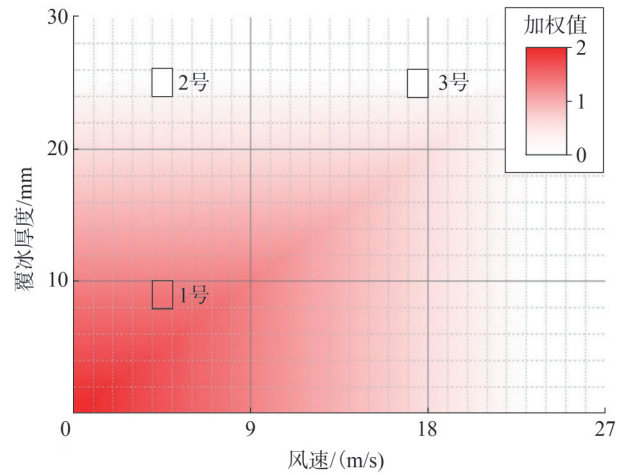


图5 单位面积加权值分布示例

Fig.5 Example of weighted values distribution for unit areas

加权因子取值如图6所示。图6中红色曲线为根据历史风速(或冰厚)概率密度分布示意图。曲线最高点对应最大概率 μ_{peak} ,峰值点右侧存在半峰值点 $\mu_{n1} = 0.5\mu_{\text{peak}}$,对应加权因子中值 $\varepsilon = 1$;对应的横轴坐标即为对应的风速(或冰厚)中值 u_n (或 d_n)。

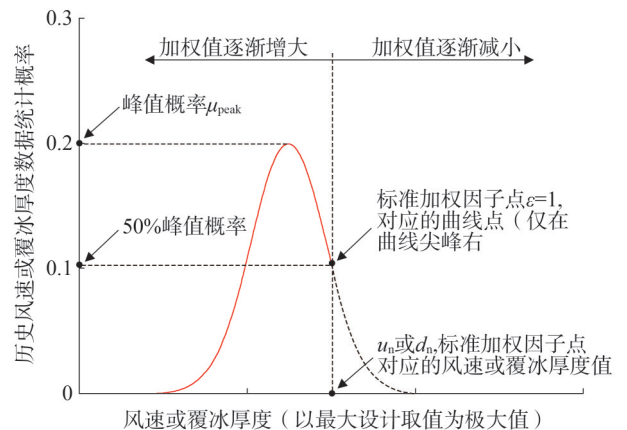


图6 加权因子取值示意图

Fig.6 Schematic diagram of weighting factor values

2.3 加权计算方法

根据上文所述内容,图5中各个单位面积对应的加权值可按照式(3)计算。

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.5\left(\frac{u}{u_n} + \frac{d}{d_n}\right), u \in [0, u_n) \text{ 或 } d \in [0, d_n) \\ 1, u = u_n \text{ 且 } d = d_n \\ 0.5\left(\frac{u - u_n}{27 - u_n} + \frac{d - d_n}{0.3 - d_n}\right), u \in (u_n, 27] \text{ 或 } d \in (d_n, 0.3] \end{cases} \quad (3)$$

式中: u 为风速, m/s。

根据上述计算方法明确各单元格的加权值,再累计为舞动区域加权积分,得到风险评估值,面积加权值计算公式为

$$S = \sum \varepsilon e \quad (4)$$

式中: e 为单位面积大小,单位为图5横纵坐标轴变量单位的乘积,此处可取 $\text{mm} \cdot \text{m/s}$ 。因此,图5中 $e = 2 \times 1 = 2(\text{mm} \cdot \text{m/s})$ 。1号、2号和3号三个单元格中,面积加权值 S_e 计算如式(5)所示。

$$\begin{cases} S_{e,1} = 2 \times 1.88 = 3.76(\text{mm} \cdot \text{m/s}) \\ S_{e,2} = 2 \times 0.94 = 1.88(\text{mm} \cdot \text{m/s}) \\ S_{e,3} = 2 \times 0.89 = 1.78(\text{mm} \cdot \text{m/s}) \end{cases} \quad (5)$$

