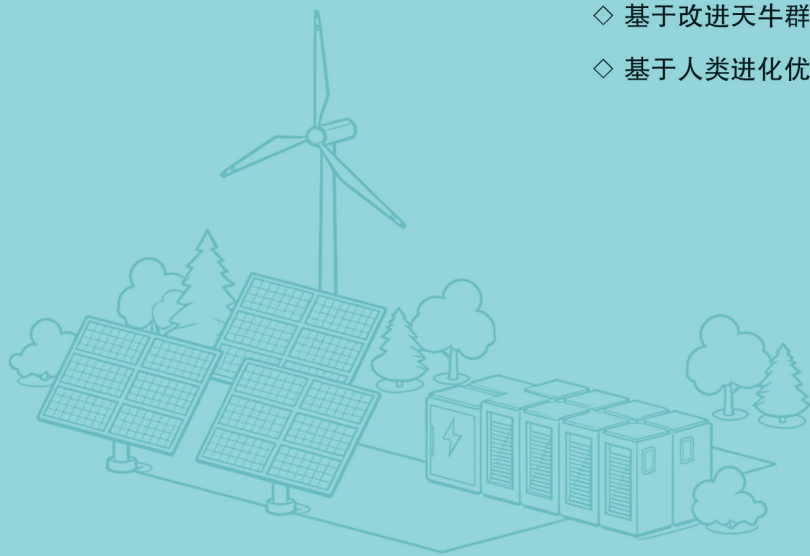


山东电力技术

SHANDONG ELECTRIC POWER

- ◇ 氢燃料电池自驱动散热系统设计及性能探究
- ◇ 基于 CVTs 空间划分的主动配电网有功无功协调优化
- ◇ 基于改进天牛群优化 ESN 的海上风机叶片腐蚀速率预测
- ◇ 基于人类进化优化算法的混合光伏 - 温差系统最大功率点跟踪



2026.1

第53卷
2026年1月

国网山东省电力公司主办

ISSN 1007-9904



山东电力技术
SHANDONG ELECTRIC POWER

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
美国《乌利希国际期刊指南》收录期刊
瑞典开放获取期刊目录(DOAJ)收录期刊
美国 EBSCO 学术数据库收录期刊

山东电力技术

SHANDONG DIANLI JISHU

(月刊)

1974年创刊 2026年第1期
第53卷(总第338期)
2026年1月25日出版

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

《山东电力技术》编辑委员会

顾问: 陈维江 郑建华 侯保荣 雷清泉 王成山

主任: 孙岗

副主任: 王伟胜 吴文传 刘玉田 陈志勇 慕世友
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: 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*120*zh*P* ¥18.00*6000*11*2026-1*n

《山东电力技术》连续入选 中国科技核心期刊



特约 专栏主编简介



时玮，男，工学博士，北京交通大学研究员，博士生导师。本科、硕士和博士毕业于北京交通大学，获得机械电子工程硕士学位和电气工程博士学位，目前兼任北京资源强制回收环保产业技术创新战略联盟专家委员。主持经费超过 2800 万元，发表论文 50 多篇，授权发明专利 13 项。获评江苏省 333 高层次人才称号，第一完成人获评中国发明协会创新成果奖二等奖，第三完成人获评中国安全生产协会二等奖。长期从事电池管理、储能系统以及充电站等关键技术的研发，在超高比能动力电池成组应用方面积累了丰富的经验，得到了行业内的广泛认可，成果产业化效果显著。



特约主编寄语

在新能源发电领域，化学储能系统受到越来越多的重视，这使得以锂离子电池为代表的二次电池技术成为了备受瞩目的研究方向。储能应用场景下，电池系统长期运行导致的容量衰退、一致性恶化、电极材料损失等故障是引发性能衰退和安全事故的主要原因，而电池管理系统只能通过采集电池的电压、电流和温度信息等表象判断电池状态，难以挖掘电池潜在故障特征，更无法对故障进行溯源。因此，如何通过用户侧储能运行工况特点，归纳常见故障类型和故障特征，提取表征电池故障的特征参量，实现故障识别和故障溯源，是用户侧储能安全保障的关键点和难点之一。本专辑收集论文 3 篇，内容涉及氢燃料电池自驱动散热系统设计及性能探究、高海拔地区巡检无人机动力电池热特性分析及热管理策略研究、储能单元功率分配优化等方面，用以解决电化学储能类型多及场景复杂带来的故障与安全问题，推动技术创新和交流。

目次

高安全储能电池管理技术

- 氢燃料电池自驱动散热系统设计及性能探究 柳洋,陈岩,辛公明,张彤,张友刚,申孝民(1)
- 高海拔地区巡检无人机动力电池热特性分析及热管理策略研究
..... 杨启明,沈雷雷,窦炳麟,许若凡,金炳辉(11)
- 考虑能量效率与状态参数均衡的储能单元功率分配优化方法
..... 徐越飞,吴非斐,陈云龙,沈景贵,李江涛,李知艺(25)

配电网

- 基于CVTs空间划分的主动配电网有功无功协调优化 李彬,崔玮晋,张凯伯(37)
- 面向极端灾害的配-微电网两阶段协同优化运行策略 梁伟宸,马鑫晟,李焯,吴盈,孙嘉祖(47)
- 考虑配电网结构演化的光储充柔性互联规划方法 侯承昊,闫鹏飞,王启民,朱辉,陈亚潇(56)

人工智能

- 基于改进天牛群优化ESN的海上风机叶片腐蚀速率预测 舒征宇,黄启昀,张紫格,任冠臣,鲍刚(66)
- 基于人类进化优化算法的混合光伏-温差系统最大功率点跟踪 李鸿彪,郜登科,杨博(75)
- 基于模糊聚类和深度置信神经网络的燃煤机组NO_x浓度预测方法研究
..... 冯林魁,冯焱飞,卢可,谢生璐,刘科(88)

电网运行与控制

- 基于模型预测控制算法的孤网分布式电压二次控制策略 蔡紫璇,刘毅力,仇继扬,张艳丽,兰丹阳(98)
- 基于梯形积分的储能型模块化多电平变流器等值建模 汪志强,刘邦金,吴斌,张敏,张乃文(109)

CONTENTS

• Management of High Safety Energy Storage Battery •

Design and Investigation of the Performance of a Self-driven Cooling System for Hydrogen Fuel Cells

..... LIU Yang, CHEN Yan, XIN Gongming, ZHANG Tong, ZHANG Yougang, SHEN Xiaomin(1)

Analysis of Thermal Characteristics and Thermal Management Strategy of UAV Power Batteries for Inspection in

High-altitude Area YANG Qiming, SHEN Leilei, Dou Binglin, XU Ruofan, JIN Binghui(11)

Optimization of Power Allocation for Energy Storage Units Considering Energy Efficiency and State Parameter

Equilibrium XU Yuefei, WU Feifei, CHEN Yunlong, SHEN Jinggui, LI Jiangtao, LI Zhiyi(25)

• Distribution Network •

Active and Reactive Power Coordination Optimization of Active Distribution Network Based on CVTs Spatial

Partitioning LI Bin, CUI Weijin, ZHANG Kaibo(37)

Two-stage Coordinated Optimal Operation Strategy for Distribution Network and Microgrid Under Extreme Disasters

..... LIANG Weichen, MA Xinsheng, LI Xuan, WU Ying, SUN Jiazu(47)

A Flexible Interconnection Planning Method for Photovoltaic, Energy Storage and Charging Considering the Structural

Evolution of the Distribution Network... HOU Chenghao, YAN Pengfei, WANG Qimin, ZHU Hui, CHEN Yaxiao(56)

• Artificial Intelligence •

Corrosion Rate Prediction of Offshore Wind Turbine Blade Based on ESN Optimized by BSO

..... SHU Zhengyu, HUANG Qiyun, ZHANG Zige, REN Guanchen, BAO Gang(66)

Maximum Power Point Tracking of Hybrid PV-TEG System via Human Evolutionary Optimization Algorithm

..... LI Hongbiao, GAO Dengke, YANG Bo(75)

Research on NO_x Concentration Prediction Method of Coal-fired Units Based on Fuzzy Clustering and Deep Belief

Neural Network FENG Linkui, FENG Yaofei, LU Ke, XIE Shenglu, LIU Ke(88)

• Power Grid Operation and Control •

Secondary Control Strategy of Isolated Grid Distributed Voltage Based on Model Predictive Control Algorithm

..... CAI Zixuan, LIU Yili, QIU Jiyang, ZHANG Yanli, LAN Danyang(98)

Equivalence for Modular Multilevel Converter With Energy Storage System Submodules Based on Trapezoidal

Integrals WANG Zhiqiang, LIU Bangjin, WU Bin, ZHANG Min, ZHANG Naiwen(109)

SHANDONG ELECTRIC POWER

(Monthly, Started in 1974)

Administration State Grid Shandong Electric Power Company

Sponsor State Grid Shandong Electric Power Company

Edited by Editorial Department of Shandong Electric Power

Chief Editor WU Wenchuan MENG Yu

Address No.2000, Wangyue Road, Jinan, China 250003

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250075

·高安全储能电池管理技术·

氢燃料电池自驱动散热系统设计及性能探究

柳 洋^{1,3}, 陈 岩², 辛公明², 张 彤⁴, 张友刚⁵, 申孝民^{1*}

(1. 山东省特种设备检验研究院集团有限公司, 山东 济南 250101; 2. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061;
3. 济南大学物理科学与技术学院, 山东 济南 250022; 4. 山东特检集团有限公司, 山东 济南 250000;
5. 海卓动力(青岛)能源科技有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要: 氢燃料电池的发展对实现清洁能源转型、减少碳排放和提高能源利用效率具有至关重要的作用, 是推动可持续发展的关键技术之一。氢燃料电池在设计温度范围内工作可以达到其最佳运行性能, 而高效的热管理系统则是控制电池运行温度在设计温度范围内的关键。因此, 在传统氢燃料电池结构的基础上, 在其内部添加强化换热的微通道结构, 并结合环路热管可以驱动流体工质在其内部循环的原理, 设计一种高效的自适应热管理系统, 通过实验验证该系统散热的可行性并初步实现了自适应散热。实验结果显示, 系统内产生了可以随热源功率增加而升高的流体工质循环流量, 电池中的微通道换热结构具有0.02 K/W的低换热热阻, 实现了最高约100 W的散热功率和30 W/cm²的散热热流密度。该系统同时结合了环路热管和微通道的高效换热特点, 并实现自驱动和自适应特性, 为氢燃料电池的节能、可靠且有效散热提供了新的思路。

关键词: 氢燃料电池; 环路热管; 微通道; 散热系统

中图分类号: TK172.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2026)01-0001-10

Design and Investigation of the Performance of a Self-driven Cooling System for Hydrogen Fuel Cells

LIU Yang^{1,3}, CHEN Yan², XIN Gongming², ZHANG Tong⁴, ZHANG Yougang⁵, SHEN Xiaomin^{1*}

(1. Shandong Special Equipment Inspection Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China;

2. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

3. School of Physics and Technology, University of Jinan, Jinan 250022, China;

4. Shandong Special Equipment Inspection and Testing Group Co., Ltd., Jinan 250000, China;

5. Haidriver (Qingdao) Energy Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

Abstract: The development of hydrogen fuel cells plays a crucial role in achieving the transition to clean energy, reducing carbon emissions, and improving energy efficiency. It is one of the key technologies driving sustainable development. Hydrogen fuel cells operate at their optimal performance within a specific temperature range, and an efficient thermal management system is essential to maintain the battery's operating temperature within this range. Therefore, a high-efficiency adaptive thermal management system based on the traditional hydrogen fuel cell structure is proposed in this paper. The system integrates a microchannel structure to enhance heat transfer within the cell and combines the principles of a loop heat pipe, which can drive the working fluid to circulate within. The experiments demonstrate the feasibility of the proposed system for heat dissipation and preliminarily realize adaptive heat dissipation. The experimental results show that the system generates a circulation flow of the working fluid that increases with the power of the heat source. The microchannel heat transfer structure in the cell exhibits a low thermal resistance of 0.02 K/W, achieving a maximum heat dissipation power of approximately 100 W and a heat flux density of 30 W/cm². The system combines the high-efficiency heat transfer characteristics of the loop heat pipe and microchannel, realizing self-driving and adaptive features, providing a new approach for energy-saving, reliable, and effective heat dissipation in hydrogen fuel cells.

Keywords: hydrogen fuel cell; loop heat pipe; microchannel; cooling system

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4004400); 山东省自然科学基金项目(ZR2023ME184); 国家开发投资集团有限公司科技项目(SDIC2023-06)。

National Key Research and Development Program of China (2022YFB4004400); General Program of Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2023ME184); SDIC Science and Technology Project (SDIC2023-06).

0 引言

氢气与氧气反应可以提供电能,副产品主要是水,几乎不产生二氧化碳或其他污染物,可以有效减少碳排放,因此氢能的利用是实现“双碳”目标的重要技术之一^[1-3]。同时,氢能的利用能够减少对化石能源的依赖,推动能源供应多元化,尤其是氢气可以通过可再生能源(如风能、太阳能)电解水制取^[4-5],这使得氢能成为一种具有战略意义的能源来源。氢能也可以作为一种有效的储能方式,将电能转化为氢气储存^[6-7],在电力需求高峰时释放出能量,解决可再生能源(如风能、太阳能)波动性和间歇性的问题^[8-9]。使用氢作为原料的发电装置被称为氢燃料电池^[10-11],可以直接将化学能转换为电能并释放热量,若实现了热电联供,氢燃料的总利用率可高达80%以上,远高于传统内燃机的工作效率^[12-14]。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)是最常见的氢燃料电池类型^[15-17],广泛应用于汽车、便携式设备和备用电源等领域。PEMFC的正常工作温度为60~100℃^[18-19],其正常工作的电效率通常在40%~60%,其余的氢能以热量的形式产生,热量在电池内的积聚会使运行温度升高,过高的温度会使电池内膜中的水分蒸发,导致膜失去部分水合,进而降低其导电性和机械强度,整个系统的运行稳定性会受到影响,可能出现性能不均匀、功率输出波动甚至失效等问题^[20-22]。因此,氢燃料电池需要散热系统带走燃料电池内大部分的热量,特别是在较高负载和长时间运行的情况下,以维持燃料电池的运行温度在适宜范围内^[23-26]。PEMFC的核心部分是电池堆,它由多个单体电池组成,每个单体电池都是由一层质子交换膜、两个电极和催化剂组成的。多个单体电池堆叠在一起,形成电池堆,以增加输出电压。目前,常用的液冷散热系统^[27]结构如图1所示,在两个单体电池堆叠后所形成的夹层中加工通道,并通入冷却流体带走各个单体电池所产生的热量并维持整个电池堆的运行温度恒定。

现阶段,对于液冷散热系统的研究方向主要集中在通道结构的优化^[28]以及冷却流体的选择^[29]。不合理的流道设计会导致流动阻力增大,使冷却流体在流道中的分布不够均匀,导致单体电池

某些区域散热不足,使电池堆内部局部温度升高,影响电池稳定性。同时,液冷散热系统的整体结构较为复杂,通常包括复杂的连接管路、机械泵以及换热器等,可能存在机械泵的失效和管路的泄漏导致散热可靠性的降低和制造维护成本的升高。复杂的散热系统也会使整个氢燃料电池系统体积增大,降低整套供电系统的集成度,限制了其应用范围。因此,研究中同时考虑了提升整个散热系统的可靠性和散热效率,基于环路热管驱动内部工质循环散热的工作原理^[30-31],使其作为一个既可以吸收热量又可以驱动工质流动“毛细泵”,驱动流体工质流入单体电池间的通道中进行散热,同时对流体通道进行了优化设计,采用高效的微通道结构以提升散热系统的散热效率^[32-34]。该散热系统设计一方面可以提升散热系统的散热效率,更重要的是,系统摆脱了机械泵的使用,获得了自驱动的特性,不存在因机械泵故障而导致整个散热系统失效的风险。

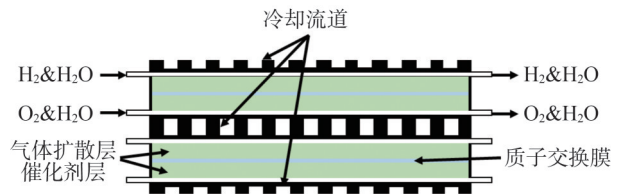


图1 氢燃料电池堆结构及其散热结构

Fig.1 Hydrogen fuel cell stack and its cooling structure

1 散热系统设计及实验系统搭建

1.1 氢燃料电池散热系统设计制造

基于如图2所示的环路热管原理,其蒸发器中的多孔介质毛细芯吸收来自热源的热量后,内部的液体工质发生相变,在多孔毛细芯内的孔隙中产生毛细力 ΔP_{cap} ,蒸汽沿着蒸汽管路进入冷凝器释放热量成为液体并沿着液体管路回到蒸发器,完成自驱动工质循环并将热量从热源传递至冷凝器完成散热。

设计如图3所示的针对氢燃料电池的自驱动散热系统,当电池工作产生热量后,系统中的蒸发器吸收热量并提供驱动蒸汽进入冷凝器释放热量,冷却后的低温液体工质进入各个单体电池层间的微通道流道中,吸收各个单体电池产生的热量并汇集到冷凝器中再次释放热量,回流至蒸发器以待重新吸收

热量并完成散热循环。

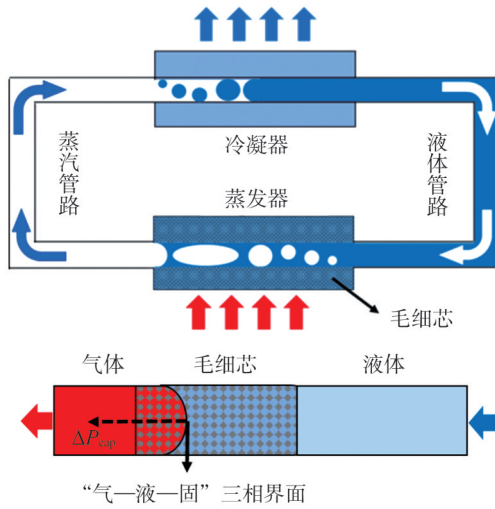


图2 环路热管运行原理

Fig.2 Operation principle of loop heat pipe

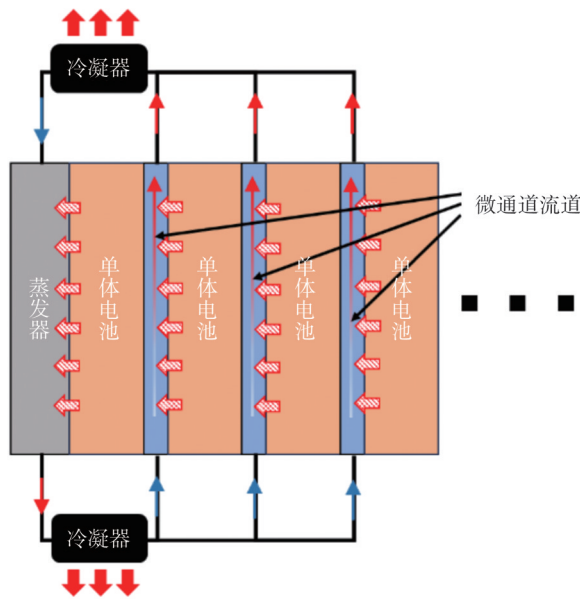


图3 自驱动燃料电池散热系统运行原理

Fig.3 Operating principle of self-driven fuel cell cooling system

基于此设计,以一个微通道结构流道为例,搭建如图4所示的散热系统,主要包括蒸发器、冷凝器和具有微通道结构流道的微通道模块。其中,蒸发器壳体为316L不锈钢材质,其内部包含由400目镍粉烧结而成的多孔介质毛细芯,蒸发器及其毛细芯的具体参数如表1所示。

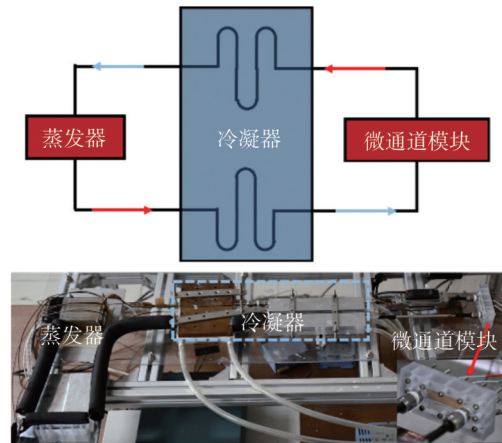


图4 自驱动散热系统结构

Fig.4 Self-driven cooling system structure

表1 蒸发器及其毛细芯参数

Table 1 Evaporator and its wick parameters

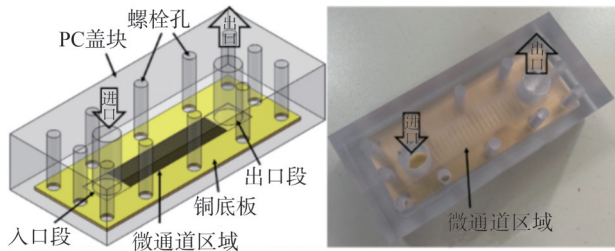
| 结构 | 参数 | 数值 |
|-------|---------------------|-----|
| 蒸发器外壳 | 长/mm | 120 |
| | 宽/mm | 80 |
| | 高/mm | 10 |
| | 壁厚/mm | 1 |
| 毛细芯 | 长/mm | 80 |
| | 宽/mm | 78 |
| | 高/mm | 8 |
| | 孔隙率/% | 60 |
| | 平均孔径/ μm | 4 |

通过化学蚀刻的方式在铜板上加工了流道以模拟冷却流体在单体电池间的流动换热过程,加工了无微通道 (none micro-channels, NMC) 结构流道、直微通道 (straight micro-channels, SMC) 结构流道和波浪形微通道 (wavy micro-channel, WMC) 结构流道 3 种形式的流道,在加工了流道的铜板上方覆盖透明的聚碳酸酯塑料 (polycarbonate plastic, PCP) 板并通过螺栓紧固,以观察通道内工质的流动换热状态并形成密封,微通道模块及其零部件具体结构如图5所示,整个模块及其零部件的具体参数如表2所示。WMC的通道中心线波形按照式(1)加工而成。

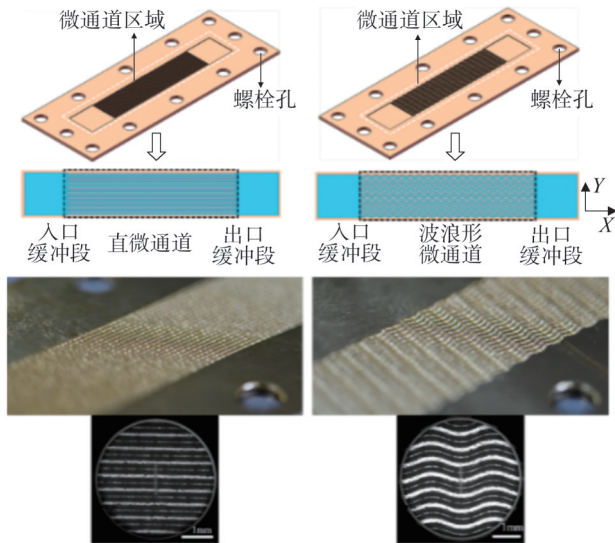
$$y = 0.26 \sin\left(2x + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

式中: x 为沿着流动方向通道中心线距入口的距离; y

为通道中心线的波动幅度。



(a)微通道模块



(b)微通道模块内部通道具体结构

图5 微通道模块及其内部通道具体结构

Fig.5 Microchannel module and its internal channel

表2 微通道模块及其零部件具体参数

Table 2 Microchannel module and its components specific parameters

| 结构 | 参数/单位 | 数值 |
|---------------|-------------------|-----|
| 微通道模块 | 长/mm | 90 |
| | 宽/mm | 40 |
| | 高/mm | 20 |
| 铜基板 | 长/mm | 80 |
| | 宽/mm | 30 |
| | 厚/mm | 1 |
| 微通道换热 通道区域 | 长/mm | 40 |
| | 宽/mm | 10 |
| | 深/ μm | 200 |
| 微通道 (单条) | 宽度/ μm | 250 |
| | 间隔/ μm | 200 |
| | 直通通道数/条 | 22 |
| | 波浪通道数/条 | 20 |

所设计系统中,通过内外径分别为 2 mm 和 3 mm 的退火 316L 不锈钢管将蒸发器与微通道模块相连,形成封闭系统。系统各部件连接完成后,需要对其进行密封性进行检验,确保其密封性后,对整个系统内进行抽真空和充液。为了防止系统内存在不凝结气体对工质的蒸发和冷凝过程产生影响,充液前系统内的压力值需控制在 $(5\pm 0.2)\times 10^{-4}$ Pa,抽真空完成后,向系统内充入冷却工质,充液量为 50 mL,占系统总体积的 80%。为进一步提升冷却系统的可靠性,防止冷却工质导电和腐蚀管路及电池堆,采用了 Noah-2100a 型的电子氟化液作为系统内的循环工质,其物性参数如表 3 所示,可以看到该工质具有较低的黏度、较高的表面张力和气化潜热,能够降低系统内工质的流动阻力,产生较大的毛细驱动力以及吸收和释放更多的热量。抽真空和充液完成后,整个自驱动散热系统搭建完成,可以对其可行性以及散热性能进行测试。

表3 Noah-2100a型电子氟化液物性参数

Table 3 Physical property parameters of Noah-2100a electronic fluorinated liquid

| 名称 | 数值 |
|--|-------|
| 沸点/ $^{\circ}\text{C}$ | 43 |
| 密度/(g/mL) | 1.601 |
| 比热(25 $^{\circ}\text{C}$)/(J/(g $\cdot^{\circ}\text{C}$)) | 1.279 |
| 热导率(25 $^{\circ}\text{C}$)/(W/(m $\cdot^{\circ}\text{C}$)) | 0.06 |
| 动力黏度(25 $^{\circ}\text{C}$)/(mm 2 /s) | 0.379 |
| 气化潜热/(J/g) | 93.22 |
| 表面张力/(mN/m) | 11.44 |