从而,可得到线路在不同类型偏心覆冰截面下的舞动风险值 $R_{\text{ice-type}}$ 为

$$R_{\text{ice-type}} = \frac{S_G}{S_{\text{all}}} \quad (6)$$

式中:下角标 ice-type 代表覆冰类型; S_{all} 为风速和冰厚考察区间内全体面积加权值,单位与 e 一致,此处为 $\text{mm} \cdot \text{m/s}$; S_G 为全部舞动单元格面积加权值之和,单位与 e 一致,此处为 $\text{mm} \cdot \text{m/s}$ 。当3种类型或更多类型覆冰下的风险值均确定时,可取其中的中值,作为线路自身的舞动风险评估值。 $R_{\text{ice-type}}$ 单位为1。

同样,对于计划采用防舞器的线路段,分别计算加装前后的舞动风险值 R ,对比差异,即可明确防舞装置的有效性。例如,假装之前舞动风险评估值 $R_f = 0.8$,加装之后,舞动风险评估值变为 $R_a = 0.2$,则其防舞效果评价结果,可定量判断为加权值 E (单位1),计算方式为

$$E = R_f - R_a = 0.8 - 0.2 = 0.6 \quad (7)$$

3 评价案例

近年来,随着气候变暖趋势加剧,以覆冰舞动为主要故障形式的雨雪冰冻灾害,呈现出增多、增强趋势,部分历史上的非舞动易发区也面临严峻的防舞形式。2022年1月以前,江苏地区从未发生舞动故障,之后的2年间,110 kV至500 kV线路多次出现舞动故障,因此大量线路段急需防舞技术改造。以某档500 kV线路为例,其线路参数如表2所示(未述及参数可参考500 kV典型设计案例来取值确定)。

表2 线路结构参数

Table 2 Line structure parameters

参数	取值
电压等级/kV	500
导线分裂数及型号	4×LJ-400/35
分裂间距/mm	450
跨度、高差/m	420、0

查询相关资料,该线路所在舞动区为1级,目前未采取任何防舞措施;冰区为5~10 mm等级,线路设计冰厚为5 mm,这算为偏心冰厚最大可为29.2 mm,取整为30 mm;风区为沿海较大风区,为27 m/s等级。根据统计分析,加权因子 $\varepsilon = 1$ 对应的风速、覆冰厚度取值 $u_n = 10.8 \text{ mm}$ 和 $d_n = 12.6 \text{ mm}$ 。

再利用2.1小结所列举的计算方法,分析得到典型覆冰截面类型下,该线路段舞动最大幅值情况,并叠加到加权等值厚度区间,结果见图7实线;再考虑参照文献[3]加装双摆防舞器方案,包络线可变为图7虚线。

根据加权计算,可得到加装防舞装置前后,舞动风险加权值的变化如式(8)所示。

$$\begin{cases} R_f = 0.65 \\ R_a = 0.21 \\ E = 0.65 - 0.21 = 0.44 \end{cases} \quad (8)$$

可以看出,未加装防舞装置时,该线路面临的一定舞动风险,尤其是5~19 m/s的风速以及0~17 mm覆冰厚度。加装防舞装置后,该线路舞动风险加权值可降低0.44,起到较好的防舞效果。

此外,根据理论计算和试验评估经验,在采用

2.1 小节进行计算时,可采用加密覆冰厚度和风速取值间隔的形式,来提高计算精度,让分析结论更为精细和丰富,提升结果的参考性。

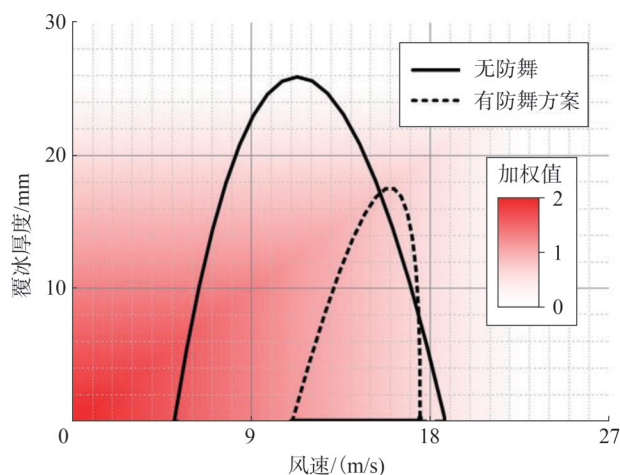


图7 舞动加权值计算

Fig.7 Calculation of galloping weighted values

4 结论

在综合考虑舞动区、风区、冰区等设计工况与舞动风险的整体关联关系基础上,提出了一种舞动风险数值的定量评价方法,并得到如下结论:

1)将舞动诱发的两个关键外部因素偏心覆冰和风场作用,进行量化整合,结合现有的舞动诱发判据,将线路在覆冰厚度以及风速条件下的舞动失稳分布情况,利用覆冰厚度以及风速条件两个维度,进行统计加权,明确了定量评价的主要原则和思路。

2)结合线路实际运行气象环境特点,引入加权因子,根据风速和冰厚数值对其数值进行区别化赋值分析,可更加合理地求出舞动失稳区间对应的风险值,充分体现不同线路区段舞动风险和防舞措施有效性定量评估因素考量及结果差异。

3)以线路舞动风险值为基础,针对不同防舞措施,给出定量评价的应用思路、方法和结果,对线路舞动风险进行综合估算,为防舞工作提供参考。

参考文献

[1] 赵彬,刘彬,朱宽军.电网舞动灾害应对技术体系研究综述[J].四川电力技术,2022,45(6):22-30.
ZHAO Bin, LIU Bin, ZHU Kuanjun. A research review on technical response system to galloping of power grid [J]. Sichuan Electric

Power Technology, 2022, 45(6): 22-30.

- [2] 窦婷婷,李子扬,陈仁刚,等.架空输电线路防舞设计关键问题探讨[J].山东电力技术,2020,47(11):57-61.
DOU Tingting, LI Ziyang, CHEN Rengang, et al. Discussion on key problems of anti-galloping design for overhead transmission lines [J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(11): 57-61.
- [3] 赵书杰,杨晓辉,张希希,等.基于载荷等效的相间间隔棒舞动承载测试系统[J].山东电力技术,2018,45(10):1-6.
ZHAO Shujie, YANG Xiaohui, ZHANG Xixi, et al. Test system for simulating the galloping load of interphase spacers based on load equivalence [J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(10): 1-6.
- [4] 王星涵,颜京忠,王茂成,等.相间间隔棒的防振与防舞弹簧阻尼装置[J].山东电力技术,2018,45(7):39-43.
WANG Xinghan, YAN Jingzhong, WANG Maocheng, et al. Anti-vibrator and anti-galloping spring damper of phase-to-phase spacer [J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(7): 39-43.
- [5] 黄宇辰,李昉,刘敬华,等.特高压输电线路双摆防舞器结构参数优化研究[J].机械设计,2022,39(3):109-116.
HUANG Yuchen, LI Fang, LIU Jinghua, et al. Study on optimization of the structure parameters of the double-pendulum anti-galloping device for the UHV transmission line [J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(3): 109-116.
- [6] 商全鸿,赵彬.架空输电线路防舞器排布方案效果评估技术研究[J].中国电力,2017,50(5):121-125.
SHANG Quanhong, ZHAO Bin. Research on performance evaluation technology of anti-galloping fittings in overhead transmission lines [J]. Electric Power, 2017, 50(5): 121-125.
- [7] 翟彬,明志舒,陶喜胜.山东电网500 kV输电线路防覆冰舞动治理[J].山东电力技术,2013,40(5):9-12.
ZHAI Bin, MING Zhishu, TAO Xisheng. Icing cover and anti-waving management of 500 kV transmission lines in Shandong power grid [J]. Shandong Electric Power, 2013, 40(5): 9-12.
- [8] 刘洪正,乔耀华,杨立超.山东500 kV电网线路舞动分析及治理[J].山东电力技术,2011,38(3):1-8.
LIU Hongzheng, QIAO Yaohua, YANG Lichao. Analysis and treatment for galloping of 500 kV transmission lines in Shandong power grid [J]. Shandong Electric Power, 2011, 38(3): 1-8.
- [9] 程学启,郎需军,姚元玺,等.山东电网500 kV输电线路舞动治理新型子导线间隔棒的设计及应用[J].山东电力技术,2011,38(2):1-4.
CHENG Xueqi, LANG Xujun, YAO Yuanxi, et al. The design and application of a new type of sub-conductor spacer in galloping treatment of 500 kV transmission lines in Shandong power grid [J]. Shandong Electric Power, 2011, 38(2): 1-4.
- [10] 张谦.输电线路导线舞动的防治及研究[J].山东电力技术,2010,37(2):26-30.
ZHANG Qian. Precaution and study on galloping of transmission lines [J]. Shandong Electric Power, 2010, 37(2): 26-30.