1.2 自驱动散热系统性能测试实验系统搭建

在所设计的自驱动散热系统性能进行测试前,需要搭建实验台模拟其正常的运行工况。实验台中,除了所设计的毛细泵驱动散热系统作为实验对象外,还应包括加热系统、冷却系统以及数据采集系统,如图 6 所示。加热系统目的是给蒸发器和微通道模块处提供热量以模拟单体电池发热,主要包括蒸发器处的热源、微通道模块处的热源以及给热源供电的电源。蒸发器处的热源为铜加热块,内部包含 3 根最大加热功率为 100 W 的加热棒,加热块的

加热面积为 $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$,热源面与加热块通过夹具紧密贴合,贴合面均匀涂抹导热硅脂以减少接触热阻。微通道模块处采用额定功率为 60 W 的陶瓷加热片作为热源,加热面积为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$,陶瓷加热片紧贴底部铜板的中心位置。

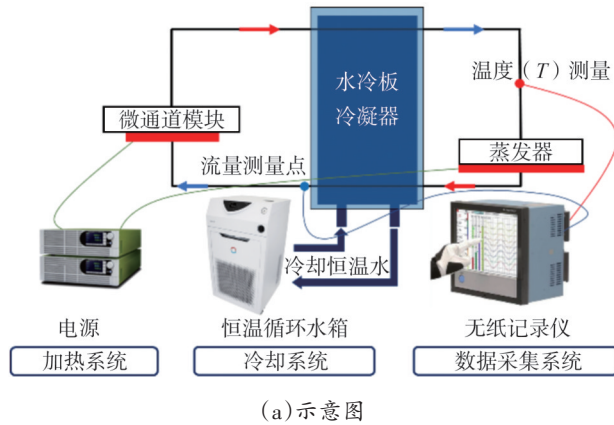


图6 散热系统性能测试实验台

Fig.6 Cooling system performance testing test bench

冷却系统的作用是持续不断的将冷凝器中的热量释放到实验系统外,保证实验对象系统的稳定运行。自驱动散热系统的冷凝器采用铝制水冷块的形式,水冷块表面开槽,将冷凝段管路使用夹板固定于水冷块表面的凹槽中。水冷块内部通入 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温循环水,以确保实验过程中,系统内冷凝段的最高温度不超过常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

数据采集系统主要采集了系统运行过程中,各个位置的温度 T 以及系统内循环流量 V 的大小。温度的测量采用 T 型热电偶,热电偶的布置如图 7 所示,依次布置为 T1—T18。本研究使用一种精确的超声波流量计对系统内的循环流量进行了测定,目的是为了证明环路热管及在其基础上所设计的毛细泵驱的散热系统,其内部确实产生了单向的液体循环,并对该数据进行测定,以掌握该系统的循环流量

的变化规律。选用超声波流量计测量流量的主要原因是为了减少流量计的使用对系统内工质流动的影响,同时也防止系统工质的泄漏,进一步提升系统在实验过程中的可靠性。为保证超声波流量计所测得流量数据的准确性,需要保证其所夹持管路内的工质均为液相。因此将超声波流量计布置于 T9 和 T10 两热电偶之间,该位置为冷凝段的出口,最高温度不超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且液体的温度一般保持在 $15\sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以保证所测流量数据的准确性。温度和流量数据的采集均使用了无纸记录仪(YOKOGAWA-GX20),每隔 0.5 s 进行一次数据的采集。

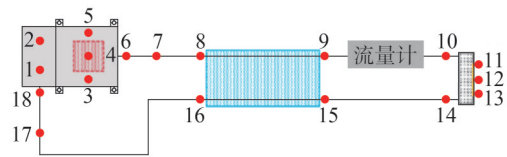


图7 热电偶及流量计布置位置示意图

Fig.7 Thermocouple and flowmeter layout diagram

1.3 实验实施过程及不确定度分析

散热系统封闭回路内工质循环的前提是蒸发器内工质相变产生毛细驱动力,因此在实验过程中,需要先对系统的蒸发器施加加热负荷,使系统完全启动,保证系统内部工质开始循环,然后才能对微通道模块施加加热负荷。在实验过程中,为了更加贴合质子交换膜氢燃料电池的散热背景并且保证实验的安全,最高温度设定在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

实验中的不确定度主要是由设备的系统误差引起的。恒温水箱的冷却水温度偏差 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,电源负载稳压器 $\pm 0.5\%$,热电偶测温误差 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,超声波流量计测量误差 $\pm 1\text{ mL/min}$ 。实验过程中,整个实验系统用厚度为 10 mm 的橡塑保温棉包裹,其导热系数为 $0.035\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。系统运行过程中的最大热损失计算为 1% 。最后,灌装量误差控制在 0.5 mL 以内。经计算,所有测量值和计算值的最大误差均小于 6% ,证明实验结果可信。

2 散热系统可行性验证及性能表征

2.1 散热可行性验证及自适应性表征

以波浪形微通道结构模块所在的散热系统为例,绘制了该系统在运行过程中温度 T 和流量 V 的

变化过程,如图8所示。图中, T_{CC} 为蒸发器后储液器温度(T_1 、 T_2 平均值), T_{Eva} 为蒸发器工作温度(T_3 、 T_4 、 T_5 平均值), T_{VL} 为蒸汽管路温度(T_6 、 T_7 平均值), T_{Condin} 为冷凝管路入口温度(T_8 、 T_5), T_{Cond} 为冷凝工质出口温度(T_9 、 T_{16}), T_{MCin} 为微通道模块工质入口温度(T_{10}), T_{MC} 为微通道模块的运行温度(T_{11} 、 T_{12} 、 T_{13} 平均值), T_{MCout} 为微通道模块内工质出口温度(T_{14})。从图中可以看出,冷凝器内管路的温度 T_{Condin} 、 T_{Cond} 维持恒定,证明其内部的工质可以完全被冷却,系统的散热量充足。蒸发器处的加热功率 Q_{Eva} 升高,其温度 T_{Eva} 升高并到达某一温度时,蒸发器出口温度 T_{VL} 突然升高,伴随着系统内产生循环流量 V ,系统中主要部件,包括蒸发器 T_{Eva} 及其后方的储液器 T_{CC} 和微通道模块 T_{MC} 在各个加热功率下均可以维持温度的恒定且低于 $100\text{ }^\circ\text{C}$,初步证明所设计的自驱动系统散热和控温的可行性。

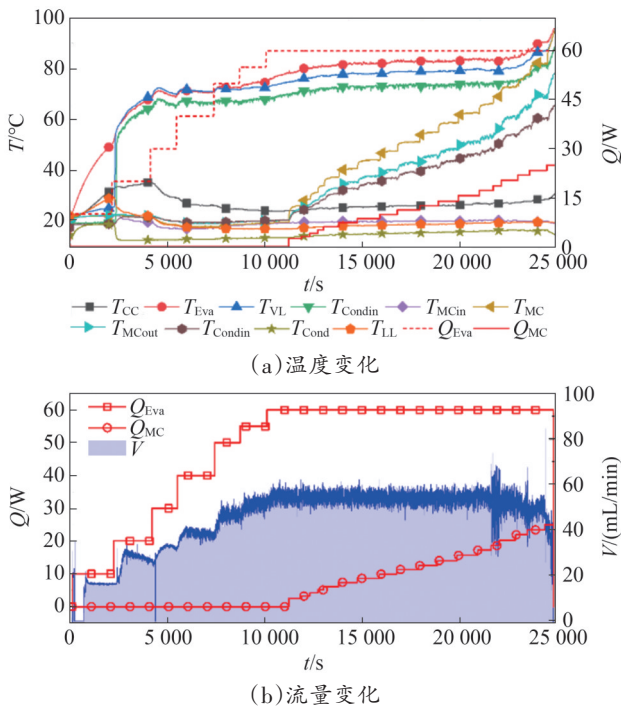


图8 系统运行过程温度及流量变化

Fig.8 Temperature and flow changes during system operation

同时,从图8中可以看到,随着蒸发器处的加热功率 Q_{Eva} 升高,系统中的循环流量 V 随之升高,流量升高理论上可以带走更多的热量,强化微通道模块处的换热效率。为证明该系统可以自适应热源发热

功率调整流量大小,从而提升散热能力,分析蒸发器散热量、微通道模块散热量以及系统内循环流量间的关系,如图9所示。

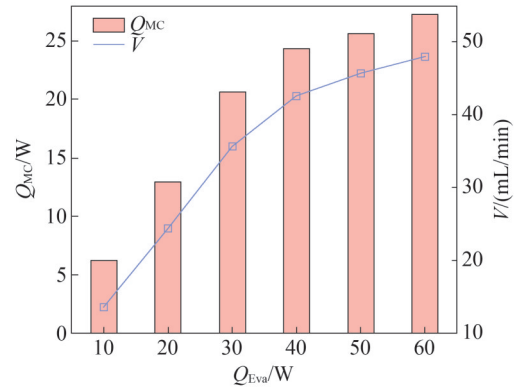


图9 系统散热能力自适应性

Fig.9 Adaptive characteristics of system cooling capacity

从图9中可以看到随着蒸发器处的散热功率 Q_{Eva} 由 10 W 提升至 60 W ,系统中的循环流量 V 由 10 mL/min 升高至 50 mL/min ,微通道模块处的散热功率也随之提升,由 5 W 提升至 28 W 左右,系统整体的散热量可以达到 100 W 左右。说明当氢燃料电池实际运行的功率升高,导致散热需求提升的情况下,系统中蒸发器所能提供的循环流量 V 可以随着散热对象的功率升高而升高,进而使系统中微通道模块处的热源加热功率 Q_{MC} 提升,并维持热源的温度处于安全运行温度之下。

根据蒸发器内多孔介质毛细芯所充当的“毛细泵”的运行原理,可以初步说明该系统自适应性散热特点产生的原因,当热源的功率提升后,毛细芯孔隙中的液体工质吸收更多的热量,液体相变量提升,更多的气体工质在冷凝管路中冷凝,提升了整个系统中的循环流量 V 并进入微通道模块中,使微通道处的换热效率提升,进而满足微通道模块处热源的散热需求。

2.2 微通道结构对散热性能的影响

研究中,对系统中微通道模块内的流道结构进行初步的改进,采用传统的直通道以及新型的波形通道对流道进行优化。通过图10对比不同结构微通道模块所在系统中的循环流量 V ,发现微通道结构的添加会使系统内的流体工质循环阻力升高,表现为图10中所示的微通道结构模块所在系统内

循环流量 V 的下降。同时,可以发现,具有波浪形微通道模块所在的系统,由于其流阻最大,因而其内部的循环流量最低。但是对比图 11 中 3 种流道的微通道模块的运行温度,可以看出,相对于内部无微通道结构的换热模块 NMC,添加微通道 SMC、WMC 后,其运行温度显著下降,说明微通道结构增大了流体与固体间的接触面积并有效强化了流道内的换热,虽然流体工质的流量下降,但是单位流体吸收的热量增多,仍然使模块的运行温度降低。

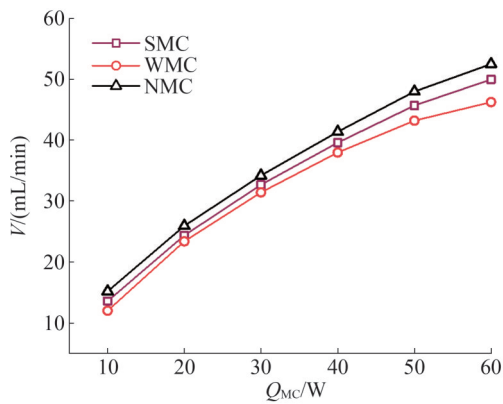


图 10 不同微通道结构系统中的循环流量
Fig.10 Circulation flow in systems with different microchannel structures

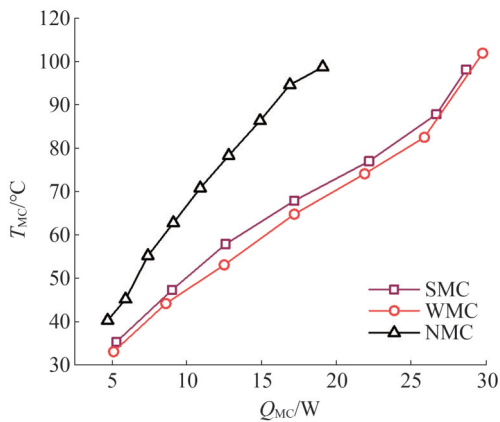


图 11 微通道优化后模块运行温度
Fig.11 Module operating temperature after microchannel optimization

WMC 相较于 SMC 所在模块,其运行温度 T_{Mc} 进一步降低,说明 WMC 不仅可以像 SMC 一样增加液体和固体接触面以强化换热,并且可以增加通道内

的流体扰动减少流固换热过程中热边界层的出现,进一步强化换热,按照式(2)计算其内部的换热热阻,从图 12 中可以看到 WMC 所在模块的内部换热热阻最低,最低可以达到 0.02 K/W。综合以上研究结论,系统中,蒸发器以外的换热模块中流道形式的改变会影响其内部的传热传质效率进而影响系统的整体的运行,因此,应该尽可能降低其内部的流动阻力以维持较高的系统内循环流量,同时具有能够提升换热能力的结构。

$$R = \frac{T_H - T_{Out}}{Q_{Mc}} \quad (2)$$

式中: R 为微通道内的换热热阻, K/W; T_H 为微通道模块内底部铜板温度 (T_{11} 、 T_{12} 、 T_{13}) 的平均值, $^{\circ}C$; T_{Out} 为微通道模块热流体出口温度 (T_{14}), $^{\circ}C$; Q_{Mc} 为热源的加热功率, W。

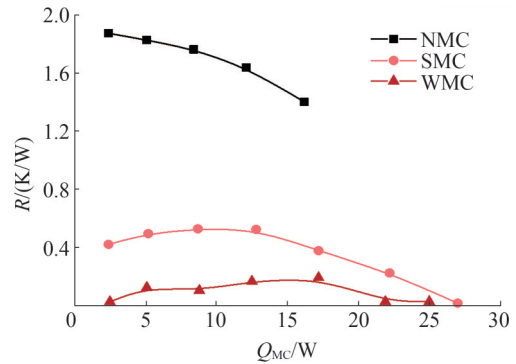


图 12 微通道流道内部换热热阻
Fig.12 Internal heat transfer resistance in microchannel flow passages

2.3 系统运行特性初步表征

从图 9 中可以看到,系统内的循环流量 V 会随着蒸发器处热源的功率升高而升高,当该功率不变的情况下,系统内的循环流量 V 可以维持恒定。随着微通道模块处的热源功率升高,微通道模块的工作温度升高并在达到某一温度后,系统中的温度 T 和循环流量 V 出现明显波动。此时通过透明的 PC 块观察模块流道内出现气泡,说明此时微通道模块内工质出现相变,发生流动沸腾现象。以波浪形微通道模块内工质发生流动沸腾前后为例,绘制系统运行温度 T 及其内部循环流量 V 的变化规律如图 13 所示。可以发现,微通道模块流道内工质发生相

变之后,内部流动阻力会明显升高,造成蒸发器的运行温度 T_{Eva} 升高和循环流量 V 降低,并且随着微通道模块处热源加热功率 Q_{MC} 升高,其内部工质相变量越大,该影响规律越为明显。

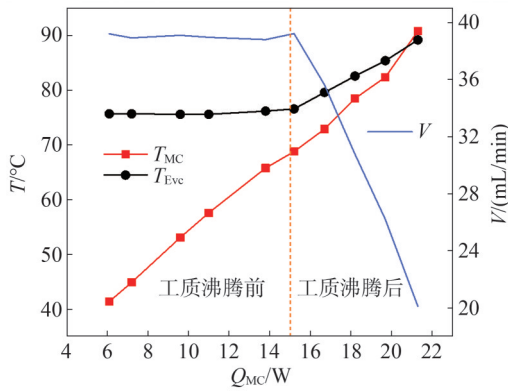


图 13 微通道模块内运行状态对系统影响

Fig.13 Impact of the operating status of the microchannel module on the system

图 14 对比了蒸发器散热功率相同 ($Q_{Eva}=40\text{ W}$) 的情况下,不同结构微通道内发生流动沸腾后,蒸发器温度升高及循环流量下降比例 (P_T, P_V)。可以发现,具有微通道结构 WMC、SMC 的系统,其微通道模块中发生流动沸腾后,蒸发器温度上升比例和系统内循环流量的下降比例较大,并且前文中换热性能较好的 WMC 发生流动沸腾后,对系统正常运行的不利影响更加明显。

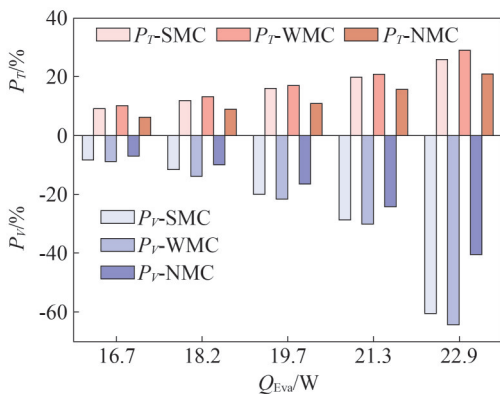


图 14 不同结构微通道内工质相变对系统运行影响

Fig.14 Effect of working fluid phase transition in microchannels with different structures on system operation

研究中发现,随着蒸发器处热源的功率升高,微通道模块流道内工质进入流动沸腾状态的温度逐渐提升,如图 15 所示。由图 15 可知,蒸发器处散热功率的提升有助于减缓微通道模块中的流动沸腾状态,使微通道模块内的流体力工质在较高散热功率下仍然处于液体状态,有助于维持系统运行状态的稳定。原因是一方面蒸发器处的散热功率提升可以提升系统内的循环流量,强化微通道模块内的对流换热,使更多的热量由对流带走而非相变带走;另一方面,蒸发器处的散热功率提升会使该处的温度升高,使整个密闭系统内的压力升高,压力升高也会抑制液体相变,从而起到上述抑制微通道内流动沸腾,维持整个系统运行稳定性的作用。

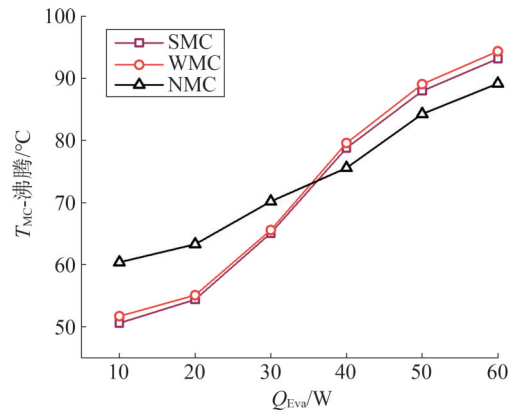


图 15 蒸发器运行状态对系统影响

Fig.15 The influence of the evaporator operating status on the system

3 结论

基于环路热管的运行原理,针对氢燃料电池的热管理,设计一种具有自驱动、自适应特性的散热系统。通过实验证明该系统散热的可行性和自适应性,同时使用具有高效换热特性的微通道结构对电池单元间流道进行了优化,降低了换热热阻,有效控制了热源的温度。最后,探究了该系统的运行特性,并得到了针对该系统的后续优化研究方向。本文主要研究结论如下:

1) 该散热系统中多孔介质毛细芯孔隙内的液体工质相变产生的毛细驱动力可以驱动工质在系统中循环,实现自驱动散热,散热热流密度达到 30 W/cm^2 。同时,系统中的循环流量根据热源功率

的变化而变化,系统散热功率为 10~100 W,以满足燃料电池的不同散热需求,说明所设计系统具有自适应散热特性。

2)微通道结构的添加使系统内流体的循环阻力升高,降低微通道所在系统内的工质循环流量,但同时强化了微通道所在模块内的换热效率,降低流道内的换热热阻至 0.02 K/W,并使其运行温度明显下降。因此,对于氢燃料电池中单体电池间的通道,在结构设计过程中应同时兼顾提升其换热效率和降低流动阻力,以实现更好的散热效果。

3)在所设计的散热系统运行过程中,观察到系统出现运行不稳定特性。该运行不稳定特性是由于微通道模块的流道中工质吸热相变引起的,造成了系统中流体工质循环流量的下降和蒸发器和微通道模块及其热源运行温度的升高,工质相变程度越大,该现象越为明显。但是研究中发现,通过提升蒸发器处的热源功率可以有效抑制系统不稳定性。

本研究提出一种新型的针对氢燃料电池散热的热管理技术,可以将燃料电池内的热量传导至电池堆外部。若是可以将该部分热量收集,进行热电联供,可大大提升该技术的适用范围。

参考文献

- [1] 何雅玲,李印实.氢能技术科技前沿与挑战[J].科学通报,2022,67(19):2113-2114.
HE Yaling, LI Yinshi. Frontiers and challenges in hydrogen energy [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(19): 2113-2114.
- [2] 陈永权,方瑜.多组合虚拟电厂中氢储能低碳经济配置与优化[J].电网与清洁能源,2024,40(3):107-118.
CHEN Yongquan, FANG Yu. Low carbon economic configuration and optimization of hydrogen storage in multi-portfolio virtual power plants [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 107-118.
- [3] 邱玥,周苏洋,顾伟,等.“碳达峰、碳中和”目标下混氢天然气技术应用前景分析[J].中国电机工程学报,2022,42(4):1301-1321.
QIU Yue, ZHOU Suyang, GU Wei, et al. Application prospect analysis of hydrogen enriched compressed natural gas technologies under the target of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1301-1321.
- [4] 付雪涛,张理,朱晨,等.光伏电解水制氢储氢技术标准体系框架研究[J].信息技术与标准化,2024(10):19-24.
FU Xuetao, ZHANG Li, ZHU Chen, et al. Research on the standard system architecture of photovoltaic water electrolysis hydrogen production and storage technology [J]. Information Technology & Standardization, 2024(10): 19-24.
- [5] 杨胜,樊艳芳,侯俊杰,等.考虑平抑风光波动的ALK-PEM电解制氢系统容量优化模型[J].电力系统保护与控制,2024,52(1):85-96.
YANG Sheng, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Capacity optimization model for an ALK-PEM electrolytic hydrogen production system considering the stabilization of wind and PV fluctuations [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 85-96.
- [6] 姜智霖,郝峰杰,袁志昌,等.考虑SOC优化设定的电-氢混合储能系统的运行优化[J].电力系统保护与控制,2024,52(8):65-76.
JIANG Zhilin, HAO Fengjie, YUAN Zhichang, et al. Optimal operation of an electro-hydrogen hybrid energy storage system considering SOC optimization setting [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 65-76.
- [7] TARHAN C, MEHMET ALI Ç. A study on hydrogen, the clean energy of the future: hydrogen storage methods [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 40: 102676.
- [8] 张雪松,陈杨,倪筹帷,等.考虑多类型电解槽差异化特征的分布式电热氢系统优化设计[J].浙江电力,2024,43(4):1-11.
ZHANG Xuesong, CHEN Yang, NI Chouwei, et al. Optimal design of distributed electric - thermal-hydrogen energy systems considering differentiated features of multi-type electrolyzers [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(4): 1-11.
- [9] AFLAKI S, NETESSINE S. Strategic investment in renewable energy sources: the effect of supply intermittency [J]. Manufacturing & Service Operations Management, 2017, 19(3): 489-507.
- [10] SINGLA M K, NIJHAWAN P, OBEROI A S. Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(13): 15607-15626.
- [11] MANOHARAN Y, HOSSEINI S E, BUTLER B, et al. Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect [J]. Applied Sciences, 2019, 9(11): 2296.
- [12] ALCAIDE F, CABOT P L, BRILLAS E. Fuel cells for chemicals and energy cogeneration [J]. Journal of Power Sources, 2006, 153(1): 47-60.
- [13] RAMADHANI F, HUSSAIN M A, MOKHLIS H. A comprehensive review and technical guideline for optimal design and operations of fuel cell-based cogeneration systems [J]. Processes, 2019, 7(12): 950.
- [14] ADEMOLLO A, MATI A, PAGLIAI M, et al. Exploring the role of hydrogen in decarbonizing energy-intensive industries: a techno-economic analysis of a solid oxide fuel cell cogeneration system [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 469: 143254.
- [15] JIAO K, XUAN J, DU Q, et al. Designing the next generation of

- proton-exchange membrane fuel cells [J]. *Nature*, 2021, 595: 361-369.
- [16] BOSE S, KUILA T, NGUYEN T X H, et al. Polymer membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cell: recent advances and challenges [J]. *Progress in Polymer Science*, 2011, 36 (6): 813-843.
- [17] SOPIAN K, WAN DAUD W R. Challenges and future developments in proton exchange membrane fuel cells [J]. *Renewable Energy*, 2006, 31(5): 719-727.
- [18] XIE N, WEI W, BA J, et al. Operation parameters study on the performance of PEMFC based orthogonal test method [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 61: 105035.
- [19] ZHANG J L, TANG Y H, SONG C J, et al. PEM fuel cells operated at 0% relative humidity in the temperature range of 23-120°C [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52(15): 5095-5101.
- [20] HU D H, WANG Y T, LI J W, et al. Investigation of optimal operating temperature for the PEMFC and its tracking control for energy saving in vehicle applications [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 249: 114842.
- [21] ROSLI R E, SULONG A B, DAUD W R W, et al. A review of high-temperature proton exchange membrane fuel cell (HT-PEMFC) system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42 (14): 9293-9314.
- [22] COPPO M, SIEGEL N P, VON SPAKOVSKY M R. On the influence of temperature on PEM fuel cell operation [J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(1): 560-569.
- [23] ZHU R Q, XING L, TU Z K. Simulations and analysis of high-temperature proton exchange membrane fuel cell and its cooling system to power an automotive vehicle [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 253: 115182.
- [24] ISLAM M R, SHABANI B, ROSENGARTEN G. Nanofluids to improve the performance of PEM fuel cell cooling systems: a theoretical approach [J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 660-671.
- [25] HAN J, PARK J, YU S. Control strategy of cooling system for the optimization of parasitic power of automotive fuel cell system [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(39): 13549-13557.
- [26] FLY A, THRING R H. A comparison of evaporative and liquid cooling methods for fuel cell vehicles [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(32): 14217-14229.
- [27] BARGAL M H S, ABDELKAREEM M A A, TAO Q, et al. Liquid cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks: a detailed survey [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59 (2): 635-655.
- [28] SASMITO A P, KURNIA J C, MUJUMDAR A S. Numerical evaluation of various gas and coolant channel designs for high performance liquid-cooled proton exchange membrane fuel cell stacks [J]. *Energy*, 2012, 44(1): 278-291.
- [29] NEOFYTIDIS C, PALOUKIS F, ATHANASOPOULOS N, et al. Efficient high temperature PEMFC metallic stack with innovative two-phase liquid cooling [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 283: 116944.
- [30] MAYDANIK Y F. Loop heat pipes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25(5/6): 635-657.
- [31] AMBIRAJAN A, ADONI A A, VAIDYA J S, et al. Loop heat pipes: a review of fundamentals, operation, and design [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2012, 33(4/5): 387-405.
- [32] KHAN M G, FARTAJ A. A review on microchannel heat exchangers and potential applications [J]. *International Journal of Energy Research*, 2011, 35(7): 553-582.
- [33] HASSAN I, PHUTTHAVONG P, ABDELGAWAD M. Microchannel heat sinks: an overview of the state-of-the-art [J]. *Microscale Thermophysical Engineering*, 2004, 8(3): 183-205.
- [34] LEE D Y, VAFAI K. Comparative analysis of jet impingement and microchannel cooling for high heat flux applications [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, 42(9): 1555-1568.

收稿日期:2025-01-23

修回日期:2025-04-02

作者简介:

柳洋(1995),男,博士,工程师,主要研究方向为特种设备安全技术;

陈岩(1979),男,博士,副教授,主要研究方向为热管技术和高效热管理技术;

辛公明(1977),男,博士,教授,主要研究方向为先进热管理技术;

张彤(1990),男,硕士,工程师,主要从事特种设备安全管理工作;

张友刚(1984),男,学士,工程师,从事氢燃料电池发动机、热电厂的推广及调研工作;

申孝民(1980),通信作者(youngofsc@126.com),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为特种设备安全技术。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.240296

高海拔地区巡检无人机动力电池热特性分析及热管理策略研究

杨启明^{1*}, 沈雷雷¹, 窦炳麟¹, 许若凡², 金炳辉²

(1. 国家能源集团海西光伏发电有限公司, 青海 德令哈 817000; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要:在青海地区,无人机巡检成为光伏电站定期巡检工作的主要方式。锂离子电池是目前无人机中常用的电池类型之一。然而在高海拔地区,由于温度、气压因素的影响,锂离子电池会出现容量下降、热失控风险增大等问题。本研究选择光照较强的青海地区,以该地区的气压与气温作为实验环境参数,将电池在低气压的环境下测试的温升、内阻、对流换热系数、熵热系数数据,与常压下数据进行比较。随后对电池的热特性进行仿真并搭建模型,对锂电池特性进行深入研究。根据仿真与实验结果,提出适应于高海拔、低气压地区的电池组保温与加热相结合的热管理策略,最后选择的保温材料是厚度为6 mm的气凝胶,并对电池组的侧面进行加热,可以确保青海等高海拔地区极端环境中动力电池的工作性能,从而确保巡检装备在高海拔地区正常运行。

关键词:高海拔;低气压;动力电池;热特性;热管理策略

中图分类号:TM911

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)01-0011-14

Analysis of Thermal Characteristics and Thermal Management Strategy of UAV Power Batteries for Inspection in High-altitude Area

YANG Qiming^{1*}, SHEN Leilei¹, DOU Binglin¹, XU Ruofan², JIN Binghui²

(1. National Energy Group Haixi Photovoltaic Power Generation Co., Ltd., Delingha 817000, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In Qinghai region, drone inspection has emerged as the primary method for regular inspection of photovoltaic power stations. Lithium-ion batteries are one of the commonly utilized battery types in unmanned aerial vehicles. However, in high-altitude areas, due to the influence of temperature and atmospheric pressure, lithium batteries may experience a decrease in capacity and an increased risk of thermal runaway. This study select the corresponding atmospheric pressure and temperature in sunny regions of Qinghai as the research environment, and compare the temperature rise, internal resistance, convective heat transfer coefficient, and entropy heat coefficient data of the battery tested under low-pressure conditions with those obtained under normal pressure. Subsequently, the thermal characteristics of the battery are simulated and a model is built to conduct in-depth research on the characteristics of lithium batteries. According to the simulation and experimental results, a thermal management strategy combining thermal insulation and heating of the battery pack suitable for high-altitude and low-pressure areas is proposed. Finally, 6 mm thick aerogel is selected as the thermal insulation material to heat the side of the battery pack, which can effectively ensure the working performance of power batteries in extreme environments in high-altitude areas such as Qinghai, so as to ensure the normal operation of patrol equipment in high-altitude areas.

Keywords: high altitude; low atmospheric pressure; power battery; thermal characteristics; thermal management strategy

基金项目:国家能源集团科技项目“现货市场下多形式先进复合储能智能协同控制技术研究及实证示范”(GJNY-23-74);国家能源集团海西光伏发电有限公司科技项目“自同步电压源型储能系统关键技术研究及示范科技项目”(GNQH-2023-01)。

Science and Technology Project of National Energy Group “Research and Demonstration of Multi-form Advanced Composite Energy Storage Intelligent Collaborative Control Technology in Spot Market” (GJNY-23-74); Science and Technology Project of National Energy Group Haixi Photovoltaic Power Generation Co., Ltd. “Self-synchronous Voltage Source Energy Storage System Key Technology Research and Demonstration Technology Project” (GNQH-2023-01)。

0 引言

随着化石燃料资源的逐渐减少以及全球对生态环境保护意识的不断提升,各国政府纷纷制定并实施与能源利用和环境保护相关的政策措施,以实现能源转型和环境治理^[1]。随着“双碳”目标的提出^[2],我国正致力于实现从传统化石能源主导的能

源结构向以新能源为主体的能源结构转型。新能源发电已然成为研究热点,然而其具有很强的间歇性和波动性,配备与之匹配的储能系统至关重要。

青海地区海拔较高且光照时间充足,光伏发电发展迅猛,推动了储能事业的发展。然而,高海拔地区的储能系统受气压、温度等环境因素的影响较大,定期对其进行巡检是保证系统安全、可靠运行的必要条件。无人机凭借其高效、灵活、安全等优点,为储能系统的巡检提供了便捷而高效的途径。锂离子电池因其较高的能量密度和较长的循环寿命,被广泛应用于无人机的动力系统中^[3-5]。高海拔地区对巡检无人机所用动力电池的热管理提出了挑战,深入研究这一领域的技术方案,将为新能源装备在多样化地理环境中的广泛应用提供有力支撑,进而推动我国新能源产业的全面发展。

对电池的热管理策略进行研究首先要建立电池热模型。现有的电池热模型主要包括电化学-热耦合模型、集总热模型以及电热耦合模型。文献[6]作者首次构建了一个全面的热力学模型,该模型将热量变化划分为四个组成部分:反应热、混合热、相变热以及热容量,模型假设电池内部的热量生成是均匀分布的,并综合考虑了化学反应产生的热量和欧姆损耗所导致的温升,为后续关于电池热行为的研究提供了重要的理论依据。文献[7]基于电热耦合的P2D模型模拟了NCM811-21700圆柱形电池在不同放电倍率、25℃环境温度下的发热情况,研究电池在放电过程中的电化学和热特性,证明基于热耦合的P2D模型可用于NCM811-21700电池的热管理。文献[8]建立电池的电化学-热耦合模型,能够较为准确地模拟商用锂离子电池在实际环境条件下的空间热行为。文献[9]本研究采用三维电化学-热耦合(ECTC)模型,深入探究了软包锂离子电池在非均匀温度场中的热行为特征。结果表明,集总热源方法能够有效预测电池的峰值温度和总产热功率。基于此,进一步建立了简化的集总参数模型,系统探讨了电池在低压条件下的温度变化特性。

随着海拔的上升,环境气压逐渐降低,这种低气压状态可能导致电池内部组件发生形变或应力变化,进而对电池的工作性能产生不利影响。文献[10]研究发现,气压环境会影响电池区域热传导方

式,可能会导致电池老化,所以,低气压对锂电池性能影响的研究十分重要。文献[11]研究表明,低气压环境下加速了锂电池的老化进程,受低气压应力影响,电池的欧姆阻抗和电荷转移阻抗较常压工况都会有不同程度的增加,致使电池容量加速衰退。文献[12]研究了三元叠片式软包锂离子电池在60 kPa低气压环境下循环老化对电池热安全特性的影响,通过实验证明低气压循环老化后的电池更容易触发热失控。低气压会对锂电池结构自身造成危害^[13-14]以及出现热失控^[15]。另外,温度对锂离子电池的性能具有显著影响,锂离子电池的适宜工作温度一般在25~40℃^[16],过高或过低的温度可能会导致其出现容量下降、热失控风险增大等问题。文献[17]针对高海拔环境下锂电池包的散热问题进行了研究,提出通过增加进风口面积和提升风扇转速的优化方案,该方案可以有效降低锂电池包的温升和温差。因此,实时监测电池的温度变化并制定相应的热管理策略对提高巡检无人机的性能至关重要。

研究不同环境下的电池热特性,获取不同气压下电池热物性参数,建立单体电池的热模型,在此基础上建立电池组模型,对电池进行热仿真研究并据此提出合适的电池组热管理策略。

1 低气压性能测试及结果分析

1.1 实验平台搭建

低气压实验平台主要由LANHE电池测试系统、安捷伦数据采集装置、上位机控制软件、温控箱、抽气设备以及真空容器等部分构成,如图1所示。



图1 实验平台

Fig.1 Experimental platform

1.2 实验电池

选取软包三元锂离子电池为本次的研究对象,该电池参数如表 1 所示。

表 1 实验电池的基本参数

Table 1 The basic parameters of experimental battery

| 参数 | 数值 |
|---------------|------------|
| 额定容量/Ah | 7 |
| 标称电压/V | 3.7 |
| 充电截止电压/V | 4.2 |
| 放电截止电压/V | 3 |
| 尺寸/(mm×mm×mm) | 115×65×7.5 |
| 质量/kg | 0.13kg |
| 工作温度/°C | -10~60 |

1.3 低气压性能测试

选取如表 2 所示的海拔对应的气压和温度作为环境变量,研究高海拔环境下电池的热特性,通过电池热特性实验与仿真,提出电池组热管理策略,为高海拔地区储能系统巡检无人机动力电池热管理系统设计提出参考。

表 2 不同海拔高度对应的气压和温度

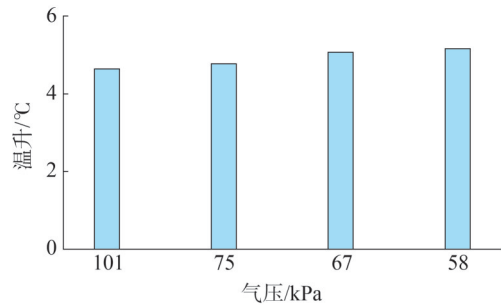
Table 2 The atmospheric pressure and temperature at different altitudes

| 海拔/m | 气压/kPa | 温度/°C |
|------|--------|-------|
| 0 | 101 | 15 |
| 2460 | 75 | -1 |
| 3350 | 67 | -7 |
| 4460 | 58 | -14 |

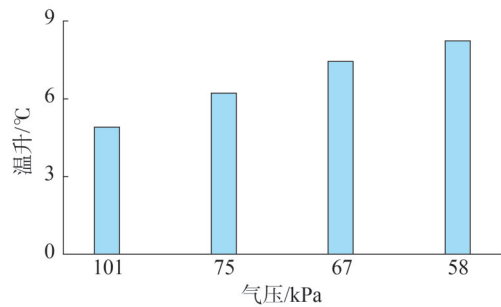
1.3.1 温升测试

气压越低,电池的温升越大^[13]。一方面,在低气压环境下,电池的放电内阻数值升高^[18],导致其发热加剧;同时,在低气压条件下,空气密度减小,气体分子数量减少,分子的无序运动减弱,从而降低了气体的对流散热效率^[19]。分别在 101 kPa、75 kPa、67 kPa、58 kPa 下以 0.2C、0.4C、0.6C 及 0.8C 倍率下放电,得到不同气压下采用不同倍率进行放电时电池表面的温升情况如图 2 所示。由此实验可发现电

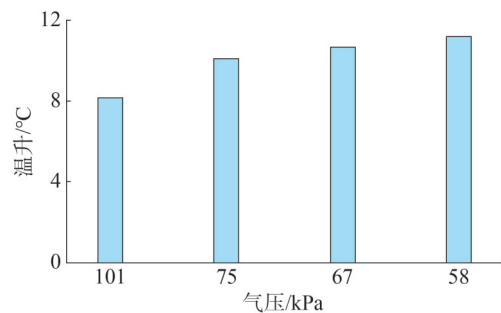
池表面温升随气压的降低而升高,且放电倍率越大,电池表面温升越高。在 0.8C 放电倍率下,相较于常压下温升最高达 22.53%。



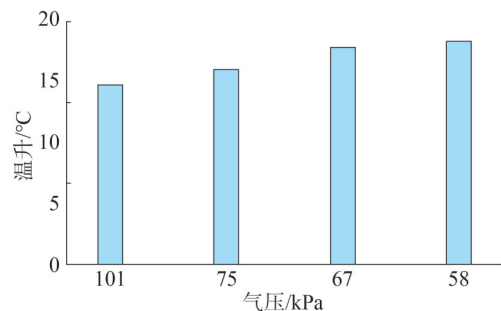
(a) 放电倍率为 0.2C



(b) 放电倍率为 0.4C



(c) 放电倍率为 0.6C



(d) 放电倍率为 0.8C

图 2 不同放电倍率和气压下的温升

Fig.2 Different discharge rates and temperature rise under atmospheric pressure

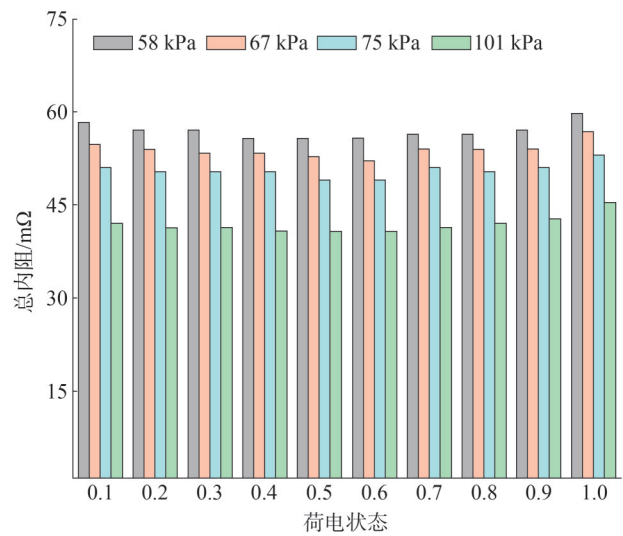
1.3.2 内阻测试

在低气压环境下,锂电池内部结构承受的应力发生变化,导致不同材料部件之间的接触性能下降。内部锂脱嵌受限,界面动力学性能衰退,其内阻增大。

由图3可以看出,在低气压环境下,电池在放电过程中,内阻的上升主要源于其欧姆内阻的增大。电池在低气压下与常压下相比放电内阻的增长率如表3所示。由此可以得出,电池在58 kPa环境下总内阻增长率为36.1%,与常压环境下电池总内阻相比明显增大。

1.3.3 对流换热系数测试

进行电池对流换热系数测试有利于判断电池的散热性能。对流换热系数用于表征电池在对流作用



(c)总内阻

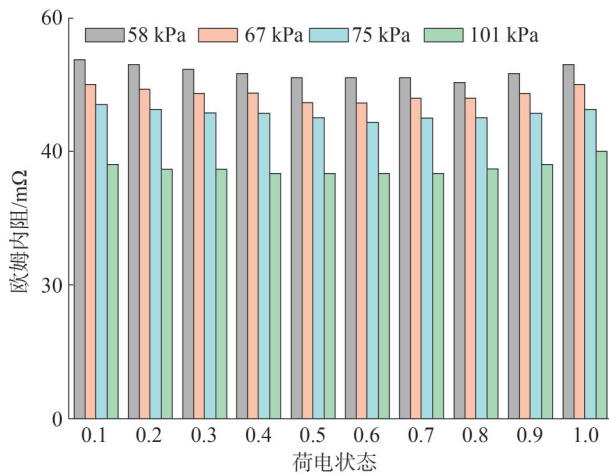
图3 不同气压下的内阻

Fig.3 The internal resistance under different atmospheric pressures

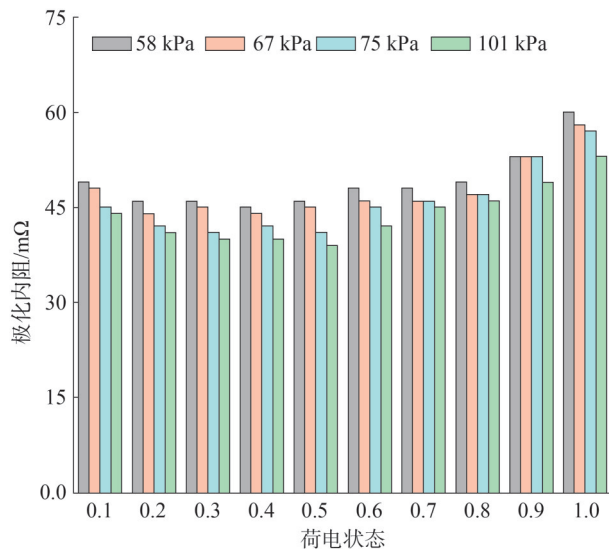
表3 不同气压下电池内阻的增长率

Table 3 The growth rate of battery internal resistance under different atmospheric pressures

| 气压/kPa | 欧姆内阻 增长率/% | 极化内阻 增长率/% | 总内阻 增长率/% |
|--------|---------------|---------------|--------------|
| 58 | 38.4 | 11.6 | 36.1 |
| 67 | 29.7 | 8.4 | 28.9 |
| 75 | 21.7 | 4.6 | 20.9 |



(a)欧姆内阻



(b)极化内阻

下与外界环境进行热交换的效率,其数值反映了单位面积上热量传递速度与温度差异之间的比例关系^[20]。该系数反映了单位面积电池表面传递的热量,数值越大则表示单位面积上传递的热量越多。

将电池处于静置阶段,认为该阶段内电池不产生新的热量,记录电池从45℃冷却到5℃的温度下降情况,满足式(1)。

$$mC_p \frac{dT}{dt} = -hS(T_s - T_z) \quad (1)$$

式中: m 为电池的质量; C_p 为电池的比热容; $\frac{dT}{dt}$ 为电池表面的温度随时间变化的速率; h 为电池的对流换热系数; S 为电池的换热面积; T_s 、 T_z 分别为电池表面温度和周围空气的温度。

图4为电池表面的温度随时间变化的曲线,对式(1)的两边同时取对数,可得到如式(2)所示的 $\ln(T_s - T_\infty)$ 与 t 呈线性关系的等式。

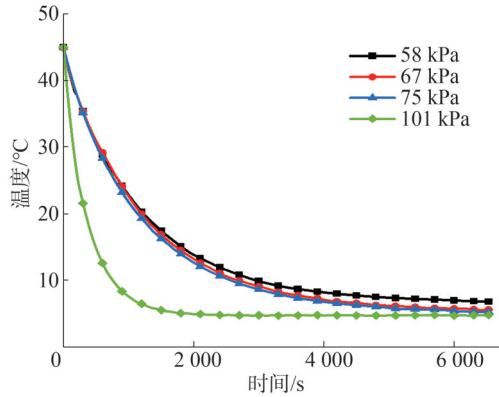


图4 温度随时间变化曲线

Fig.4 The temperature curves with time

图5所示为 $\ln(T_s - T_\infty)$ 随时间变化的曲线。

$$\ln(T_s - T_\infty) = -\frac{hS}{mC_p}t + C \quad (2)$$

式中: C 为待求解的常数。

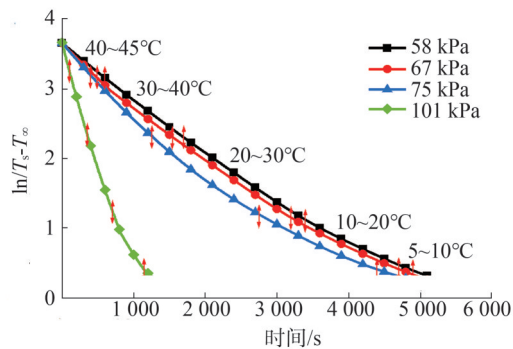


图5 $\ln(T_s - T_\infty)$ 随时间变化曲线

Fig.5 The $\ln(T_s - T_\infty)$ curves with time

电池在不同气压条件下,各温度区间对应的对流换热系数如表4所示。

在相同气压下,温度越高,气体分子的动力粘度越小,流动速度越快,换热能力越强。在相同温度区间内,气压越低,单位体积内的空气分子数量越少,热传递的效率越低,换热能力越弱。

1.3.4 熵热系数测试

熵热系数用于描述电池的内部能量转化和热传递过程以及电化学反应对电池工作性能所产生的影

响^[11]。温度发生波动会作用于锂离子电池内部的电化学反应速率和电解质的导电性,从而对电池的压力表现和整体性能产生影响,电池的熵热系数通常以开路电压对温度的导数(dU_{ocv}/dT)^[21-22]来表示。

表4 不同气压下的对流换热系数

Table 4 The convective heat transfer coefficient under different atmospheric pressures

| 温度区间/°C | 101 kPa | 75 kPa | 67 kPa | 58 kPa |
|---------|---------|--------|--------|--------|
| 5~10 | 9.13 | 2.97 | 2.87 | 2.69 |
| 10~20 | 15.31 | 4.05 | 4.01 | 3.95 |
| 20~30 | 25.87 | 6.2 | 5.84 | 5.81 |
| 30~40 | 30.37 | 8.49 | 6.57 | 6.44 |
| 40~45 | 32.86 | 9.65 | 8.4 | 6.92 |

熵热系数与电池内部材料的晶体结构存在紧密联系。当材料的晶体结构较为无序时,离子在其中的迁移路径会变得更加复杂,从而导致熵热系数升高。根据图6的实验结果,较低的气压对电池内部材料的晶体结构影响并不明显。图6初始起点不同的原因:电池荷电状态为0时,这时电池空电,其内部的离子、电子等可能更加随机的分布,导致其无序程度更加混乱,可能使熵热系数有一定差异,且单位是mV/K,其差值可近似忽略^[23]。

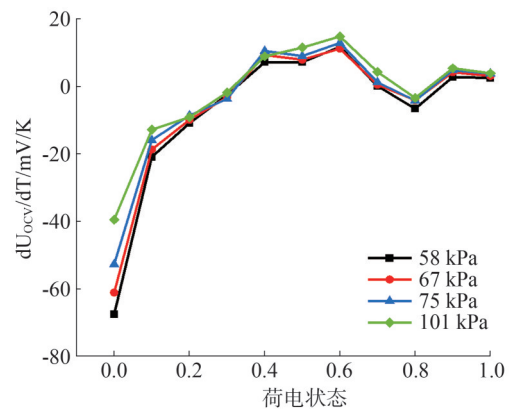


图6 不同气压下的熵热系数

Fig.6 The entropy coefficients under different atmospheric pressures

本节对电池进行了不同环境下的温升测试、内阻阻值测试、对流换热系数测试、熵系数测试。在实验分析中发现,随着气压的下降,电池在放电过程中温度上升趋势更加明显;在大气压强较低且温度较

低的条件下,电池的内阻阻值有所增加;同时,对流换热的效率也会降低;而嫡系数则在低气压环境下变化不显著。通过这些实验测试证实了低气压、低温环境会影响电池的性能。

2 高海拔环境下热特性仿真

2.1 热物性参数获取

为了有效开展电池热管理的研究,构建电池的热模型是一种关键手段,而实现高精度仿真的前提是准确获取电池的关键热物性参数,如密度、比热容和导热系数。

由于选取的三元锂离子电池内部采用叠片式结构,需要对参数进行集总化处理,通过采用加权平均的策略,对电池的热物理特性参数进行综合计算,以获取更为合理的整体热物性值。经过计算电池的密度为 $\rho = 2\ 309.92\ \text{kg/m}^3$ 。

2.1.1 比热容

比热容是衡量物质吸收或释放热量能力的物理量,其大小主要取决于材料的性质。其等效计算公式为

$$C_p = \frac{1}{m} \sum c_i m_i \quad (3)$$

式中: c_i 为电池各部分材料的比热容; m_i 为电池各部分材料的质量。

如图7所示,将一块与电池尺寸相匹配的加热片放置于两块电池之间,以确保加热片所产生的热量能够较为均匀地传递给这两块电池。同时,在每块电池的中心位置分别贴附热电偶A和B,用于监测电池温度的变化。为降低电池与外界空气之间的热交换,电池外部被包裹了一定厚度的气凝胶毡,从而营造一个相对封闭且隔热的环境。