- [11] 梁允,陈浩,何晓凤,等.河南输电线路舞动气象风险的可预报性分析[J].科学技术与工程,2022,22(12):4739-4745.
LIANG Yun, CHEN Hao, HE Xiaofeng, et al. Analysis of predictability for meteorological risk of line galloping prediction in Henan Province[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12):4739-4745.
- [12] 李清,杨晓辉,刘振声,等.基于灰色聚类分析的输电线路舞动分级预警方案[J].电测与仪表,2020,57(17):45-51.
LI Qing, YANG Xiaohui, LIU Zhensheng, et al. Graded warning scheme of transmission line galloping based on grey clustering analysis [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(17):45-51.
- [13] 褚双伟,熊小伏,刘善峰,等.计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估[J].电力系统保护与控制,2018,46(9):86-93.
CHU Shuangwei, XIONG Xiaofu, LIU Shanfeng, et al. Short-term risk assessment of power grid considering galloping prediction of transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9):86-93.
- [14] 廖峥.基于BP神经网络的输电线路舞动预测及电网风险预警方法[D].重庆:重庆大学,2017.
- [15] 徐文宝.基于电网危控区的风险态势预警研究与应用[D].南京:东南大学,2021.
- [16] 李鑫,盛雨秋,朱可凡,等.基于梯度提升树的覆冰条件下线路跳闸风险评估[J].电工技术,2021(19):27-29.
LI Xin, SHENG Yuqiu, ZHU Kefan, et al. Risk assessment of line trip under icing condition based on gradient boosting decision tree [J]. Electric Engineering, 2021(19):27-29.
- [17] 朱墨.冰灾条件下的输电系统风险评估研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [18] 陈立征.考虑极端气象事件的电力系统风险评估[D].济南:山东大学,2018.
- [19] 李军辉,程永锋,龚坚刚,等.气象地理法在舞动分布图绘制中的改进与应用[J].中国电力,2015,48(4):121-126.
LI Junhui, CHENG Yongfeng, GONG Jiangang, et al. Improvement and application on the meteorological geographical method in the drawing of galloping region distribution map [J]. Electric Power, 2015, 48(4):121-126.
- [20] 国家电网公司.国家电网公司电网舞动区分布图(2021版)[R].北京:国家电网公司,2021.
- [21] 杨加伦,朱宽军,刘彬,等.输电线路冰区分布图绘制关键技术[J].电力建设,2013,34(9):31-36.
YANG Jialun, ZHU Kuanjun, LIU Bin, et al. Technologies of icing distribution map for power transmission line [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(9):31-36.
- [22] 李永胜,杨加伦,郑维刚,等.辽宁省特定重现期舞动区域分布图绘制[J].中国电力,2022,55(8):129-134.
LI Yongsheng, YANG Jialun, ZHENG Weigang, et al. Draw a distribution map of galloping areas with specific recurrence periods in Liaoning Province [J]. Electric Power, 2022, 55(8):129-134.
- [23] 朱宽军.输电线路舞动机理及防治研究[D].华北电力大学,北京:华北电力大学,2019.
- [24] 汉京善,吕海平,李丹煜,等.基于GA-BP神经网络算法的输电线路舞动预警方法[J].电网与清洁能源,2021,37(4):1-7.
HAN Jingshan, Lü Haiping, LI Danyu, et al. Prediction of transmission line galloping using improved BP neural network based on genetic algorithm [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(4):1-7.
- [25] 程永锋,汉京善,刘彬,等.基于Bagging算法构造强分类器的one class SVM导线舞动预测应用[J].振动与冲击,2020,39(9):152-158.
CHENG Yongfeng, HAN Jingshan, LIU Bin, et al. Prediction of transmission line galloping by one class SVM based on the bagging algorithm for constructing a strong classifier [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(9):152-158.

收稿日期:2024-06-03

修回日期:2024-10-30

作者简介:

何勇军(1974),男,硕士,高级工程师,从事电网建设土建施工技术研究工作;

孙国磊(1980),男,高级工程师,从事电网建设技术研究工作;

张 斌(1979),男,高级工程师,从事电网建设技术研究工作;

赵 彬(1987),通信作者(zhaobin@epri.sgcc.com.cn),男,博士,高级工程师,从事输电线路防灾减灾技术研究工作;

程 剑(1981),男,高级工程师,从事电网建设技术研究工作。

(责任编辑 姜婷婷)

青年技能日



技能照亮前程

2025年7月15日是第十一个世界青年技能日



关注《山东电力技术》