比热容的计算公式为

$$C_p = \frac{P}{2m \frac{dT}{dt}} \quad (4)$$

式中: P 为加热片功率; dT/dt 为电池温度随时间的变化率。

计算获得不同气压下电池的比热容如表5所示。可得当气压降低时,电池的比热容下降,说明低气压环境下电池的吸热和放热能力下降。

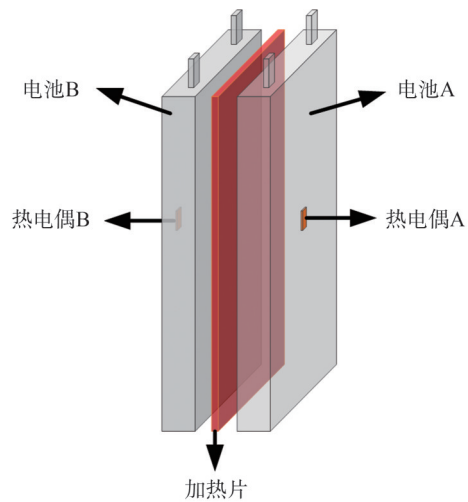


图7 加热示意图

Fig.7 The heating diagram

表5 不同气压下的比热容

Table 5 The specific heat capacity at different atmospheric pressures

| 气压/kPa | 比热容 (J/(kg·K)) |
|--------|----------------|
| 101 | 1 020.29 |
| 75 | 971.12 |
| 67 | 964.84 |
| 58 | 957.03 |

2.1.2 导热系数

软包电池的结构通常采用层叠方式,其内部电阻的分布遵循等效电阻的串并联原则。在 x 和 y 方向上,电池的内阻可视为并联,而在 z 方向上,由于正极、隔膜、负极的依次堆叠,其内阻表现为串联关系,各个方向内阻的等效计算公式为^[24]

$$\begin{cases} \lambda_x = \frac{1}{L} \sum \lambda_i h_{xi} \\ \lambda_y = \frac{1}{W} \sum \lambda_i h_{yi} \\ \lambda_z = \frac{1}{H} \sum \lambda_i h_{zi} \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ_i 为电池内部各部分材料的导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; L 为电池的长度, m ; W 为电池的宽度, m ; H 为电池的厚度, m ; h_{xi} 、 h_{yi} 、 h_{zi} 分别为电池各材料对应方向 x 、 y 、 z 的长度, m 。

电池各方向的示意图如图8所示。

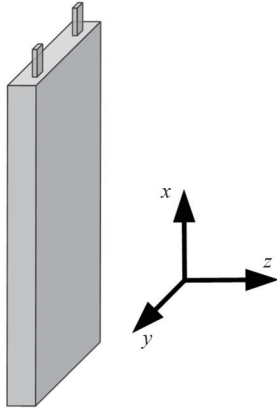


图8 电池方向示意图

Fig.8 The battery orientation diagram

基于上述理论,由于电池在 x 、 y 方向的导热系数相同,可将其视为同一导热方向,称为横向,用 x_1 表示,把电池沿 z 方向定义为纵向,用 y_1 表示,电池的传热方程可表示为^[25]

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{x_1} \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} + \lambda_{y_1} \frac{\partial^2 T}{\partial y_1^2} \quad (6)$$

式中: λ_{x_1} 、 λ_{y_1} 为电池的横、纵向导热系数, $W/(m \cdot K)$; $\partial T/\partial x_1$ 、 $\partial T/\partial y_1$ 为电池沿横、纵向的温度梯度, K/m 。

1)纵向导热系数。

按照图 8 所示的加热方式对电池进行加热,忽略热量沿电池横向的传导,假设热传导仅沿长度方向发生,其表达式如式(7)所示。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{y_1} \frac{\partial^2 T}{\partial y_1^2} \quad (7)$$

对式(7)进行积分可得

$$T(y_1) = \frac{\rho C_p}{2\lambda_{y_1}} \frac{\partial T}{\partial t} y_1^2 + C_1 y_1 + C_2 \quad (8)$$

式中: C_1 和 C_2 为常数。

假设加热片所释放的全部热量均被电池吸收,可得式(9)。

$$\left(\frac{\int_0^H T(y_1) dy_1}{H} - T_0 \right) m C_p = 0.5 P t \quad (9)$$

式中: H 为电池的厚度; T_0 为电池的初始温度; t 为加热时间。

边界条件如式(10)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{y_1=H} = 0 \\ T(y_1) \Big|_{y_1=H} = T_s \end{cases} \quad (10)$$

联立式(8)、式(9)和式(10)可求得电池的纵向导热系数,如表 6 所示。

表 6 不同气压下的纵向导热系数
Table 6 The longitudinal thermal conductivity of battery under different atmospheric pressures

| 气压/kPa | 纵向导热系数/ $W/(m \cdot K)$ |
|--------|-------------------------|
| 101 | 2.38 |
| 75 | 1.16 |
| 67 | 1.08 |
| 58 | 1.02 |

由此可得,气压越低纵向导热系数越低,环境气压为 58 kPa 时,纵向导热系数相较于常压下减小 1.36 $W/(m \cdot K)$ 。

2)横向导热系数。

按照图 9 所示的加热方式对电池进行加热,忽略热量沿电池纵向的传导,假设热传导仅沿宽度方向发生,其表达式如式(11)所示。

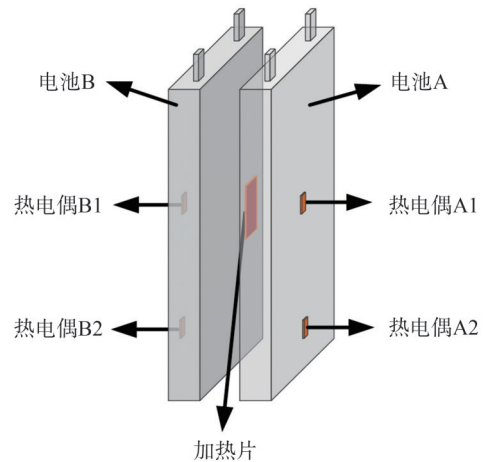


图9 加热示意图

Fig.9 The heating diagram

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{x_1} \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} \quad (11)$$

联立式(3)、式(4)和式(11)可得

$$\frac{P}{V} = \lambda_{x_1} \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} \quad (12)$$

式中: V 为电池体积。

对式(12)进行积分可得

$$T(x_1) = \frac{P}{2\lambda_{x_1} V} x_1^2 + C_3 \quad (13)$$

式中: C_3 为待求解常数。

联立式(12)、式(13)即可求得电池的横向导热系数,如表7所示。

表7 不同气压下的横向导热系数

Table 7 The transverse thermal conductivity of battery under different atmospheric pressures

| 气压/kPa | 横向导热系数/(W/(m·K)) |
|--------|------------------|
| 101 | 44.49 |
| 75 | 43.81 |
| 67 | 43.24 |
| 58 | 42.79 |

由此可得,气压越低横向导热系数越低,环境气压为58 kPa时,横向导热系数相较于常压下减小1.70 W/(m·K)。

2.2 集总热模型的建立及验证

2.2.1 模型的建立

在锂离子电池的充放电循环中,电能与化学能之间存在动态转换关系,并伴随显著的热效应。为了更精确地描述这些热现象,可基于阿伦尼乌斯定律建立反应动力学模型,从而将化学反应速率与温度变化联系起来,实现对热生成机制的系统性分析。基于此,能够建立温度与电池开路电压、过电位等关键参数之间的联系,从而实现集总参数模型与热力学模型的集成。这种耦合方式如图10所示。

Arrhenius公式为

$$k = A \cdot e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (14)$$

式中: k 为反应速率常数; A 为指前因子,表示反应物分子在具备足够能量之前,发生有效碰撞的频率,它与分子的碰撞频率及取向因素有关,是描述化学反应速率的重要参数之一,通常与温度变化相关; E_a 为活化能,表示反应物分子在发生化学反应前必须克服的能量势垒,反映了启动反应所需的最低能量,该参数

主要由反应本身的性质决定,通常不随温度变化而改变; R 为摩尔气体常数; T 为化学反应时的温度。

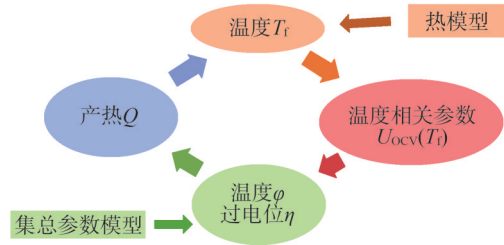


图10 模型耦合机制

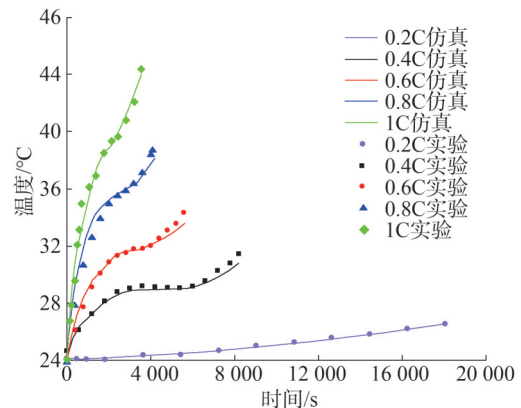
Fig.10 The model coupling mechanism

使用COMSOL Multiphysics软件进行仿真建模,运用2.1节测试获取的相关热参数,通过温度敏感参数来耦合集总参数模型和热模型,得到电池单体集总热模型。

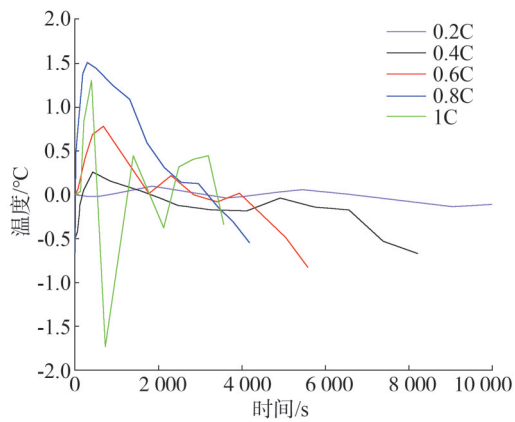
2.2.2 模型的验证

1) 恒流放电工况下温升曲线验证。

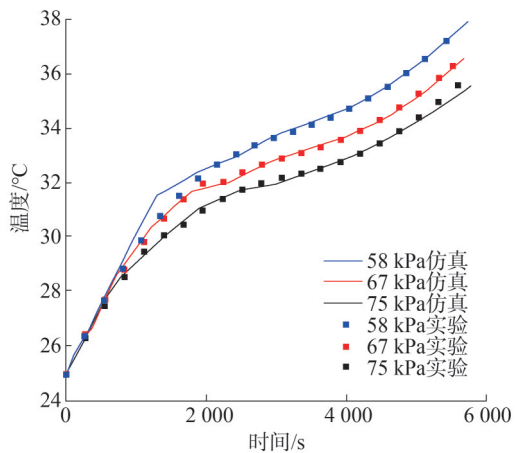
分别测试电池在不同工况下恒流放电的温升曲线,并与模型进行对比,结果如图11所示。结果表明,恒流工况下不同倍率下实验与仿真最大误差为1.72℃、不同气压下温升曲线实验与仿真最大误差为0.99℃。仿真结果与实验数据整体吻合良好,表明模型具有较好的可靠性。两者之间存在的微小偏差主要源于:部分模型参数来源于文献参考值,可能与实际所用电池的物理特性存在一定差异;同时,建模过程中为简化分析而引入的若干理想化假设,难以完全覆盖真实工况中的复杂因素,因而导致理论与实测结果出现一定出入。



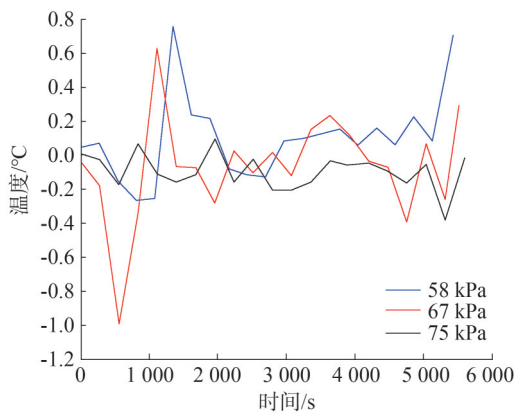
(a) 不同倍率温升曲线



(b)不同倍率温升误差曲线



(c)不同气压温升曲线



(d)不同气压温升误差曲线

图11 恒流工况下温升曲线验证

Fig.11 The temperature rise curve verification under constant current condition

2)动态工况验证。

对电池进行动态工况试验,以检验其在复杂运行条件下的响应特性与性能稳定性。输入如图12所示的动态工况电流,设置电池的初始荷电状态为

50%。图13所示为动态工况电压的验证曲线,误差曲线如图14所示,最大误差为0.014 V,平均误差为0.006 V,在可接受范围内。

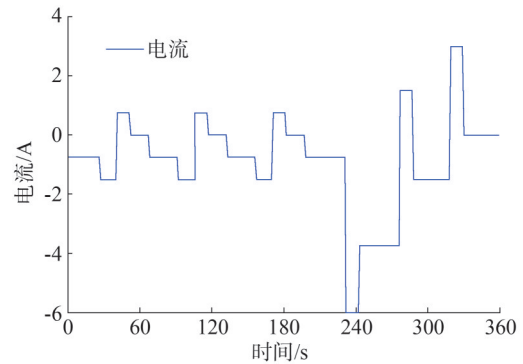


图12 动态工况电流

Fig.12 The dynamic current

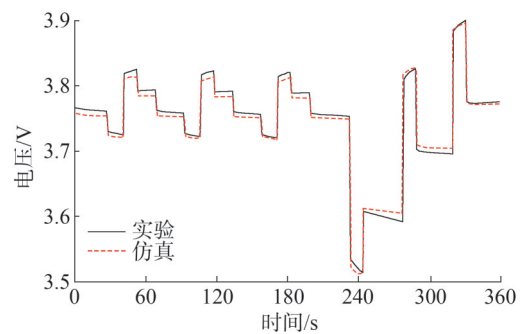


图13 动态工况电压验证曲线

Fig.13 The voltage verification curve under dynamic conditions

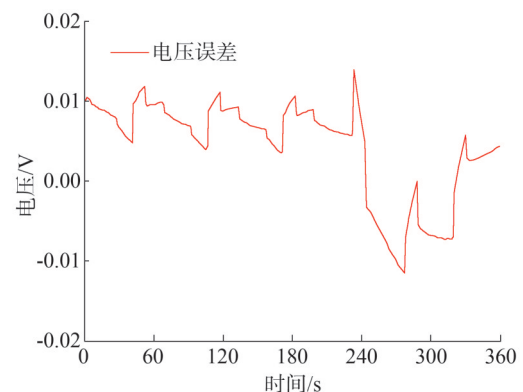


图14 动态工况电压误差曲线

Fig.14 The voltage error curve under dynamic conditions

通过恒流放电工况下温升曲线验证所搭建模型

的热特性准确性较高;通过动态工况验证所搭建模型的电化学性质准确性较高。综合可得本节所建立的仿真模型有较高的准确性。

2.3 电池组热管理策略

以搭建的电池组模型作为研究对象,研究其在不同环境下以0.2C倍率放电时的温度分布,并制定相应的热管理策略。电池组的建模过程是将多个单体电池模型按照一定的方式进行组合。在这一过程中,电池组整体的边界条件会发生变化。由于电池模块内部结构紧凑,各单体之间紧密排列并存在直接接触,因此在热管理分析中,不仅需要考虑电池表面与环境空气之间的对流换热,还必须重视电池间通过接触面传导的热量。然而,为简化计算模型并提高仿真效率,通常会忽略电池间的实际空隙,假设其接触面为理想热传导界面,仅分析它们之间的直接热传导。将各单体电池编号,从前往后分别为电池1—电池4,图15展示了电池组的完整三维几何结构。

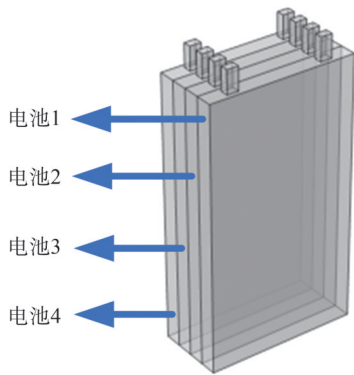


图15 电池编号示意图

Fig.15 The battery numbering diagram

2.3.1 电池组温度场分布

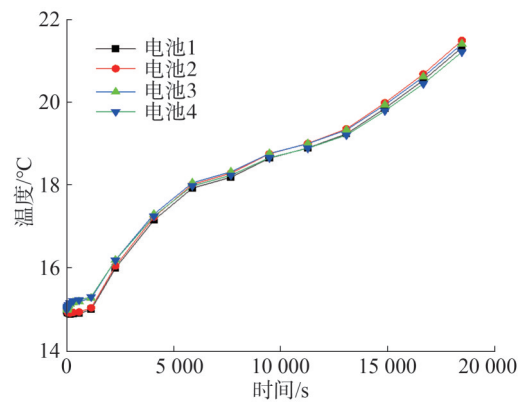
由搭建的电池组仿真模型可得出电池组以0.2C倍率放电时电池组内各单体的温度变化曲线,如图16所示。电池1和4产生的热量通过热传导传递给电池2和3,电池2和3位于中间位置,与空气接触的面积相较于其他电池较小,散热性能也小于电池1和4。

在相同放电倍率下,电池组在不同环境条件下进行放电时,随着温度和气压的下降,单体电池之间的最大温差会逐渐增加。这主要是由于电池内阻上

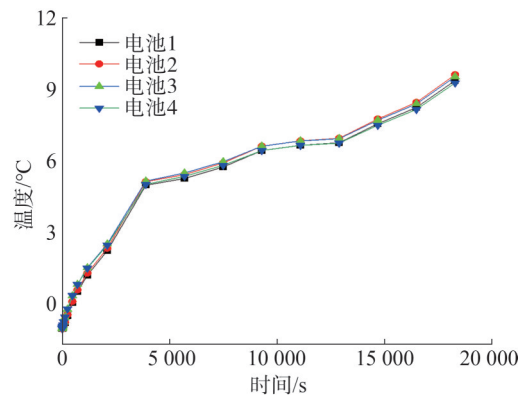
升导致产热量增加,同时低气压环境下对流散热能力减弱,进一步加剧了单体电池间的温度差异。表8中展示了各单体电池之间的最大温差情况。

2.3.2 电池组保温策略

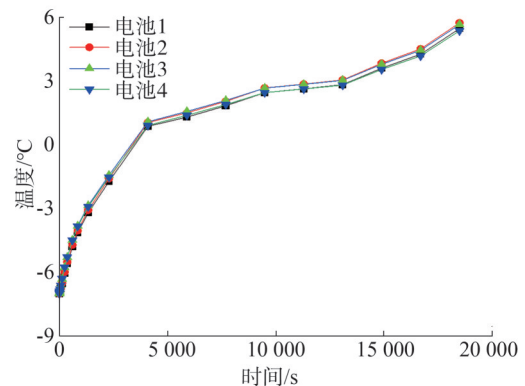
通过热特性实验和电池组内温度场进行仿真分析,认为在电池周围包裹一层导热系数不高于0.012 W/(m·K)的保温材料来隔绝与空气的热量交换,是一种有效的电池组保温策略。这种隔热材料通常



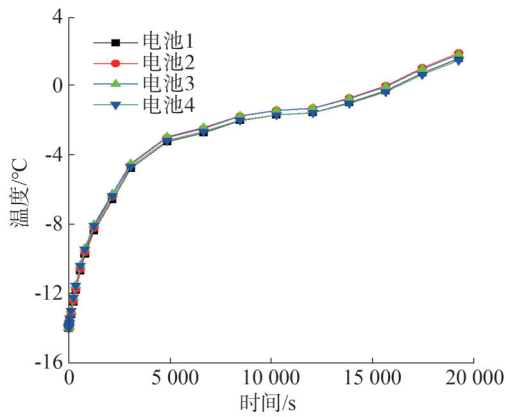
(a)温度为15℃,气压为101 kPa



(b)温度为-1℃,气压为75 kPa



(c)温度为-7℃,气压为67 kPa



(d)温度为-14℃,气压为-58 kPa

图 16 电池组内各单体电池温升曲线

Fig.16 The temperature rise curve of each battery in a battery pack

表 8 电池组内单体电池间最大温差

Table 8 The maximum temperature difference between cells in a battery pack

| 温度/℃ | 气压/kPa | 温差/℃ |
|------|--------|-------|
| 15 | 101 | 0.277 |
| -1 | 75 | 0.342 |
| -7 | 67 | 0.377 |
| -14 | 58 | 0.431 |

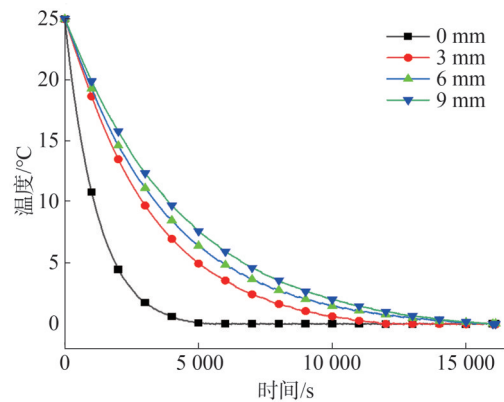
具备较低的热传导率、较轻的重量以及柔软的质地。按照其成分分类,隔热材料主要可以分为有机类、无机类以及复合型三类。表 9 中列举了几种常用的隔热材料及其热传导系数。在无人机及其他航天设备中,选择隔热材料时需注重减轻整体重量。气凝胶毡因其具有良好的隔热性能、较小的密度以及材质柔软的特性^[26-27],适宜用作电池的保温隔热材料。

表 9 常见的保温材料的导热系数

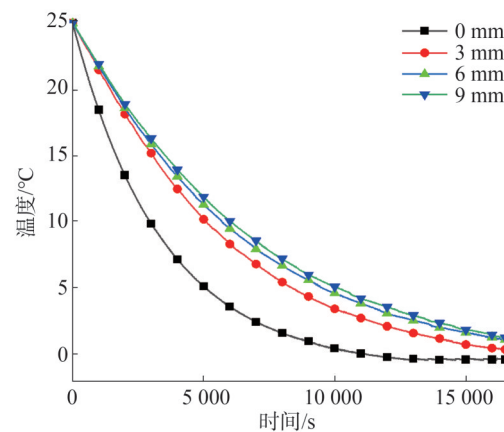
Table 9 The thermal conductivity of common thermal insulation materials

| 材料名称 | 导热系数/(W/(m·K)) | 密度/(kg/m ³) |
|-------|----------------|-------------------------|
| 气凝胶毡 | 0.013~0.020 | 160~240 |
| 岩棉 | 0.039 | 180 |
| 聚氨酯泡沫 | 0.023~0.026 | 20~600 |
| 玻璃棉 | 0.030~0.033 | 10~100 |
| 三聚氰胺板 | 0.036 | 1 661 |
| 橡塑泡沫 | 0.038 | 100~400 |

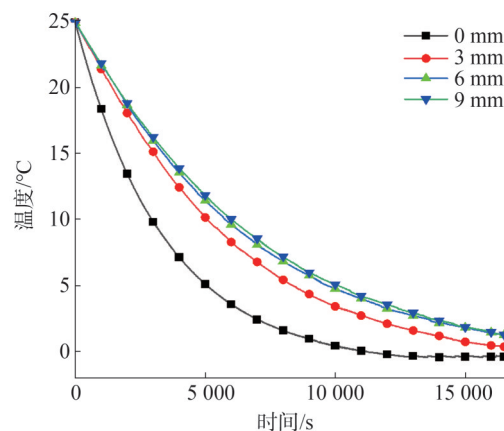
通过仿真对电池组采用了 3 mm、6 mm 和 9 mm 厚度的气凝胶毡进行了不同气压下的保温测试,测试结果如图 17 所示。对比发现,分别在 75 kPa、67 kPa 和 58 kPa 的气压下,6 mm 厚度的气凝胶毡与 9 mm 厚度相比,保温效果几乎相同,并且都能满足电池组的保温性能要求。考虑到需注重减轻整体重量,6 mm 厚度的气凝胶毡成为最适宜的电池保温隔热材料。



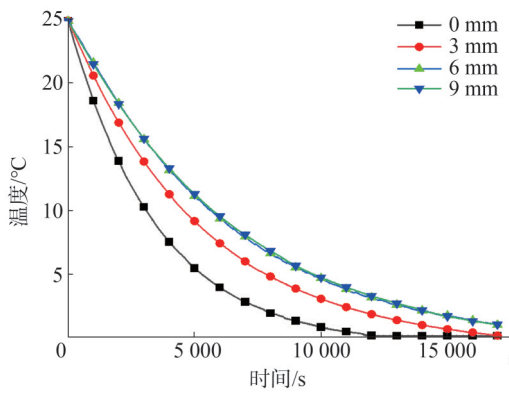
(a)101 kPa



(b)75 kPa



(c)67 kPa



(d)58 kPa

图 17 不同气压下气凝胶毡的保温效果

Fig.17 The thermal insulation effect of aerogel felt under different atmospheric pressures

2.3.3 电池组加热策略

在极端环境下,仅依靠保温材料无法维持电池的温度稳定。因此,采用外置式主动加热系统对电池组进行温控调节,将目标温度设定在 20~30 ℃。加热膜在电池组中被布置于不同位置,这种布置方式会引发热量传递路径的不同。由于电池组以 0.5C、1C 倍率放电时电池组温度在 20~30 ℃,所以本节研究当电池组以 0.2C 倍率在不同环境中运行时,寻找效果最好的加热功率,以确保在最短时间内将电池温度升至 20 ℃,并确保温度不超过 30 ℃。通过实验对比,最终选取对电池组进行侧面加热的方法。因为在电池组的侧面实施加热时,加热膜与四块电池实现了直接接触,无需通过电池之间传递热量,因此这种加热方式所需的功率较低。侧面加热 3D 模型如图 18 所示,蓝色区域表示边界热源。图 19 为在不同环境下,对电池组进行侧面加热时,各单体电池的温升曲线。

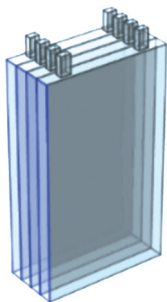
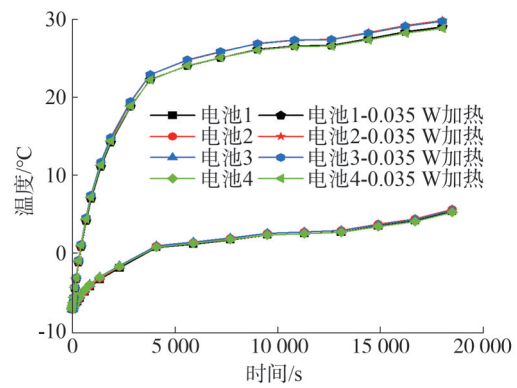
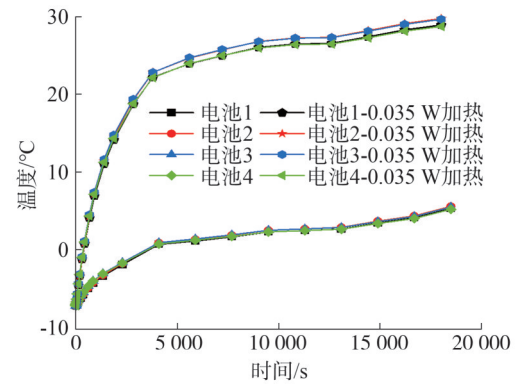


图 18 侧面加热示意图

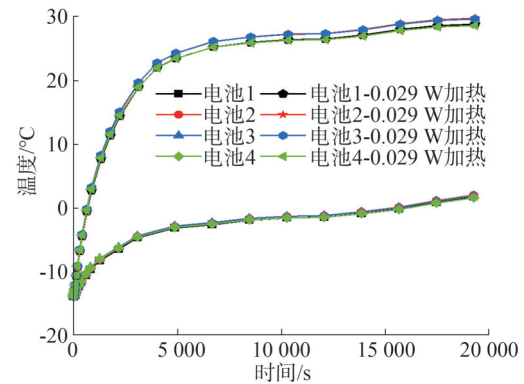
Fig.18 The side heating diagram



(a)温度为-1 ℃,气压为 75 kPa



(b)温度为-7 ℃,气压为 67 kPa



(c)温度为-14 ℃,气压为-58 kPa

图 19 电池组内各单体电池加热温升曲线

Fig.19 Heating temperature rise curve of each single cell in the battery pack

表 10 所示为侧面加热所需的加热功率及各单体电池间产生的最大温差。

由仿真所得的侧面加热方式下电池最大温差可知,选取侧面加热的方式电池最大温差为 1.15℃,此加热方式的温差在可接受范围内。并且选取侧面加热方法可以可靠地维持电池组中各单体电池的温度在 20~30℃。

表 10 侧面加热所需加热功率及最大温差

Table 10 The heating power and maximum temperature difference required for side heating

| 温度/℃ | 气压/kPa | 加热功率/W | 最大温差/℃ |
|------|--------|--------|--------|
| -1 | 75 | 0.040 | 1.15 |
| -7 | 67 | 0.035 | 1.01 |
| -14 | 58 | 0.029 | 0.91 |

3 结论

选取了青海地区典型光照较强地区所对应的气压和温度作为研究环境,以某款三元软包锂离子电池作为研究对象,开展在不同气压条件下的性能测试实验,从而测定该电池的热物理特性参数,建立集总参数热模型,研究不同环境下的热特性,并据此提出电池组热管理策略,通过实验验证了其可靠性,得出以下结论。

1) 电池传热规律:气压降低会导致电池的温升增加,同时内阻也随之增大,主要是因为欧姆内阻的增加。此外,当气压减小时,电池周围的对流换热能力也相应减弱,但熵系数的变化不受低气压影响。

2) 电池组热管理策略:在轻量化设计的前提下,研究推荐采用 6 mm 厚的气凝胶作为电池的保温材料,这是最合适的选择。在极端环境下,通过设计的加热方式,可以可靠地维持电池组中各单体电池的温度在 20~30 ℃ 的目标范围内。特别是侧面加热所需的功率较小,但会导致各单体电池之间的温差较大的情况。

参考文献

[1] 王利兵,张赞,郑炜,等.化石能源非能利用需求和碳排放研究[J].全球能源互联网,2023,6(6):577-587.
WANG Libing, ZHANG Yun, ZHENG Wei, et al. Research on demand and carbon emissions of non-energy use of fossil energy [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6 (6) : 577-587.

[2] 张烈辉,曹成,文绍牧,等.碳达峰碳中和背景下发展 CO₂-EGR 的思考[J].天然气工业,2023,43(1):13-22.
ZHANG Liehui, CAO Cheng, WEN Shaomu, et al. Thoughts on the development of CO₂-EGR under the background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43 (1) : 13-22.

[3] 刘斌,吉春霖,曹丽君,等.基于自适应噪声完全集合经验模态分解与 Bi LSTM-Transformer 的锂离子电池剩余使用寿命预测

[J].电力系统保护与控制,2024,52(15):167-177.
LIU Bin, JI Chunlin, CAO Lijun, et al. Prediction of remaining service life of lithium-ion batteries based on complete ensemble empiricalmode decomposition with adaptive noise and BiLSTM-Transformer [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52 (15):167-177.

[4] YANG R, XIE Y, LI K N, et al. Comparative study on the thermal characteristics of solid-state lithium-ion batteries [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(1) : 1541-1557.

[5] 刘博,尹杰,李然.基于改进粒子滤波的锂离子电池剩余寿命预测[J].电力系统保护与控制,2024,52(9):123-131.
LIU Bo, YIN Jie, LI Ran. Improved particle filter algorithm for remaining useful life prediction of lithium-ion batteries [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9) : 123-131

[6] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1):5.

[7] LIU J, CHAVAN S, KIM S C. Investigation of the electrochemical and thermal characteristics of NCM811-21700 cylindrical lithium-ion battery: a numerical study and model validation [J]. Energies, 2023, 16(17):6407.

[8] LIEBIG G, KIRSTEIN U, GEIBENDÖRFER S, et al. The impact of environmental factors on the thermal characteristic of a lithium-ion battery [J]. Batteries, 2020, 6(1):3.

[9] LIN X W, ZHOU Z F, ZHU X G, et al. Non-uniform thermal characteristics investigation of three-dimensional electrochemical-thermal coupled model for pouch lithium-ion battery [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417: 137912.

[10] MAYSAM S, ABARDEH R H. Air pressure dependence of natural-convection heat transfer [J]. Lecture Notes in Engineering & Computer Science, 2010, 2184(1) : 1183-1192

[11] 谢松,平现科,巩译泽.高原低气压环境对锂离子电池循环性能的影响[J].北京航空航天大学学报,2022,48(10):1883-1888.
XIE Song, PING Xianke, GONG Yize. Effect of high altitude and low pressure on cycle performance of lithium-ion batteries [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(10):1883-1888.

[12] 廖成龙,王刘涛,王健雁,等.动力锂电池系统运行环境条件对其性能影响的研究[J].化工新型材料,2020,48(7):167-170.
LIAO Chenglong, WANG Liutao, WANG Jianyan, et al. Study on the influence of operating environment condition on the performance of REESS [J]. New Chemical Materials, 2020, 48(7) : 167-170.

[13] 陈现涛,赵晨曦,刘杭鑫,等.低气压环境轴向压缩锂离子电池的机械性能[J].电池,2023,53(2):179-183.
CHEN Xiantao, ZHAO Chenxi, LIU Hangxin, et al. Mechanical

- properties of axially compressed Li-ion battery under low-pressure environment[J].*Battery Bimonthly*, 2023, 53(2): 179-183.
- [14] MENG D, WENG J W, WANG J. Experimental investigation on thermal runaway of lithium-ion batteries under low pressure and low temperature[J].*Batteries*, 2024, 10(7): 243.
- [15] 许乐俊, 王世林, 王勇, 等. 低压环境下锂离子电池热失控特性研究进展[J]. *电池*, 2023, 53(6): 687-691.
XU Lejun, WANG Shilin, WANG Yong, et al. Research progress in thermal runaway characteristics of Li-ion battery in low-pressure environments[J]. *Battery Bimonthly*, 2023, 53(6): 687-691.
- [16] PESARAN A, SANTHANAGOPALAN S, KIM G. Addressing the impact of temperature extremes on large format li-ion batteries for vehicle applications (presentation) [R]. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2013.
- [17] 李岳峰, 韦银涛, 彭宪州, 等. 海拔高度对储能锂电池包强制风冷系统影响的热仿真分析及优化设计[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(9): 2954-2961.
LI Yuefeng, WEI Yintao, PENG Xianzhou, et al. Thermal simulation analysis and optimal design for the influence of altitude on the forced air cooling system for energy storage lithium-ion battery pack[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(9): 2954-2961.
- [18] 平现科. 低气压环境下钴酸锂电池老化机理及热安全性能研究[D]. 四川: 中国民用航空飞行学院, 2023.
- [19] COOK R W, SWAN L G, PLUCKNETT K P. Failure mode analysis of lithium ion batteries operated for low Earth orbit CubeSat applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 31: 101561.
- [20] 孙庆, 沙树勇, 代云飞, 等. LiFePO₄ 电池空电态与满电态搁置性能研究[J]. *电动自行车*, 2012(2): 28-33.
- [21] 张兵, 叶树亮, 许金鑫, 等. 基于等温量热的锂离子电池熵热系数测量[J]. *电池*, 2023, 53(4): 378-382.
ZHANG Bing, YE Shuliang, XU Jinxin, et al. Entropy heat coefficient measurement of Li-ion battery by isothermal calorimetry [J]. *Battery Bimonthly*, 2023, 53(4): 378-382.
- [22] 王伟亮, 刘会巧, 张天宇, 等. 基于多任务集成学习的储能电池剩余使用寿命预测[J]. *电力建设*, 2024, 45(11): 25-33.
WANG Weiliang, LIU Huiqiao, ZHANG Tianyu, et al. Multi-task ensemble learning-based prediction of remaining useful life of energy-storage batteries[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(11): 25-33.
- [23] 肖威, 吴晓文, 孙静玲, 等. 储能锂电池模组温度场数值计算与散热系统优化设计[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(4): 1159-1166.
XIAO Wei, WU Xiaowen, SUN Jingling, et al. Numerical calculation of temperature field of energy storage battery module and optimization design of heat dissipation system [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(4): 1159-1166.
- [24] 常修亮, 李希超, 贾隆舟, 等. 过充循环老化电池产热特性[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(3): 685-697.
CHANG Xiuliang, LI Xichao, JIA Longzhou, et al. Heat generation characteristics of overcharged cyclic aging batteries [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(3): 685-697.
- [25] 哈尔滨工业大学, 国网黑龙江省电力有限公司. 方形软包锂离子电池热物性参数辨识方法: CN201810290295.9 [P]. 2018-10-19.
- [26] 刘全义, 朱倩, 朱文田, 等. 气凝胶毡组合放置方式对锂离子电池热失控特性的影响[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(6): 727-731.
LIU Quanyi, ZHU Qian, ZHU Wentian, et al. Effect of the combined placement of aerogel felts on the thermal runaway characteristics of lithium-ion batteries [J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(6): 727-731.
- [27] MAO Y K, YE Y L, ZHAO L Y, et al. Suppression of lithium-ion battery thermal runaway propagation by zirconia ceramics and aerogel felt in confined space [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 189: 1258-1273.

收稿日期: 2024-09-27

修回日期: 2024-12-05

作者简介:

杨启明(1977), 通信作者(12106730@ceic.com), 男, 主要从事研究水轮机及光伏运检相关工作;

沈雷雷(1990), 男, 主要从事自同步电压源的友好并网技术, 包括并网控制策略、同步技术、保护措施等方面的研究;

窦炳麟(1991), 男, 主要从事电力系统的实时运行监控、调度和控制相关工作;

许若凡(1999), 女, 硕士在读, 主要研究方向为动力电池安全性评估;

金炳辉(2004), 男, 学士在读, 主要研究方向为动力电池安全性评估与电池BMS管理。

(责任编辑 娄婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250332

考虑能量效率与状态参数均衡的储能单元功率分配优化方法

徐越飞¹, 吴非斐¹, 陈云龙¹, 沈景贵¹, 李江涛², 李知艺^{2*}

(1. 杭州电力设备制造有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:在电化学储能高速发展的背景下,为延长储能电站使用寿命,降低其全寿命周期运营成本,提出考虑能量效率与状态参数均衡的储能单元功率分配优化方法。该方法通过对变流器和电池组效率特性的精确建模,构建了完整的储能单元能量效率模型。在此基础上,考虑储能单元自身状态,分析储能在不同情况下的功率分配策略。通过构建双目标优化模型,即最小化系统总能耗并引导各储能单元状态参数趋于一致,采用决策型多目标遗传算法(decision making-multi-objective genetic algorithm, DM-MOGA)进行求解。算例结果表明,该方法不仅能够基于储能单元状态参数实现自适应功率分配,有效避免个别单元过度老化导致系统整体性能下降的问题,在能量损耗控制方面也表现出明显优势,为降低储能的运营成本提供新的参考。

关键词:储能单元;功率分配;能量效率;荷电状态;健康状态

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)01-0025-12

Optimization of Power Allocation for Energy Storage Units Considering Energy Efficiency and State Parameter Equilibrium

XU Yuefei¹, WU Feifei¹, CHEN Yunlong¹, SHEN Jinggui¹, LI Jiangtao², LI Zhiyi^{2*}

(1. Hangzhou Electric Power Equipment Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Against the backdrop of the rapid development of electrochemical energy storage, in order to extend the service life of energy storage power stations and reduce their operation costs over the entire life cycle, an optimization method for power allocation of energy storage units that takes into account energy efficiency and the equilibrium of state parameters is proposed. This method constructs a comprehensive energy efficiency model of the energy storage unit by accurately modeling the efficiency characteristics of both the converter and the battery pack. Based on this model, power allocation strategies for energy storage units are analyzed under different conditions taking into account the self-state of the energy storage unit. By establishing a bi-objective optimization model that simultaneously minimizes the system's total energy consumption and promotes the convergence of state parameters across all energy storage units toward equilibrium, the solution is obtained through the implementation of the decision making-multi-objective genetic algorithm (DM-MOGA). The results of the case study show that this method can not only achieve adaptive power allocation based on the state parameters of the energy storage units, effectively avoiding the problem of the overall system performance degradation caused by the excessive aging of individual units, but also demonstrate obvious advantages in controlling energy loss, providing a new reference for reducing the operation costs of energy storage.

Keywords: energy storage unit; power allocation; energy efficiency; state of charge; state of health

0 引言

为实现“双碳”目标,我国新能源装机占比不断

提升,高比例新能源的接入导致电网频率频繁波动、惯量支撑严重不足等问题^[1-2]。在此背景下,电化学储能(下文简称“储能”)由于其响应速度快,调节精度高,可灵活配置等优势^[3],目前正呈现出爆发式的增长态势。然而,在储能高速发展的背景下,由于储

基金项目:国家自然科学基金项目(52477132)。
National Natural Science Foundation of China(52477132)。

能建设成本高、管控模式不妥当等因素,储能电站普遍面临运营成本高、全寿命周期短等困境^[4]。因此,需要研究一种合适的运营管理策略来延长储能电站的使用寿命,扩大其全寿命周期收益。

储能电站内部通常是由多个储能单元串并联构成,由于各个储能单元存在前期的制造工艺和运行模式的差异,尽管差异微小,但时间的累积效应会加剧储能单元的不一致问题^[5]。再加之电池单元的“短板效应”,短板电池单元的性能衰退会加速整个储能电站的性能下降,导致电站提前退役^[6]。

对此,部分学者针对储能单元状态参数一致性的问题开展了相关研究。在管控储能单元荷电状态(state of charge, SOC)一致性方面,文献[7]基于级联脉宽调制变换器设计了6.6 kV 电池储能电站,重点研究储能单元间的SOC均衡控制。文献[8]提出双层优化管理策略,有效改善了储能单元能量状态的波动范围。文献[9]提出一种基于分层优化的锂离子电池组均衡控制方法,既能保证均衡控制的优化性能,又能适应复杂电池组的实际需求。文献[10]基于虚拟粒子一差分进化算法,提出以系统总能量损耗最小和SOC均衡度最优为目标的功率分配策略,但未考虑健康状态(state of health, SOH)对电池内部特性的影响。

储能电站的SOH直接影响其功率输出能力,其整体性能受“短板效应”的制约,即系统性能取决于SOH最差的储能单元,而不是SOH较好的单元^[11-12]。当部分储能单元的SOH显著降低时,会造成系统性能的不均衡。在管控储能SOH一致性方面,文献[13]通过建立考虑SOH差异的电池簇特性模型,设计分层控制框架。该框架通过差异化的功率分配来减缓高SOH电池簇的衰减速度,同时避免对低SOH电池簇的过度使用。文献[14]建立了基于SOH的梯次电池性能衰减模型,将SOH作为约束条件引入调度优化问题中,在保证系统经济性的同时有效延长梯次电池的使用寿命。文献[15]针对储能电站中SOH不均衡的问题,提出一种控制策略,该策略不仅考虑子模块级别的SOH均衡,还将电池单体均衡纳入整体控制框架中,实现了从系统层级到电池单体的全方位SOH均衡。

另外,储能单元的能量效率也会直接影响储能电站的运营成本,较低的能量效率不仅会导致过多的能量损失,还会导致储能单元为了达到预期输出功率,进行过多的充放电循环,加速储能老化。文献[16]表明,锂离子电池充放电能量效率主要受充放电倍率、工作温度、内部阻抗、充放电深度等影响。文献[17]分析了电化学储能电站中电池模块、储能变流器以及变压器等设备的工作特性和能耗规律,建立了储能单元和辅助用电系统的能耗模型。文献[18]基于高压直挂大容量储能电站,构建了电池簇能量利用率模型,旨在通过功率模块数的优化设计来提升系统效率和安全性。现有研究多将变流器、电池效率设为定值^[19-20],或通过电池稳态内阻计算电站能耗^[21-22],未考虑储能电站内部的电化学特征,忽略了电池内阻在不同SOC状态、运行时间等条件下的动态特性。

综上,现有研究一方面忽略了储能单元在不同负载率下的能量转换效率差异;另一方面,对储能单元的SOC和SOH的均衡控制通常是分开考虑的,缺乏统一的协调控制策略。因此,本文通过建立储能单元能量效率模型,同时考虑储能单元的SOC和SOH,以最小化储能单元总能量损耗为目标,实现基于自身状态的自适应功率分配,避免个别单元过度老化导致整体性能下降的问题。

1 考虑能效的储能单元功率分配

储能电站的能量效率问题是制约其商业化发展的关键技术瓶颈之一,该效率并非由单一因素决定,电站规模大小、实际运行工况以及所处环境条件等众多因素均会对其产生影响^[23]。特别地,储能电池组与储能变流器(power conversion system, PCS)的性能衰退会随时间演化而呈现出复杂的耦合关系^[24],这种耦合关系直接影响储能单元的整体能量效率。为实现储能运营效益的优化提升,有必要针对电池组和PCS的关键影响因素进行分析,以建立储能单元在不同运行工况下的效率模型。

1.1 储能变流器的效率特性

PCS在运行过程中不可避免地存在能量损耗^[25]。随着PCS负载率的变化,其能量损耗通常呈现出一定的规律,在低负载率时,开关损耗占比较

大,而高负载率时,导通损耗则逐渐成为主要的损耗部分。因此,采用PCS的负载率对其效率进行表示,具体为

$$\eta_{PCS} = 1 - \frac{a + b \cdot L_{PCS}^2}{b \cdot L_{PCS}^2 + c \cdot L_{PCS} + a} \quad (1)$$

式中: η_{PCS} 为PCS效率; a 、 b 、 c 均为PCS损耗随电流变化的拟合量; L_{PCS} 为PCS负载率。

1.2 储能电池组的效率特性

储能电池组的能耗模型主要受欧姆内阻、极化内阻、电流以及充放电功率的影响。在储能电站的实际运行过程中,直流侧功率值可通过直流电压与电流的乘积直接计算得出,且这一计算所得的直流侧功率值与系统下发的指令功率值在变化趋势上表现出高度一致性^[17]。基于这一特性,采用PCS的负载率来对电流进行等效的替换处理,有助于简化分析过程,且能在一定程度上反映出储能运行中的功率相关特性。因此,储能电池组的效率表达式为

$$\eta_{batt} = 1 - (A \cdot L_{PCS}^2 + A \cdot L_{PCS} + B) \quad (2)$$

式中: η_{batt} 为储能电池组的效率; A 为整个电池组欧姆内阻和极化内阻之和,并非为电池组内整个串联单体电池阻值的线性和; B 为电池组的效率修正拟合量。

1.3 储能单元的能量效率建模

为了能够精准、有效地对上述所构建的PCS效率模型、储能电池组效率模型予以评价,设定模型评价指标:确定系数 R^2 ,该系数主要用于体现模型在拟合方面所呈现出的效果,具体为:

$$X_{SSE} = \sum_{s=1}^n (y_s - \hat{y}_s)^2 \quad (3)$$

$$X_{SST} = \sum_{s=1}^n (y_s - \bar{y}_s)^2 \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{X_{SSE}}{X_{SST}} \quad (5)$$

式中: X_{SSE} 为残差平方和; X_{SST} 为总离差平方和; y_s 为第 s 个实际观测值; \hat{y}_s 为通过所构建的模型对能量效率进行计算得到的第 s 个估计值; \bar{y}_s 为第 s 个实际观测值的平均值; R^2 越接近1,表示该模型对数据拟合的效果越好; n 为观测总个数。

综上,将PCS效率和电池组效率相乘即得到第 i 个储能单元的效率 η_i 为

$$\eta_i = \eta_{PCS,i} \cdot \eta_{batt,i} \quad (6)$$

当在各个储能单元之间进行功率分配时,应使得参与调节的储能单元总能量损失最小,目标函数为

$$F_1 = \min \sum_{i=1}^K P_i \cdot (1 - \eta_i) \quad (7)$$

式中: K 为参与调节的储能单元数量; P_i 为第 i 个储能单元的输出功率值。

2 考虑SOC和SOH的储能单元功率分配

储能的SOC和SOH均衡管理构成了降低其运营成本的关键技术支撑。SOC均衡不仅关系储能的即时性能发挥,更直接影响系统的长期可靠性。从电化学机理来看,电量分布的非均衡性会导致局部储能单元过度充放电,加速其性能衰退进程。通过SOC均衡控制,可以使各储能单元的工作状态保持在最优区间,有效抑制局部过充过放现象。SOH均衡则从更本质的层面体现了储能电站的性能一致性特征。通过建立SOH的自适应均衡策略,可以实现储能单元性能的动态匹配,确保系统在面对复杂多变的工况时能够保持稳定的输出特性。因此,以下分别分析储能在参与电能量市场、调频市场两种常见场景时各储能单元的功率分配情况,以实现SOC与SOH的协同均衡。储能单元功率分配结构如图1所示。

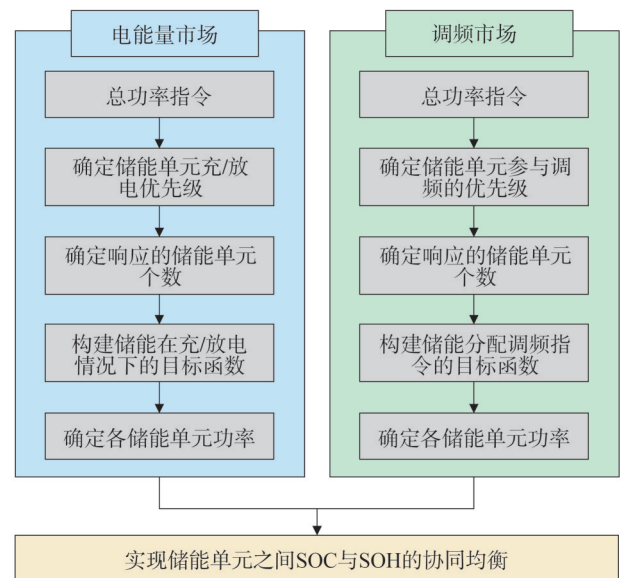


图1 储能单元功率分配结构图

Fig.1 Power allocation structure diagram of energy storage units

2.1 储能参与电能量市场的功率分配

电池充放电特性实验表明,当电池 SOC 在充电超过 90% 或放电低于 10% 时,其内部可能因极化反应引发性能与安全问题。因此,整个储能单元之间的功率分配过程均设置 SOC 超过 90% 禁止充电, SOC 低于 10% 禁止放电,后文不再赘述。当储能单元在某时段内仅参与电能量市场时,即功率指令在该小时内只为正(或负)。首先,根据 SOC 对可用储能单元的充电优先级 X_c 、放电优先级 X_d 进行排序,其值越小,优先级越高,具体如下:

$$X_c = \begin{cases} 1/\sin(1 - S_{OCi}), 0 \leq S_{OCi} < 0.9 \\ \infty, 0.9 \leq S_{OCi} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$X_d = \begin{cases} 1/\sin(S_{OCi}), 0.1 < S_{OCi} \leq 1 \\ \infty, 0 \leq S_{OCi} \leq 0.1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: S_{OCi} 为储能单元 i 的 SOC 值。

其次根据总功率指令,确定参与响应的储能单元个数为

$$K = \left\lceil \left[P_{ea} / (P_N \cdot \beta) \right] + 1, K \leq N \right. \quad (10)$$

式中: P_{ea} 为总功率指令; P_N 为储能单元的额定功率; $\lceil \cdot \rceil$ 为取整计算; β 为储能单元最低充放电效率限值,取值为 0.8; N 为储能电站中储能单元的总数量。

最后,设定储能单元输出功率的最小限值和最大限值为

$$\beta \cdot P_N \leq P_i \leq P_N \quad (11)$$

若该小时需充电,储能单元执行充电任务时,其荷电状态值 SOC 低于平均值的储能单元比 SOC 高于平均值的储能单元优先接收调节指令,并且在多个 SOC 低于平均值或者高于平均值的储能单元中,依据储能单元 SOC 从高到低的优先级来分配指令,为此构建如下目标函数:

$$F_2 = \max \sum_{i=1}^K w_i \cdot \sigma(1 - X_c) \cdot P_i^2 \quad (12)$$

$$w_i = \begin{cases} \frac{H_i}{\sum_{j \in M} H_j}, S_{OCi} < \overline{S_{OC}} \\ \frac{H_i}{\sum_{k \in N} H_k}, S_{OCi} \geq \overline{S_{OC}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\overline{S_{OC}} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K S_{OCi} \quad (14)$$

$$H_i = 1 - \frac{\int_0^t \Delta E_i(k) dk}{2n_{100\%} E_i} \quad (15)$$

$$\Delta E_i(t) = P_i^c(t) \eta_i \Delta t + \frac{P_i^d(t) \Delta t}{\eta_i} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^K P_i = P_{ea} \quad (17)$$

式中: w_i 、 $\sigma(\cdot)$ 分别为平衡状态参数时储能单元 i 的 SOH 权重、SOC 权重函数; $\overline{S_{OC}}$ 为参与调节的所有储能单元 SOC 的平均值; H_i 为储能单元 i 的 SOH 值; ΔE_i 为储能单元 i 的累计充放电量; $n_{100\%}$ 为储能单元在百分百充放电深度下的循环次数; E_i 为储能单元 i 的额定容量; M 为 SOC 低于平均值的储能单元个数; $\Delta E_i(t)$ 为储能单元 i 的累计充放电量; $P_i^c(t)$ 为 t 时刻储能单元 i 的充电功率; $P_i^d(t)$ 为 t 时刻储能单元 i 的放电功率。

对于 SOC 状态低于平均值的储能单元,其权重 $w_i = H_i / \sum_{j \in M} H_j$,而对于 SOC 状态高于平均值的储能单元,其权重 $w_i = H_i / \sum_{k \in N} H_k$ 。由于分母分别是各自集合内的 SOH 总和,且通常情况下, $\sum_{j \in M} H_j$ 小于 $\sum_{k \in N} H_k$,所以在相同 SOH 下, SOC 低于平均值的储能单元权重会更大,从而能优先承担充电指令。同理,在多个 SOC 低于平均值的储能单元之间,权重与各自的 SOH 成正比,即 SOH 越好, H_i 越大,其权重 w_i 也就越大,因此 SOH 好的储能单元将承担更多的充电指令。

因此,储能单元参与电能量市场且需要充电的时段,功率分配目标函数为

$$\begin{cases} F_1 = \min \sum_{i=1}^K P_i \cdot (1 - \eta_i) \\ F_2 = \min \left(- \sum_{i=1}^K w_i \cdot \sigma(1 - X_c) \cdot P_i^2 \right) \end{cases} \quad (18)$$

若该时段需放电,储能单元执行放电任务时,储能单元承担功率指令时的优先级与充电时相反。此时目标函数 F_3 与充电类似,但权重设置不同:

$$F_3 = \max \sum_{i=1}^K \nu_i \cdot \sigma(1 - X_d) \cdot P_i^2 \quad (19)$$

$$\nu_i = \begin{cases} \frac{H_i}{\sum_{j \in N} H_j}, S_{OCi} < \overline{S_{OC}} \\ \frac{H_i}{\sum_{k \in M} H_k}, S_{OCi} \geq \overline{S_{OC}} \end{cases} \quad (20)$$

SOC 状态优先级体现在放电时,由于分母的大小关系与充电时相反,所以在相同 SOH 下,高于平均值的储能单元权重更大,能优先承担功率指令,满足设计要求。SOH 优先级体现在各自的区间内,SOH 越好,权重越大,即 SOH 好的储能单元会承担更多的功率指令。

因此,储能参与电能量市场且需要放电的时段,功率分配目标函数为

$$\begin{cases} F_1 = \min \sum_{i=1}^K |P_i| \cdot (1 - \eta_i) \\ F_3 = \min (-\sum_{i=1}^K \nu_i \cdot \sigma(1 - X_{id}) \cdot P_i^2) \end{cases} \quad (21)$$

由于放电时功率设定为负值,为了最小化能量损失,需要对 F_1 中的功率添加绝对值符号。

2.2 储能参与调频市场的功率分配

若储能在某时段内参与调频,即功率指令在该时段内可正可负,与参与电能量市场不同,由于调频指令每 2 s 变化一次,且前后两次存在充放电状态转变的可能,同时考虑响应的调频指令在某段时间内呈能量中性,因此需要优先选择 SOC 在 0.5 左右的储能单元。

首先,依据储能单元的 SOC 对参与调频的储能单元进行优先级排序为

$$Y_i = \frac{1}{1 + \alpha |S_{OCi} - 0.5|} \quad (22)$$

式中: α 为权重系数; Y_i 越大,储能单元 i 的优先级越高。

然后,根据中标的调频容量确定参与调频的储能单元个数 J 为

$$J = \left\lceil \frac{P_{tr}}{(P_N \cdot \beta)} \right\rceil + 1, J \leq N \quad (23)$$

式中: P_{tr} 为调频的中标容量。

最后,在参与调频的储能单元之间,根据储能单元的 SOH 由高到低的优先级分配调频指令。构建的目标函数为:

$$F_4 = \max \sum_{i=1}^J h_i \cdot m_i \cdot P_i^2 \quad (24)$$

$$h_i = \frac{H_i}{\sum_{j \in J} H_j} \quad (25)$$

$$m_i = \frac{Y_i}{\sum_{j \in J} Y_j} \quad (26)$$

当储能单元 i 的 SOC 越靠近 0.5 时,其权重 Y_i 也就越大,所以在 SOH 相同的情况下,该类储能单元能够承担更多的调频指令;在 SOC 相近的情况下, h_i 越大时,在参与调频的储能单元中 SOH 越好的储能单元能承担更多的调频指令,满足要求。

此外,储能在参与调频时还要满足功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^J P_i = P_{tr} \cdot r_n \quad (27)$$

式中: r_n 为第 n 个调频信号,取值范围为 $[-1, 1]$ 。

因此,储能在参与调频的时段,功率分配应满足如下目标函数:

$$\begin{cases} F_1 = \min \sum_{i=1}^J |P_i| \cdot (1 - \eta_i) \\ F_4 = \min (-\sum_{i=1}^J h_i \cdot y_i \cdot P_i^2) \end{cases} \quad (28)$$

2.3 基于 DM-MOGA 的模型求解

决策型多目标遗传算法 (decision making-multi-objective genetic algorithm, DM-MOGA) 是一种结合决策偏好的多目标遗传算法,其核心思想是在进化过程中引入决策者的偏好信息,从而更有效地指导搜索过程向决策者期望的区域发展^[26]。本文构建了 4 个关键目标函数,分别针对能量效率优化和 3 种功率分配场景(电能量市场充电、电能量市场放电和调频市场),上述目标函数需要同时兼顾能量效率与状态参数均衡,形成典型的多目标优化问题。为解决这一问题,本文采用 DM-MOGA 算法进行求解。算法的数学表达主要包括多目标优化问题的基本形式、决策偏好的权重向量表示以及基于决策偏好的适应度计算。

多目标优化问题一般可表示为

$$\min \mathbf{F}(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T \quad (29)$$

满足约束条件为

$$\begin{cases} \varphi_e(x) \leq 0, e = 1, 2, \dots, p \\ \xi_f(x) = 0, f = 1, 2, \dots, q \\ x_1 \leq x \leq x_u \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\mathbf{F}(x)$ 为由 m 个目标函数组成的向量; $\varphi_e(x)$ 为不等式约束; $\xi_f(x)$ 为等式约束; p, q 分别为不等式约束个数和等式约束个数; x_1, x_u 分别为决策变量的上、下限。

则决策者的偏好以效用函数表示为

$$U(\mathbf{F}(x)) = \sum_{\tau=1}^m \omega_{\tau} \cdot f_{\tau}(x) \quad (31)$$

式中: ω_{τ} 是决策者对第 τ 个目标的权重。

DM-MOGA 的执行过程可分为初始阶段和迭代优化阶段。初始阶段主要包括准备输入数据、设置约束条件以及初始化算法 3 个步骤。准备输入数据阶段须导入储能单元 SOC、累计充放电电量等参数以及功率指令类型,然后根据电能市场或调频市场选择相应的目标函数。设置约束条件涉及 SOC 限制、功率平衡约束以及储能单元功率上下限约束。DM-MOGA 初始化过程中,随机生成表示不同功率分配方案的初始种群,并基于系统能量效率与状态参数均衡的重要性设置决策偏好权重。

进入迭代优化阶段后,算法首先进行适应度评估,根据不同场景应用相应的目标函数:充电功率分配采用式(18),放电功率分配采用式(21),调频功率分配采用式(28)。适应度评估完成后,执行进化算子操作,包括非支配排序、基于决策偏好的选择、交叉操作和自适应变异。其中,交叉操作和变异操作将基于储能单元 SOC 和 SOH 状态动态调整变异概率,以保证生成的解更符合实际储能系统特性。每一代进化中,算法采用精英保留策略,直接将部分优秀个体传递给下一代。每一代进化结束时,算法都会根据当前种群的分布情况,动态更新参考点和决策者偏好,以此调整搜索方向。当达到最大迭代次数或满足收敛条件时,算法输出最优功率分配结果,并计算出总能量损耗。基于 DM-MOGA 的储能单元功率分配求解流程如图 2 所示。

相较于非支配排序遗传算法 II,DM-MOGA 在非劣排序后引入决策偏好机制,通过权重或优先级动态调整帕累托解的选择,直接服务于实际决策需

求,有效避免了解集冗余问题^[27]。在算法设计层面,DM-MOGA 将拥挤距离计算与自适应变异策略相结合,不仅能保持种群的多样性,还显著提升了收敛速度^[28]。与多目标粒子群优化算法相比,该算法在计算效率方面展现出明显优势。

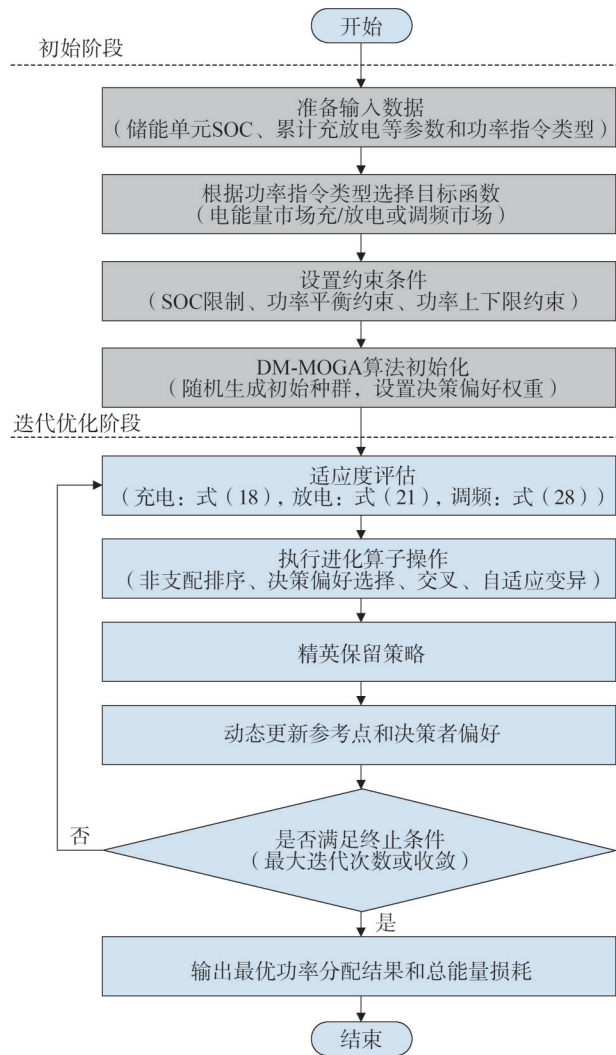


图2 基于DM-MOGA的储能单元功率分配求解流程图
Fig.2 Flow chart of the power allocation obtained from the DM-MOGA algorithm

3 算例分析

3.1 算例数据场景

以浙江某市的共享储能电站项目作为参考,在该项目中,每套 2.5 MW 变流升压一体机的构成包括 2 台 1.25 MW 的 PCS 以及 1 台 2.5 MVA 的升压变压器。现假定某储能电站的装机容量为

10 MW/20 MWh,单个储能单元为 1.25 MW/2.5 MWh,共计 8 个储能单元。各个储能单元的初始 SOC、累计充放电电量以及 SOH 如表 1 所示。

根据已有数据^[29]对 PCS 的效率表达式进行拟合得到 $a = 0.06238$ 、 $b = 0.275$ 、 $c = 13.06$,并且拟合的确定系数为 0.9584,表明该拟合结果适配。

同理,对储能电池组的效率表达式^[30]进行拟合得到 $A = 0.04159$,该值表示电池组的内阻之和为 $41.59\text{ m}\Omega$, $B = -2.16 \times 10^{-9}$,拟合的确定系数为 0.9702,拟合结果如图 3 所示。

表 1 各储能单元初始状态参数

Table 1 Initial state parameters of each energy storage unit

| 编号 | SOC | 累计充放电电量/MWh | SOH |
|----|------|-------------|-------|
| 1 | 0.42 | 1320 | 0.912 |
| 2 | 0.40 | 1450 | 0.903 |
| 3 | 0.54 | 720 | 0.952 |
| 4 | 0.61 | 600 | 0.960 |
| 5 | 0.62 | 540 | 0.964 |
| 6 | 0.58 | 640 | 0.957 |
| 7 | 0.51 | 900 | 0.940 |
| 8 | 0.47 | 1150 | 0.923 |

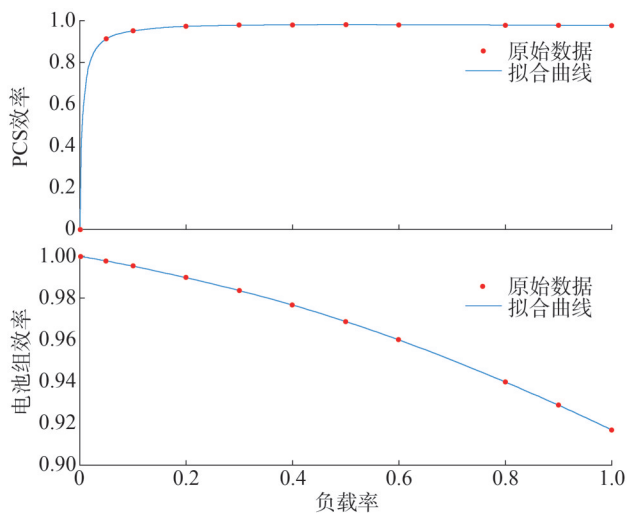


图 3 拟合结果图

Fig.3 Fitting result diagram

储能单元效率为 PCS 效率和电池组效率相乘,如图 4 所示。

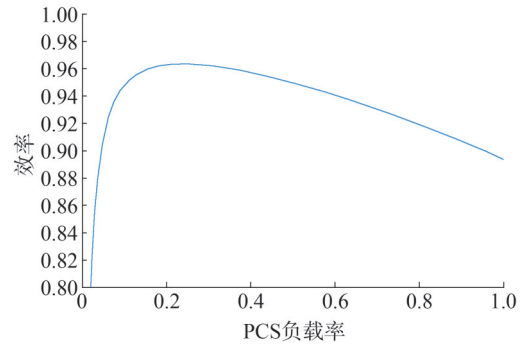


图 4 储能单元总效率曲线图

Fig.4 Total efficiency curve of energy storage unit

3.2 基于电能量市场的储能单元功率分配

根据储能的实际应用场景,在初始状态相同的情况下,分别计算充电功率指令为 0~10 MW 时,储能电站下各个储能单元的功率分配情况。首先根据各储能单元的 SOC 确定充电优先级;然后根据总功率指令确定参与调节的储能单元个数,最后依据目标函数确定各个储能单元的功率。各储能单元充电优先级如表 2 所示,不同功率指令下参与调节的储能单元个数如表 3 所示。

表 2 各储能单元充电优先级

Table 2 Charging priority of each energy storage unit

| 储能编号 | X_c |
|------|---------|
| 2 | 1.771 0 |
| 1 | 1.824 7 |
| 8 | 1.978 1 |
| 7 | 2.124 8 |
| 3 | 2.252 5 |
| 6 | 2.452 4 |
| 4 | 2.630 3 |
| 5 | 2.696 0 |

表3 不同功率指令下参与调节的储能单元个数

Table 3 The number of energy storage units participating in regulation under different power commands

| 功率指令/MW | 参与调节的储能单元个数 |
|---------|-------------|
| 1 | 2 |
| 2 | 3 |
| 3 | 4 |
| 4 | 5 |
| 5 | 6 |
| 6 | 7 |
| 7 | 8 |
| 8 | 8 |
| 9 | 8 |
| 10 | 8 |

储能电站在接收充电功率指令后,会根据各储能单元的充电优先级进行功率分配,确保 SOC 较低的储能单元能够优先充电。此外,储能电站中各个储能单元所承担功率的多少与其自身的 SOH 密切相关。以功率指令为充电时为例,SOH 较高的储能单元因其具备更好的性能和容量保持能力,会被分配承担更多的功率任务,能够让 SOH 高的储能单元“多动深动”,SOH 低的储能单元“少动浅动”。具体如图 5 所示,此处展示的是在接收 1~10 MW 的充电指令时,分配给各个储能单元的功率值,图 5 中数据表示各储能单元接受相应充电指令时的输出功率。

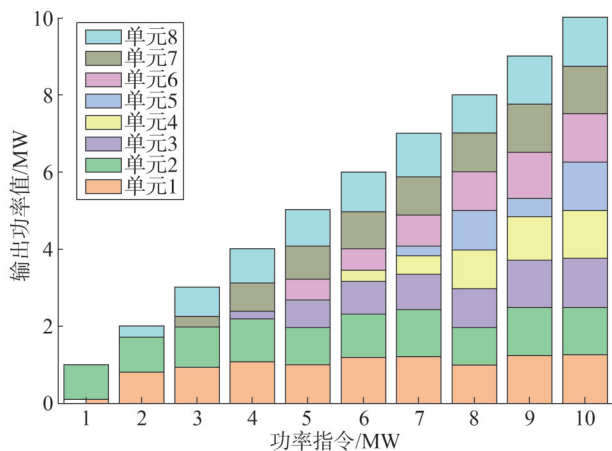


图5 不同功率指令下各储能单元输出功率情况

Fig.5 The output power conditions of each energy storage unit under different power commands

由图 6 可知,SOH 较高的储能单元,即编号为 4、5、6 的储能单元被分配承担更多功率,而 SOH 较低的单元,即编号 1、2 的储能单元则承担相对较少的功率。这种基于 SOH 差异的自适应功率分配策略,能够使整个储能电站的 SOH 趋向于均衡状态,有效减少因个别单元过度老化而导致的系统性能下降问题,从而延长储能电站的整体使用寿命。

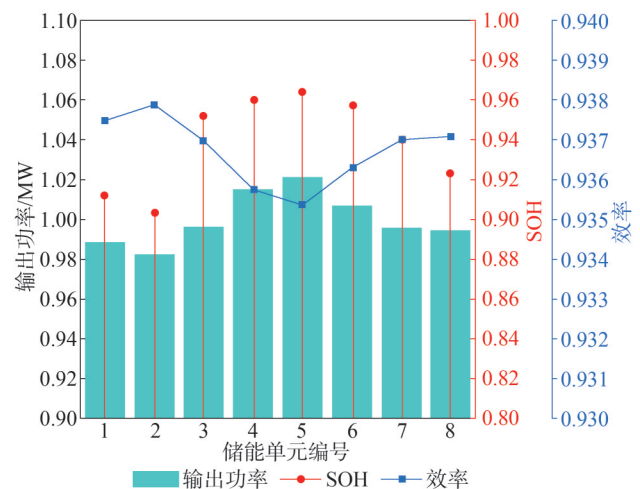


图6 指令为 8 MW 时各储能单元情况

Fig.6 The situations of each energy storage unit when the command is 8 MW

另外,各个储能单元的运行效率稳定维持在 93%~94% 这一较高水平区间内,极大程度地削减了储能单元在能量转换过程中的总能量损耗,有效避免了因能量流失而造成的资源浪费与成本增加。确保储能在其全生命周期内能够以较低的成本实现能源存储与释放,有效提升储能电站的经济性。

3.3 基于调频市场的储能单元功率分配

假定储能的初始状态同 3.1 节不变,中标的调频容量为 10 MW,储能所响应的调频信号为-1~1 之间的均匀分布值。根据式(23)算得,此时参与调频的储能单元为 8 个,各个储能单元的功率分配情况如图 7 所示。

在实际的运行场景中,调频指令具有高度的随机性,与理想状态下的规律性指令不同,实际的调频指令不会呈现出如图 7 所示具有明显对称性的功率

分布情况,但调频指令在整体上是遵循能量中性原则的。图7采用具有对称性的指令功率进行展示,其主要目的在于通过这种相对简化的方式,清晰地说明在特定功率范围区间内,各个储能单元的输出功率大致情况。以调频指令取7 MW为例,分析各个储能单元功率分配与SOC和SOH的关系如图8所示。

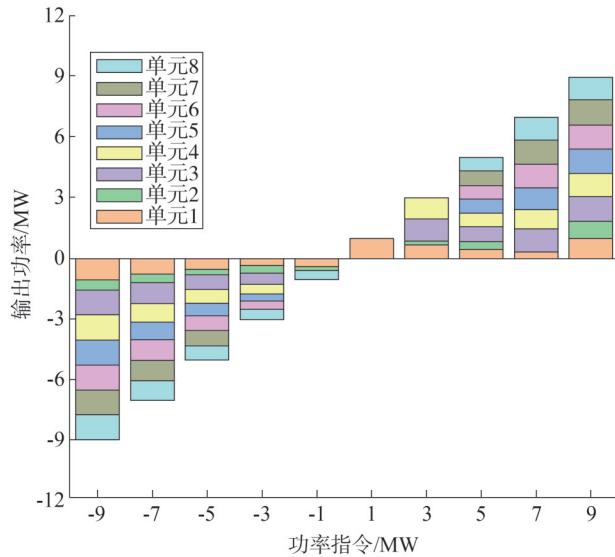


图7 不同功率指令下各储能单元输出功率情况

Fig.7 The output power status of each energy storage unit under different power instructions

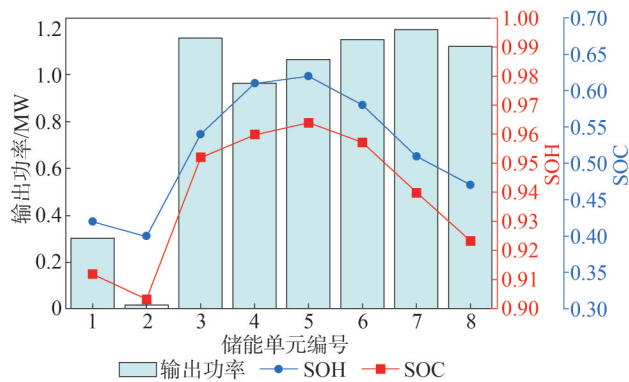


图8 指令为7 MW时各储能单元情况

Fig.8 The situations of each energy storage unit when the command is 7 MW

通过图8可以看出,编号2的储能单元SOC与SOH在所有储能单元中处于相对较低的水平。基于SOH较小的储能单元尽量“少动浅动”的原则,该单元所承担的功率指令最少,有效地避免了其过度损

耗和性能的加速劣化。此外,由于本次储能单元所响应的是调频指令,就储能单元参与调频而言,当SOC的数值越接近0.5时,其调频能力就越强,能够更为高效精准地对调频指令做出响应。编号为3、7和8的储能单元SOC值均接近0.5这一理想状态,因此在功率分配上,上述3个储能单元所承担的功率相对较大,充分体现了系统能够根据不同应用场景的需求,自适应调整功率分配,展现出极强的场景适应性。

3.4 不同策略下的能耗对比

在应对不同功率指令时,各个储能单元所负责的功率分配情况都会产生相应的变化。就当前而言,储能单元承担的功率不仅与自身的SOC、SOH存在关联,在进行功率分配的过程中,还将以最小化储能单元总能量损失作为重要的考量目标,从而确保整个储能电站的运行效率达到最优。相较于传统的平均分配策略,本文所采用的策略在总能量损失方面有较为明显的改观,具体如表4所示。

表4 两种策略下的能量损失对比

Table 4 Comparison of energy losses between the two strategies

| 功率指令/MW | 均分策略总能量损失/MWh | 本文策略总能量损失/MWh |
|---------|---------------|---------------|
| 4.84 | 0.163 | 0.058 |
| 4.35 | 0.138 | 0.046 |
| 3.88 | 0.118 | 0.097 |
| 3.20 | 0.094 | 0.095 |
| 3.96 | 0.121 | 0.008 |
| 6.35 | 0.259 | 0.004 |
| 6.55 | 0.274 | 0.004 |
| 6.88 | 0.301 | 0.004 |
| 7.22 | 0.330 | 0.002 |
| 10.00 | 0.647 | 0.106 |

表4中总能量损失是假设储能在当前功率指令下运行1h算得,通过表4可以发现,本文所采用策略导致的总能量损失相较于均分策略少了2.02MWh,进而凸显出该策略在储能电站功率分配优化方面的优势和价值,能有效降低储能电站的运营成本。

4 结束语

本文提出一种考虑能量效率与状态参数均衡的储能单元功率分配优化方法。首先,通过对变流器和电池组效率特性的精确建模,构建了完整的储能单元能量效率模型,克服了以往研究中将变流器、电池效率简化为定值的局限性。其次,针对储能参与电能量市场和调频市场两种典型场景,系统分析了不同工况下的功率分配策略,实现了对储能单元SOC和SOH的协同均衡控制。最后,基于储能单元的状态参数,构建了以系统总能耗最小化为目标的优化函数,并提出了基于DM-MOGA算法的求解方案,有效平衡了计算效率与优化性能。

算例结果表明,所提方法能够实现基于储能单元状态的自适应功率分配,使SOH较高的储能单元“多动深动”,SOH较低的储能单元“少动浅动”,有效避免了个别单元过度老化导致系统整体性能下降的问题,从而延长了储能电站的使用寿命。同时,相比传统的均分策略,所提方法在同等条件下能显著降低系统能量损耗,为降低储能电站的运营成本提供了新的参考。然而,本研究中仅建立了功率分配小时级的决策模型,但未考虑短期(分钟级)、长期(天级)的决策情况。后续的研究中可以考虑构建一个多层次的协同优化框架,短期层面注重能量损耗的实时优化,长期层面则侧重电池SOH的维护,实现对即时效率和长期寿命的统筹兼顾。

参考文献

- [1] 辛保安,单葆国,李琼慧,等.“双碳”目标下“能源三要素”再思考[J].中国电机工程学报,2022,42(9):3117-3126.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J].Proceedings of the CSEE,2022,42(9):3117-3126.
- [2] 张忠静,刘磊,蔡永翔,等.新型电力系统下大规模新能源接入配电网的线损变化趋势分析[J].电力大数据,2024,27(2):11-22.
ZHANG Zhongjing, LIU Lei, CAI Yongxiang, et al. Analysis of line loss change trend of large-scale new energy access distribution network under new power system[J].Power Systems and Big Data, 2024,27(2):11-22.
- [3] 刘志清,王春义,王飞,等.储能在电力系统源网荷三侧应用及相关政策综述[J].山东电力技术,2020,47(7):1-8.
LIU Zhiqing, WANG Chunyi, WANG Fei, et al. Source-grid-load application of energy storage in electric power system and related policy overview[J].Shandong Electric Power,2020,47(7):1-8.
- [4] 撤奥洋,何俊峰,张冰,等.大容量电池储能电站在山东电网应用的可行性分析[J].山东电力技术,2019,46(5):30-34.
HAN Aoyang, HE Junfeng, ZHANG Bing, et al. Feasibility analysis of the application of large capacity battery energy storage power station in Shandong power grid[J].Shandong Electric Power,2019,46(5):30-34.
- [5] 段双明,于航,刘聪,等.考虑储能单元健康状态与荷电状态一致性的BESS功率分配策略[J].电力系统自动化,2023,47(5):65-73.
DUAN Shuangming, YU Hang, LIU Cong, et al. Power allocation strategy for battery energy storage system considering consistency of state of health and state of charge of energy storage units [J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(5):65-73.
- [6] ZHAO S S, ZHANG C L, WANG Y Z. Lithium-ion battery capacity and remaining useful life prediction using board learning system and long short-term memory neural network [J]. Journal of Energy Storage,2022,52:104901.
- [7] GADALLA A S, YAN X W, HASABELRASUL H. State-of-charge balancing control strategy for battery energy storage systems based on a modern cascaded multilevel PWM converter [C]//2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018). IEEE, 2018: 1-6.
- [8] 苏浩,张建成,王宁,等.基于分层优化的大容量混合储能系统能量管理策略[J].高电压技术,2018,44(4):1177-1186.
SU Hao, ZHANG Jiancheng, WANG Ning, et al. Energy management strategy of large-scale hybrid energy storage system based on layered optimization[J].High Voltage Engineering,2018,44(4):1177-1186.
- [9] OUYANG Q, HAN W J, ZOU C F, et al. Cell balancing control for lithium-ion battery packs: a hierarchical optimal approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5065-5075.
- [10] 陈薇,侯杨成,张里,等.计及损耗的钒电池储能系统功率优化分配策略[J].电工技术学报,2020,35(19):4038-4047.

- CHEN Wei, HOU Yangcheng, ZHANG Li, et al. Power optimization allocation strategy for vanadium battery energy storage system considering loss [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19):4038-4047.
- [11] 李凯, 胡丽, 宋婷婷. 基于 CNN-Bi-LSTM 的锂离子电池健康状态估算[J]. 山东电力技术, 2023, 50(10):66-72.
LI Kai, HU Li, SONG Tingting. Health state estimation of lithium-ion batteries based on CNN-Bi-LSTM [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(10):66-72.
- [12] 李建林, 李雅欣, 陈光, 等. 退役动力电池健康状态特征提取及评估方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4):1332-1347.
LI Jianlin, LI Yaxin, CHEN Guang, et al. Research on feature extraction and SOH evaluation methods for retired power battery [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4):1332-1347.
- [13] 彭昊, 罗正经, 夏向阳, 等. 储能系统多电池簇健康状态均衡控制策略[J]. 中国电力, 2024, 57(6):45-52.
PENG Hao, LUO Zhengjing, XIA Xiangyang, et al. Health state equalization control strategy for multi-battery clusters in energy storage systems [J]. Electric Power, 2024, 57(6):45-52.
- [14] LI X J, MA R, YAN N, et al. Research on optimal scheduling method of hybrid energy storage system considering health state of echelon-use lithium-ion battery [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8):0604204.
- [15] MA Z, HAO T Q, GAO F, et al. Enhanced SOH balancing method of MMC battery energy storage system with cell equalization capability [C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2018:3591-3597.
- [16] 于维珂, 汪涛, 杨尘. 储能用锂离子电池充放电能量效率的影响因素[J]. 电池, 2020, 50(6):552-555.
YU Weike, WANG Tao, YANG Chen. Influence factors of charge-discharge energy efficiency of Li-ion battery for energy storage [J]. Battery Bimonthly, 2020, 50(6):552-555.
- [17] 田刚领, 叶晖, 谢佳, 等. 锂离子电池储能电站能耗优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(3):1118-1127.
TIAN Gangling, YE Hui, XIE Jia, et al. Energy consumption optimization of lithium-ion battery storage power station [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3):1118-1127.
- [18] 刘畅, 吴西奇, 姜新宇, 等. 高压直挂大容量储能系统的电池堆分割方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(19):7483-7497.
LIU Chang, WU Xiqi, JIANG Xinyu, et al. Battery stack segmentation method of the large-capacity high-voltage transformerless battery energy storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(19):7483-7497.
- [19] HASSANPOUR N, CHUB A, YADAV N, et al. High-efficiency partial power converter for integration of second-life battery energy storage systems in DC microgrids [J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5:847-860.
- [20] LI X N, LYU L X, GENG G C, et al. Power allocation strategy for battery energy storage system based on cluster switching [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4):3700-3710.
- [21] 丁杨, 唐培全, 张文奎, 等. 考虑涉网一次调频考核要求面向风储联合系统收益优化的储能容量配置[J]. 山东电力技术, 2025, 52(2):46-54.
DING Yang, TANG Peiquan, ZHANG Wenkui, et al. Optimal allocation of energy storage for profit optimization in wind-storage systems considering primary frequency regulation examinations [J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(2):46-54.
- [22] 张文昕, 赵志勇, 于华龙, 等. 适用于直流链式储能的电池簇荷电状态自均衡控制策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(2):159-166.
ZHANG Wenxin, ZHAO Zhiyong, YU Hualong, et al. Self-equalizing control strategy for state of charge of battery cluster in DC cascaded H-bridge converter-battery energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2):159-166.
- [23] 魏文荣, 苗世洪, 王廷涛, 等. 计及储能电站荷电状态恢复和调整的电力系统调频指令最优分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(增刊1):53-65.
WEI Wenrong, MIAO Shihong, WANG Tingtao, et al. Optimal distribution method for frequency regulation commands considering the state of charge recovery and adjustment [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1):53-65.
- [24] CHEN Y, LIU X F, CUI Y Y, et al. A MultiWinding transformer cell-to-cell active equalization method for lithium-ion batteries with reduced number of driving circuits [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7):4916-4929.
- [25] 张浩. 储能山东电网中的应用前景展望[J]. 山东电力技术, 2021, 48(7):26-30.
ZHANG Hao. Application prospect of energy storage in Shandong power grid [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(7):26-30.
- [26] YANG W J, LI Y D, WANG H G, et al. Multi-objective optimization of high-power microwave sources based on multi-criteria decision-making and multi-objective micro-genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(7):3892-3898.
- [27] ZHAO L D, WANG B, JIANG X P, et al. DIP-MOEA: a double-grid interactive preference based multi-objective evolutionary algorithm for formalizing preferences of decision makers [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2022, 23(11):1714-1732.
- [28] 喻寅昀, 李从东, 付业林, 等. 考虑决策者偏好结构的交叉效率评价方法[J]. 中国管理科学, 2024, 32(8):117-126.
YU Yinyun, LI Congdong, FU Yelin, et al. A cross-efficiency

evaluation method considering decision maker preference structure [J]. Chinese Journal of Management Science, 2024, 32 (8) : 117-126.

- [29] 李相俊,马锐.考虑电池组健康状态的储能系统能量管理方法[J].电网技术,2020,44(11):4210-4217.

LI Xiangjun, MA Rui. Energy management method of energy storage system considering the SOH of battery pack [J]. Power System Technology, 2020, 44(11):4210-4217.

- [30] 叶晖,李爱魁,田刚领,等.考虑能量效率和SOC均衡的电池储能电站双层功率分配策略[J].中国电机工程学报,2024,44(13):5185-5196.

YE Hui, LI Aikui, TIAN Gangling, et al. Double - layer power distribution strategy for battery storage power station considering energy efficiency and state-of-charge balance [J]. Proceedings of

the CSEE, 2024, 44(13): 5185-5196.

收稿日期:2025-04-18

修回日期:2025-08-01

作者简介:

徐越飞(1976),男,工程师,从事电气工程领域研究工作;

吴非斐(1980),女,工程师,从事电气工程领域研究工作;

陈云龙(1995),男,硕士,工程师,从事电力系统及其自动化领域

研究工作;

沈景贵(1988),男,工程师,从事电气工程领域研究工作;

李江涛(1999),男,硕士,从事电化学储能技术应用研究工作;

李知艺(1989),通信作者(zhiyi@zju.edu.cn),男,博士,研究员,从事电力储能应用、新型电力系统规划及运行等研究工作。

(责任编辑 张丹丹)

基于CVTs空间划分的主动配电网有功无功协调优化

李彬, 崔玮晋*, 张凯伯

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要:大规模分布式光伏接入配电网后,由于光伏发电的间歇性和波动性,配电网的潮流分布和电压稳定性受到显著影响,导致电压越限和功率波动等问题,威胁电网的经济性和稳定性。针对这一挑战,提出一种基于CVTs(centroidal voronoi tessellations)空间划分的改进粒子群优化算法,用于主动配电网的有功无功协调优化。首先,构建包含有功网损、电压偏差和节点最低电压的多目标函数,全面考虑光伏接入对配电网电压的影响。其次,提出一种基于CVTs空间划分的区域调整策略,通过将复杂高维变量空间均匀划分为多个低维子空间,提升粒子群算法的全局寻优能力和优化精度。在此基础上,引入小生境技术和动态权重调整因子,进一步增强算法的全局搜索能力和收敛速度。基于MATLAB仿真系统,对IEEE 30节点系统进行仿真验证,结果表明,所提算法可降低网损最高达6.7%,可降低光伏功率波动标准差达57.37%,可有效提高电网最低电压2.7%,降低电网最高电压0.873%,为大规模光伏接入配电网后的无功优化提供有效的解决方案。

关键词:CVTs;无功优化;主动配电网;多目标;粒子群算法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)01-0037-10

Active and Reactive Power Coordination Optimization of Active Distribution Network Based on CVTs Spatial Partitioning

LI Bin, CUI Weijin*, ZHANG Kaibo

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The large-scale integration of distributed photovoltaics into the distribution network significantly affects the power flow distribution and voltage stability due to the intermittency and volatility of photovoltaic power generation, leading to problems such as voltage violations and power fluctuations, which threatens the economy and stability of the power grid. To address this challenge, an improved particle swarm optimization algorithm based on Centroidal Voronoi Tessellations (CVTs) spatial partitioning is proposed for active and reactive power coordination optimization in active distribution networks. Firstly, to comprehensively consider the impact of photovoltaic integration on distribution network voltage, a multi-objective function containing active power loss, voltage deviation, and minimum node voltage is constructed. Then, a regional adjustment strategy based on CVTs spatial partitioning is proposed, which improves the global optimization capability and optimization precision of the particle swarm algorithm by uniformly dividing the complex high-dimensional variable space into multiple low-dimensional subspaces. On this basis, niche techniques and dynamic weight adjustment factors are introduced to further enhance the algorithm's global search capability and convergence speed. Based on the MATLAB simulation system, simulation verifications is conducted on the IEEE 30-node system. The results demonstrate that the proposed algorithm can reduce network losses by up to 6.7%, reduce the standard deviation of photovoltaic power fluctuation by 57.37%, effectively increase the minimum grid voltage by 2.7%, and decrease the maximum grid voltage by 0.873%, providing an effective solution for reactive power optimization after large-scale photovoltaic integration into distribution networks.

Keywords: CVTs; reactive power optimization; active distribution network; multi-objective; particle swarm optimization

基金项目:国家重点研发计划项目“极高渗透率分布式光伏发电自适应并网与主动同步关键技术”(2022YFB2402900)。

National Key Research and Development Program of China “Key Technologies for Adaptive Grid-Connection and Active Synchronization of Distributed Photovoltaic Power Generation With Extremely High Penetration Rate”(2022YFB2402900).

0 引言

随着全球清洁能源需求的增长及环保意识的增强,光伏能源作为一种可再生的清洁能源得到了

快速发展。截至目前,全国范围内已建有超过 1.5 万个园区,其中包括 2 000 多个省级园区及近 700 个国家级园区,其能源消费量占全国总量逾 40%,因此,推动绿能替代、打造零碳园区意义重大^[1]。积极稳妥推进碳达峰碳中和,实施碳达峰试点,建立一批零碳园区、零碳工厂,将给光伏应用市场带来巨大的契机。然而大规模分布式光伏装机容量的提升易造成配电网接入点潮流倒送、电压越限和配电网电压波动等问题^[2]。为了应对上述挑战,探讨主动配电网无功优化的稳定性有着极其重要的意义。

配电网无功优化是电力系统领域的一个重要研究课题,国内外学者已经进行了广泛的研究。文献[3-5]通过遗传算法、等值模型等实现配电网的无功优化,解决了低压配电网的无功补偿问题。文献[6]聚焦风电集群的无功潜力,利用改进鲸鱼算法构建了电网双层优化模型。文献[7-8]考虑了配电网时序性和空间分布特性,探索了配电网在不同时间尺度问题上的配电网电压协调控制方法。此外,文献[9-11]运用智能算法优化配电网无功功率,对电力调度及稳定运行发展有着重要意义。针对配电网无功优化的复杂性,梯度法、Powell 法等传统非线性规划法存在初始点求解复杂、参数选取困难、收敛速度慢等问题。为克服上述方法的局限性并强化学习,遗传算法、粒子群算法等新型算法得到广泛应用^[12]。其中,粒子群算法全局搜索能力强,收敛速度快,并行处理能力强,文献[13-15]采用种群集中度概念、模型预测控制(model predictive control, MPC)方法、哈里斯鹰优化算法(harris hawks optimization, HHO)对配电网进行无功优化,降低了计算复杂度。

虽然已有研究采用了多种智能算法和模型解决无功优化问题,但面对高比例光伏并网带来的问题,现有方法在处理功率双向流动与电压波动耦合效应时仍存在问题^[16]。本文提出一种基于 CVTs (centroidal voronoi tessellations)空间划分概念的区域调整,并引入小生境技术的配电网有功无功多目标优化模型。首先,分析光伏并网对配电网产生的电压越限风险。其次,以粒子群算法搭建光伏电站配电网的无功补偿优化模型。接着,提出一种基于 CVTs 空间划分的区域调整策略,并在此基础上引入

小生境技术和动态权重因子,对粒子群算法进行改进。最后在 IEEE 30 节点上进行仿真验证,表明该模型的有效性。

1 光伏并网对配电网系统电压的影响

并网光伏发电将太阳能电池阵列的直流电,经逆变器转换为与电网同幅、同频、同相的交流电,实现并网、并向电网输电^[17]。光伏发电出力具有间歇性和波动性,这主要源于其对天气和光照条件的高度依赖。如,光照强度的快速变化可导致光伏输出功率在短时间内波动 15%~20%,而温度变化则可进一步加剧这种波动。当光伏输出功率超过本地负荷需求时,多余功率会逆向送入上级电网,导致潮流方向发生逆转。这种潮流逆转现象在光伏接入容量较大、接入位置不合理或配电网无功补偿不足时尤为显著。这种波动性会导致配电网电压随之产生波动,影响电压的稳定性^[18]。图 1 为光伏并网系统结构图。图 1 中,PV 为光伏组件,DC/DC 为光伏发电系统与电网的交汇点。

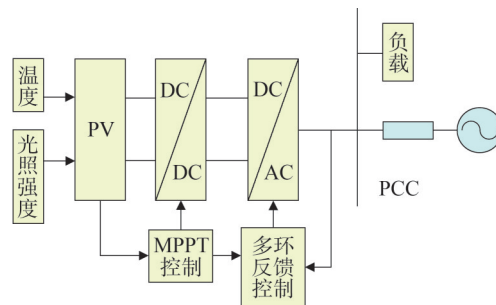


图1 光伏并网系统结构图

Fig.1 Structure diagram of photovoltaic grid connected system

光伏发电系统的接入影响配电网的潮流和电压分布,使得部分节点的电压超出正常运行时的允许范围,进而出现电压越限^[19-20]。若光伏接入点靠近线路末端,其对电压影响更大,由于线路阻抗的存在,多余功率的逆向流动会导致末端节点电压显著抬升,甚至超出电压上限(通常为 1.05 pu)。在夜间光伏发电功率较低时,则容易导致节点电压超出电压下限(通常为 0.9 pu)。在中午光伏发电功率较高时,则容易导致节点电压超出电压上限。此外,

当光伏接入容量超过线路热稳定极限的 50% 时,发生电压越限时,继电保护装置误动作、设备过电压损坏等可能性将大幅增加,从而威胁配电网的安全运行。

光伏发电的波动性不仅改变了潮流方向,还加剧了电压的不稳定性。如在天气突变或云层遮挡的情况下,光伏发电功率可能瞬间下降,导致配电网电压快速波动。这种电压波动不仅影响电能质量,还可能对敏感设备的运行造成干扰。此外,夜间光伏机组停止发电时,配电网的潮流恢复为传统单向模式,但由于白天的高渗透率光伏接入,配电网的电压分布仍可能存在不均衡现象,进一步增加了电压管理的复杂性。

本文所提基于 CVTs 空间划分的粒子群算法能够按照一定的规则和相似性,将配电网无功优化问题中的变量空间进行合理划分,包括分布式电源的有功功率与无功功率、储能设备的充放电功率、电容器组的投切组数等,形成多个子空间,在每个子空间内,粒子群算法可以更高效地进行优化搜索,通过引入小生境技术和动态权重因子,促进了粒子间的信息交流和共享,粒子能够朝着更优解的方向移动,最终实现配电网有功无功的协调优化。

2 改进粒子群算法

2.1 多目标函数的建立

与单目标优化不同,在粒子群优化算法中,多目标优化问题主要涉及配电网的有功网损、电压偏移量、节点最低电压三个相互冲突的目标函数,粒子的更新规则与传统粒子群算法类似,但要结合多个目标优化的特点进行调整。

1) 有功网损最小。

有功网损表示电力输送和分配过程中由于电阻、电感等因素造成的能量损失,对于电力系统的经济运行和能源管理至关重要。基于有功网损最小建立的目标函数为

$$\min H_{\text{loss}} = \sum_{k=1}^n G_{pq} (U_p^2 + U_q^2 - 2U_p U_q \cos\theta_{pq}) \quad (1)$$

式中: H_{loss} 为配电网的有功网损, W ; U_p 、 U_q 分别为节点 p 、节点 q 的电压幅值, V ; G_{pq} 为节点 p 与节点 q 之间的电导值, S ; θ_{pq} 为节点 p 与节点 q 之间的相角差

值, ($^\circ$); n 为光伏发电系统支路的数量。

2) 电压偏移量最小。

电压偏移量,即电压偏差,是电力系统运行中常见问题之一,指网络中的实际电压与额定电压的数值之差^[21]。基于电压偏移量最小建立目标函数为

$$\min U_d = \sum_{t=1}^{24} \sum_{p=1}^N \left(\frac{U_{p,t} - U_p^*}{U_{p,\max} - U_{p,\min}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: U_d 为配电网的电压偏移量; $U_{p,t}$ 为 t 时段节点 p 的电压值,本文中采样周期为 1 h,将一天共划分为 24 个时段; U_p^* 为节点 p 的额定电压; $U_{p,\max}$ 、 $U_{p,\min}$ 分别为光伏发电系统中节点 p 的电压幅值最大值、最小值; N 为节点的个数。

3) 节点最低电压最高。

为避免系统中个别节点电压与正常电压相差过大,确定以提高节点最低电压值为目标函数,其式为

$$\max U_N = \max \{V_{1\min}, V_{2\min}, \dots, V_{N\min}\} \quad (3)$$

式中: U_N 为系统所有节点中节点电压最低值, $V_{1\min}$ 、 $V_{2\min}$ 、 \dots 、 $V_{N\min}$ 为系统 N 个节点分别对应的节点最低电压,将最低电压的最大值设置为目标函数。

2.2 约束条件

1) 光伏出力模型约束。

光伏发电系统出力受光照强度、环境温度和天气条件影响^[22],表示为

$$P_{pv} = P_{\max} \left(\frac{G_{pv}}{G_{\text{stc}}} \right) [1 + \alpha(T_{pv} - T_{\text{stc}})] \quad (4)$$

式中: P_{pv} 为光伏发电系统实际发电功率, W ; P_{\max} 为光伏发电系统理论最大发电功率, W ; G_{stc} 为标准辐照度, W/m^2 ; G_{pv} 为实际场景下的辐照度, W/m^2 ; T_{stc} 为标准环境温度, $^\circ C$; T_{pv} 为实际环境温度, $^\circ C$; α 为温度因子。

2) 潮流约束。

潮流约束方程为:

$$P_{Sp} - P_{Lp} = U_p \sum_{q=1}^n U_q (G_{pq} \cos\theta_{pq} + B_{pq} \sin\theta_{pq}) \quad (5)$$

$$Q_{Sp} + Q_{Cp} - Q_{Lp} = U_p \sum_{q=1}^n U_q (G_{pq} \sin\theta_{pq} + B_{pq} \cos\theta_{pq}) \quad (6)$$

式中: P_{Sp} 和 Q_{Sp} 分别为分布式电源在节点 p 的有功功率和无功功率; P_{Lp} 为节点 p 负荷消耗的有功功率; Q_{Lp} 为节点 p 负荷消耗的无功功率; Q_{Cp} 为节点 p 处 SVC、SVG 等无功补偿器供给的补偿容量; B_{pq} 为

节点 p 和 q 间的电纳, B 。

3) 节点电压约束。

节点电压约束方程为

$$U_{p,\min} \leq U_p \leq U_{p,\max} \quad (7)$$

式中: $U_{p,\min}$ 为节点 p 的电压最小值; $U_{p,\max}$ 为节点 p 的电压最大值。

4) 电容器分组投切约束。

电容器分组投切约束方程为

$$Q_{C,d,\min} \leq Q_{C,d,p(t)} \leq Q_{C,d,\max} \quad (8)$$

式中: $Q_{C,d,p(t)}$ 为节点 p 处并联电容器 d 在第 t 时段的补偿容量; $Q_{C,d,\max}$ 和 $Q_{C,d,\min}$ 分别为节点 p 处并联电容装置 d 投切容量的上限、下限。

5) 储能运行约束。

储能运行约束方程为:

$$E_{\text{SOC},m,0} = E_{\text{SOC},m,24} \quad (9)$$

$$E_{\text{SOC},m,\min} \leq E_{\text{SOC},m,t} \leq E_{\text{SOC},m,\max} \quad (10)$$

$$E_{\text{bess},m} (E_{\text{SOC},m,t} - E_{\text{SOC},m,t-1}) = (P_{c,m,t} - P_{f,m,t}) \Delta t \quad (11)$$

$$P_{\text{bess},m,\min} \leq P_{\text{bess},m,t} \leq P_{\text{bess},m,\max} \quad (12)$$

$$\varepsilon_1 P_{c,m,\min} \leq P_{c,m,t} \leq \varepsilon_1 P_{c,m,\max} \quad (13)$$

$$\varepsilon_2 P_{f,m,\min} \leq P_{f,m,t} \leq \varepsilon_2 P_{f,m,\max} \quad (14)$$

式中: $E_{\text{SOC},m,\max}$ 为储能 m 电量的最大值; $E_{\text{SOC},m,\min}$ 为储能 m 电量的最小值; $E_{\text{SOC},m,t}$ 为 t 时段, 储能 m 的电量; $E_{\text{bess},m}$ 为 m 的储能容量; $P_{c,m,t}$ 和 $P_{f,m,t}$ 为 t 时段, 储能 m 的充放电功率; $P_{\text{bess},m,t}$ 为 m 在 t 时段的功率; $P_{\text{bess},m,\max}$ 为储能 m 最大功率; $P_{\text{bess},m,\min}$ 为储能 m 的最小功率; ε_1 和 ε_2 为储能充电系数和放电系数; $P_{c,m,\min}$ 、 $P_{c,m,\max}$ 和 $P_{f,m,\min}$ 、 $P_{f,m,\max}$ 分别为储能 m 充放电功率的最大值和最小值。

6) SVC 出力约束。

SVC 出力约束方程为

$$Q_{\text{svc},\min} \leq Q_{\text{svc},t} \leq Q_{\text{svc},\max} \quad (15)$$

式中: $Q_{\text{svc},t}$ 为在 t 时段内, SVC 的无功投切量; $Q_{\text{svc},\max}$ 为 SVC 运行功率的最大值; $Q_{\text{svc},\min}$ 为 SVC 运行功率的最小值。

7) 光伏逆变器约束。

光伏逆变器约束方程为

$$\begin{cases} Q_{t,\min}^{\text{pv}} = -\sqrt{(S^{\text{pv}})^2 - (P_t^{\text{pv}})^2} \\ Q_{t,\max}^{\text{pv}} = \sqrt{(S^{\text{pv}})^2 - (P_t^{\text{pv}})^2} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $Q_{t,\min}^{\text{pv}}$ 和 $Q_{t,\max}^{\text{pv}}$ 分别为 t 时段内光伏逆变器输出功率的最小值和最大值; P_t^{pv} 为光伏在 t 时段的有功

功率; S^{pv} 为光伏逆变器的容量。

2.3 改进多目标粒子群算法

2.3.1 基于 CVTs 空间划分的区域调整策略

为了提升粒子群算法在配电网有功无功协调优化中的搜索效率与优化精度, 本文提出一种基于 CVTs 空间划分的区域调整策略^[23]。CVTs 空间划分能够依据配电网变量最优分布点将配电网复杂变量空间均匀且最优地划分为多个结构良好、特性明确的配电网子空间。每个配电网子空间内的粒子可并行地进行局部搜索和独立优化, 防止粒子群算法出现早熟收敛和局部最优的问题, 从而增强其在配电网无功优化场景下的性能表现。

该策略利用 CVTs 的特性优化配电网子空间粒子的初始化过程, 让粒子均匀分布于配电网子空间, 以此提升全局搜索能力并防止早熟收敛。基于 CVTs 初始化的粒子速度更新公式为

$$v_{ab}^{f+1} = \varphi v_{ab}^f + \zeta_1 r_1 (p_{\text{best},ab}^f - x_{ab}^f) + \zeta_2 r_2 (g_{\text{best},b}^f - x_{ab}^f) + \gamma \cdot \Delta x_{ab}^f \quad (17)$$

式中: v_{ab}^f 为粒子 a 在第 f 次迭代时第 b 维的速度; φ 为惯性权重, 能够提升配电网有功无功协调优化最优粒子的搜索能力; r_1 和 r_2 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数; $p_{\text{best},ab}^f$ 为粒子 a 在第 f 次迭代时粒子的第 b 维最佳位置; $g_{\text{best},b}^f$ 为第 f 次迭代时粒子群的第 b 维最佳位置; x_{ab}^f 为粒子 a 在第 f 次迭代时第 b 维的位置; ζ_1 为学习因子, 控制个体极值对粒子移动速度的影响; ζ_2 为学习因子, 控制全局极值对粒子移动速度的影响; γ 为一个系数, 用于控制 CVTs 引导项的影响程度; Δx_{ab}^f 为基于 CVTs 划分配电网变量空间的引导项, 用于引导粒子向更优解的方向移动。

为了最小化区域内所有点到种子点的平方距离的积分, 使得种子点逐渐趋近于区域的质心, 其能量函数公式为

$$E(Z) = \sum_{i=1}^e \int_{V_i} \|X - z_i\|^2 dx \quad (18)$$

式中: $Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_e\}$ 为生成种子点的集合; V_i 为第 i 个 Voronoi 区域; X 为区域 V_i 内的任意点; $\|X - z_i\|$ 为点 X 到种子 z_i 的欧几里得距离。

粒子位置更新公式为

$$x_{ab}^{f+1} = x_{ab}^f + v_{ab}^{f+1} \quad (19)$$

在子空间 1 中, 初始生成点分布式电源的有功功率 $P_i = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$, 对于每个生成点 p_i , 计算其对

应的 Voronoi 区域 V_i , 计算每个 Voronoi 区域 V_i 的质心 c_i , 作为新的生成点

$$c_i = \frac{\int_{V_i} \rho(x) x dx}{\int_{V_i} \rho(x) dx} \quad (20)$$

式中: $\rho(x)$ 为配电网变量空间中的密度函数, 用于加权计算质心。

2.3.2 小生境技术与动态权重因子的引入

为了提高粒子群算法在配电网有功无功协调优化问题中的全局搜索能力和搜索精度, 引入了小生境技术^[24]和动态权重因子^[25], 通过将种群划分为多个相对独立的小生境, 多个子群体在各自的区域内同时进行进化和优化, 结合权重因子的动态更新, 使粒子群算法在不同优化阶段具有更合适的搜索策略, 在寻优的同时, 提高了其速度和精度。

1) 小生境技术。

小生境的划分规则为

$$d_{ls} = \|x_l - x_s\| = \sqrt{\sum_{z=1}^D (x_{lz} - x_{sz})^2} \quad l \neq s \quad (21)$$

式中: d_{ls} 为粒子 l 和 s 间的距离; x_l 和 x_s 为粒子 l 和 s 当前的位置; x_{lz} 和 x_{sz} 为粒子 l, s 在当前位置的 z 维信息; D 为粒子维度。给定阈值 σ , 当 $d_{ls} < \sigma$ 时, 将该粒子纳入当前小生境中。

2) 动态权重因子的调整。

在粒子群算法中, 动态权重因子合理分配了某些因素的比例变化, 能够随着模型性能的变化、所处条件和环境的变化而变化, 具有动态更新的特点, 结合小生境技术能够平衡各参与方的贡献。本文中, 为有功网损、电压偏离量、节点最低电压三个多目标函数各分配一个小生境, 根据小生境的适应度动态调整权重。有功网损权重初始值较高, 随着粒子迭代次数增加, 逐渐降低权重; 而电压偏离量权重在迭代初期较低, 随着粒子迭代次数增加逐渐增加; 节点最低电压权重在迭代过程中保持相对稳定, 可以根据种群适应度动态调整。

依据粒子和种群适应度动态调整 ω 为

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{g_s - g_{\min}}{g_h - g_{\min}}, & g_s < g_h \\ \omega_{\max}, & g_s \geq g_h \end{cases} \quad (22)$$

式中: ω_{\max} 为惯性权重的最大值; ω_{\min} 为惯性权重的最小值; g_s 为当前粒子 s 的适应度; g_h 为粒子群中 h 个优化粒子的适应度平均值; g_{\min} 为粒子群适应度的最小值。

引入 CVTs 的空间划分策略和小生境技术, 通过图像的特征空间进行 CVT 划分, 能够在划分的空间中分别生成多个小生境群体, 在小生境中同时对多目标函数的最优位置进行搜索, 大大提高了算法的运行速度和效率, 本文算法的总体流程如图 2 所示。

3 算例分析

仿真算例基于标准 IEEE 30 节点配电网系统进行 Matlab 仿真分析。标准 IEEE 30 节点系统如图 3 所示。电压上限基准为 1.05 pu, 电压下限基准为 0.9 pu。在节点 5、节点 2、节点 21 处接入 SVG, 投入容量均为 20 MW, 在节点 17 处接入储能装置, 投入容量为 1 000 kWh, 在节点 10、节点 24 处接入无功补偿装置, 投入容量均为 20 MW, 在节点 3、节点 15、节点 26 处接入光伏发电机组, 发电容量均为 60 MW。

划分策略对比与优化算法对比下的电网最低电压如图 4 所示。可知, 运用 CVTs、小生境技术对粒子群算法进行优化, 并与改进粒子群算法对比下, 以及在 K-means、随机划分及本文 CVTs 空间划分三种策略的对比下, 本文算法在一定程度上提高了电网的电压水平, 进一步降低了电网电压越限风险, 保障了电网的安全稳定运行。经多次实验得出, 传统粒子群算法对电网最低电压平均提高了 0.020 8 pu, CVTs 和小生境优化粒子群算法对电网最低电压平均提高了 0.024 6 pu 和 0.024 8 pu, K-means 与随机划分策略对于抬升电网电压效果并不显著, 而本文算法对电网最低电压平均提高了 0.026 8 pu, 特别在夜间时段优化效果更为显著, 例如夜间 19:00 时, 在传统粒子群算法优化下, 电网最低电压最大提高量为 1.4%, 而本文算法优化下, 电网最低电压最大提高量为 2.7%。

划分策略对比与优化算法对比下的电网最高电压如图 5 所示。可知, 对于电网最高电压, 经多次实验, 传统粒子群算法、CVTs 和小生境优化算法对电网最高电压平均降低了 0.523%、0.509% 和 0.468%, K-means 与随机划分策略对于降低电网最高电压效

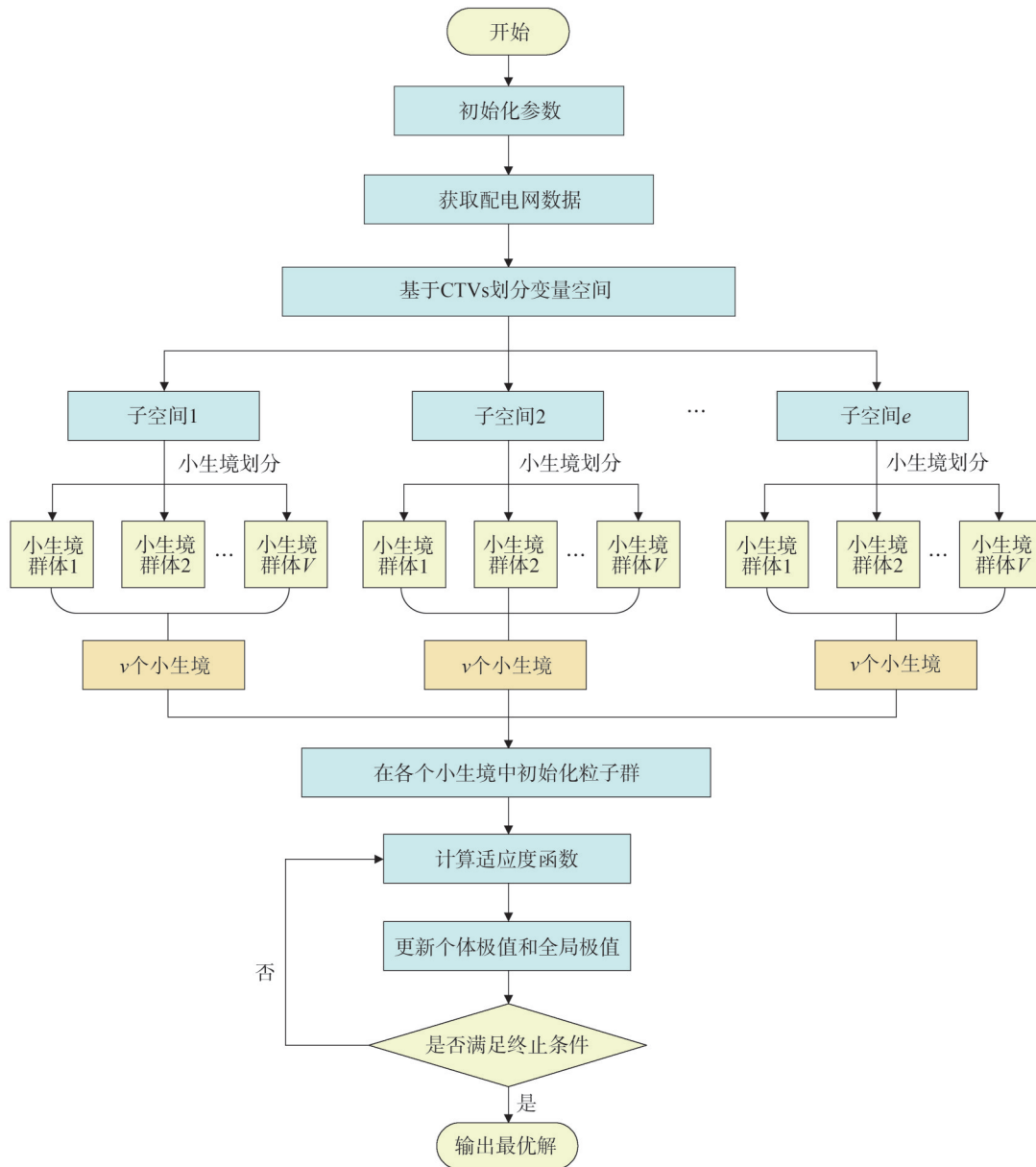


图2 基于CVTs的粒子群算法总体流程图

Fig.2 Overall flowchart of the particle swarm optimization (PSO) algorithm based on CVTs

果并不显著,平均降低电网最高电压 0.453% 和 0.382%,而本文算法对电网最高电压平均降低了 0.873%,效果最为显著。

基于 IEEE 30 节点系统仿真分析,本文算法在电网运行中展现出显著优势。划分策略对比与优化算法对比下的电网电压偏差如图 6 所示。可知,CVTs、小生境优化粒子群算法对于降低电网电压偏差效果并不明显,同样,K-means、随机划分策略对于降低电网电压偏差甚至有负面作用,而本文算法应

用于配网优化中的电压偏差整体上均优于其余优化算法和策略,关键节点(节点 7、节点 30)降幅达 0.011 pu 和 0.015 pu,提升了电网电压质量。

划分策略对比与优化算法对比下的网损分析如图 7 所示。可知,K-means 与随机划分策略在降低网损效果并不显著,而本文 CVTs 空间划分策略降低电网网损效果最佳,经 4 种算法作用,各时段节点网损降幅均有显著提高,尤其在第 8 h,经传统粒子群算法、CVTs 和小生境优化下及本文算法调控

后降低网损约为 19.12 kW、20.339 2 kW、20.505 2 kW

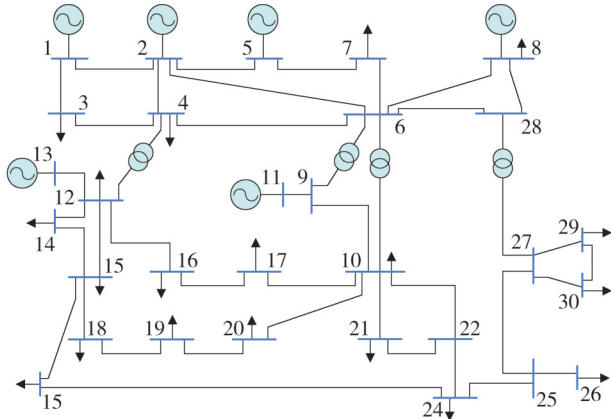
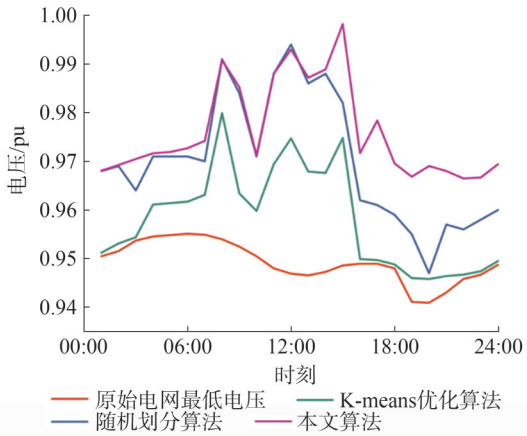
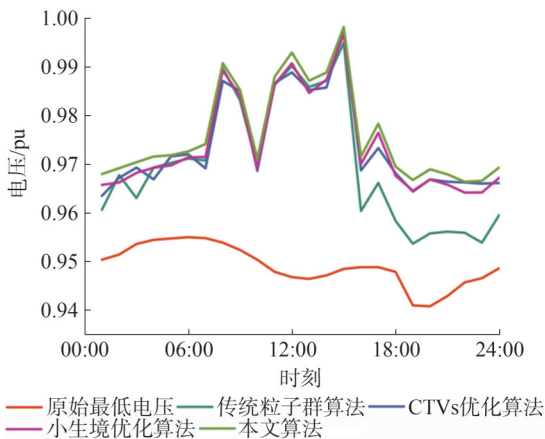


图3 标准 IEEE 30 节点系统
Fig.3 Standard IEEE 30-bus system

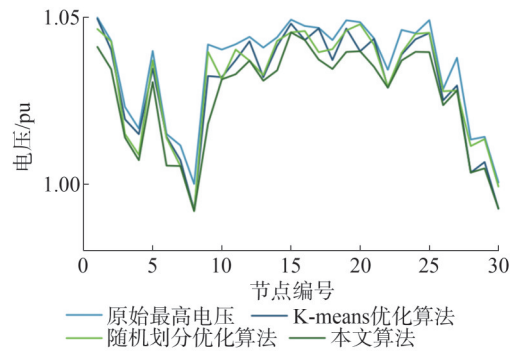


(a) 划分策略对比

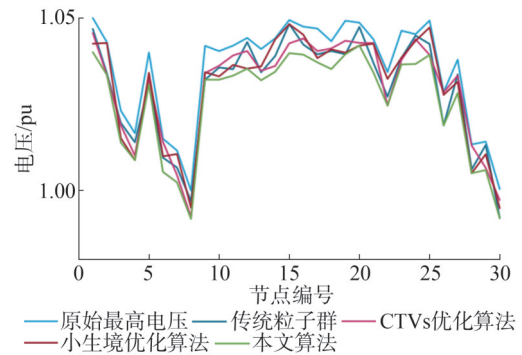


(b) 优化算法对比

图4 不同划分策略与优化算法下电网最低电压对比
Fig.4 Comparison of the lowest grid voltages under different partitioning strategies and optimization algorithms



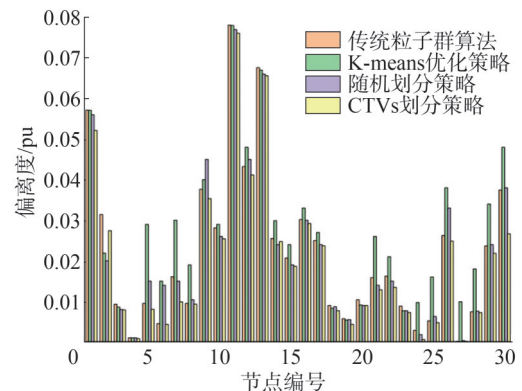
(a) 划分策略对比



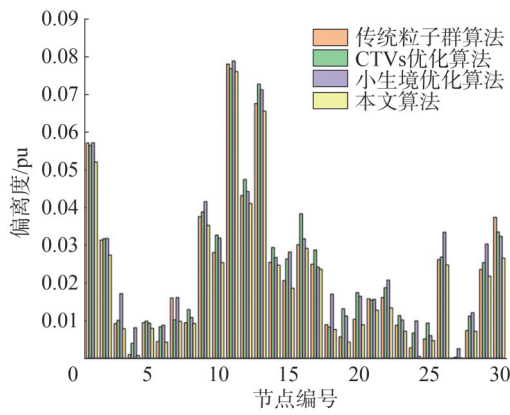
(b) 优化算法对比

图5 不同划分策略与优化算法下电网最高电压对比
Fig.5 Comparison of the highest grid voltages under different partitioning strategies and optimization algorithms

和 20.859 4 kW,而本文算法提高了网损的优化效果约 6.7%;在第 12 h,经传统粒子群算法、CVTs 和小生境优化下及本文算法调控后网损降幅分别达到了 71.4%、73.27%、71.96% 和 75.3%,本文算法提高了网损的优化效果约 5.5%。通过降低网损,能够减少配电网中的无功功率流动,提高系统的稳定性。



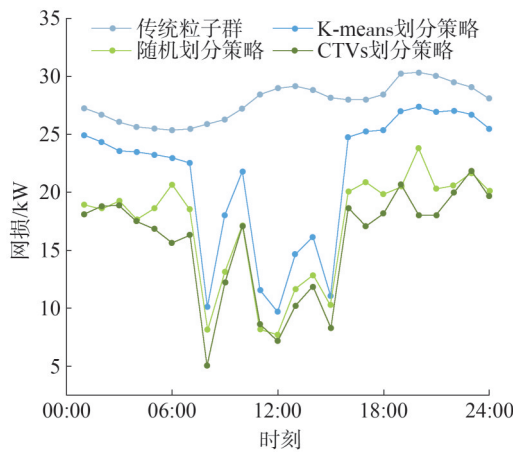
(a) 划分策略对比



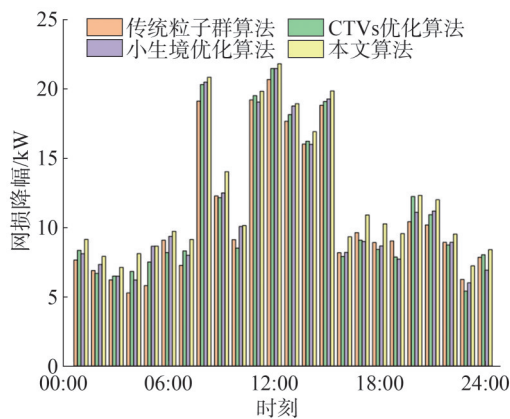
(b) 优化算法对比

图6 不同划分策略与优化算法下电网电压偏差对比

Fig.6 Comparison of grid voltage deviations under different partitioning strategies and optimization algorithms



(a) 划分策略对比



(b) 优化算法对比

图7 不同划分策略与优化算法下电网网损分析

Fig.7 Analysis of grid losses under different partitioning strategies and optimization algorithms

光伏出力及储能等效出力曲线如图8所示。由图8光伏出力及储能等效曲线,储能系统的接入有效抑制了光伏功率的波动。通过动态响应光伏出力变化,其“削峰填谷”机制将光伏等效出力从峰值150 MW 优化至 25 MW 且平稳保持,功率波动标准差降低了 57.37%。

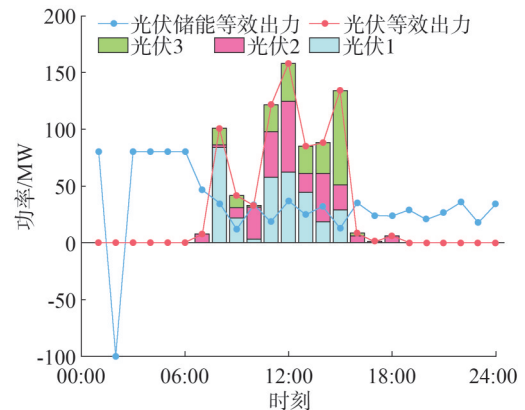


图8 光伏出力及储能等效曲线

Fig.8 Equivalent curves of photovoltaic output and energy storage

为验证本文算法的普适性,经过多次独立实验,统计发现功率波动标准差降幅逐渐稳定在 57.53%,有效抑制了光伏功率的溢出损失,使光伏系统更好地适应电网的需求。功率波动统计分析如表 1 所示。

表 1 功率波动统计分析

Table 1 Statistical analysis of power fluctuations 单位:%

| 实验次数 | 功率波动标准差降幅 |
|------|-----------|
| 1 | 57.37 |
| 5 | 58.14 |
| 15 | 57.82 |
| 20 | 57.53 |

为了体现本文算法的优越性,使用遗传算法 (genetic algorithm, GA)、蚁群优化算法 (ant colony optimization, ACO)、鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA)对粒子群优化,并与传统粒子群和本文算法进行对比,通过对比结果得知,在收敛精度分别为 10^{-3} 和 10^{-4} 时,本文算法收敛时

间分别为 24.543 5 s 和 28.410 2 s,均优于其他算法。算法收敛速度对比如表 2 所示。表 2 中收敛时间 1 为设定收敛精度 10^{-3} 对应的收敛时间,收敛时间 2 为设定收敛精度 10^{-4} 对应的收敛时间。

表 2 算法收敛速度对比

Table 2 Comparison of algorithm convergence speeds 单位:s

| 方法 | 收敛时间 1 | 收敛时间 2 |
|----------|----------|----------|
| 传统粒子群算法 | 33.738 0 | 36.973 6 |
| GA 优化算法 | 28.410 2 | 32.086 2 |
| ACO 优化算法 | 29.321 6 | 32.223 5 |
| WOA 优化算法 | 26.225 0 | 30.728 1 |
| 本文算法 | 24.543 5 | 28.410 2 |

4 结束语

本文构建了含光伏电站配电网的无功补偿优化模型,以系统有功网损、电压偏差和节点电压最低为多目标函数,全面考虑了光伏接入对配电网电压的影响,为优化提供了精准的目标导向。所提方法引入了基于 CVTs 空间划分的区域调整策略,将复杂高维电网节点均匀且最优地划分为多个低维电网节点子空间,提升了粒子群算法对配电网全局寻优精度,并在此基础上引入了小生境技术和动态权重调整因子,既保证了配电网整体的多样性,又提高了配电网的运行性能和可靠性,为大规模光伏接入配电网后的无功优化提供了有效的解决方案。

参考文献

- [1] 张胜杰.中央经济工作会议首提零碳园区带来哪些新机会?[N].中国能源报,2024-12-23(1).
- [2] 黄兴华,范元亮,张功林,等.含分布式光伏中低压配电网多时间尺度协同无功优化策略[J].智慧电力,2024,52(11):8-15.
HUANG Xinghua, FAN Yuanliang, ZHANG Gonglin, et al. Multi-time scale collaborative reactive power optimization strategy for medium and low voltage distribution networks with PV [J]. Smart Power, 2024, 52 (11): 8-15.
- [3] GOU S. Active distribution network reactive power optimization based on an improved genetic particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2655 (1): 012035.
- [4] 凌峰,郁从丽,袁一凡,等.基于改进遗传算法的低压配电网无功补偿自动优化方法[J].自动化应用,2024(15):258-259.

- LING Feng, YU Congli, YUAN Yifan, et al. Automatic optimization method of reactive power compensation of low-voltage distribution network based on improved genetic algorithm [J]. Automation Application, 2024(15): 258-259.
- [5] 郭雪丽,胡志勇,王爽,等.考虑大规模风光分层接入的配电网多层协调无功优化方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(12):113-122.
GUO Xueli, HU Zhiyong, WANG Shuang, et al. A multi-layer coordinated reactive power optimization method for a distribution network considering large-scale distributed wind-photovoltaic hierarchical access [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 113-122.
- [6] 于佰建,陈卓尔,宋长城,等.基于改进萤火虫算法的含多种新能源地区电网的无功电压优化[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):93-100.
YU Baijian, CHEN Zhuoer, SONG Changcheng, et al. Reactive power and voltage optimization based on improved firefly algorithm in regional power grids with a variety of new energies [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 93-100
- [7] 陈恒,涂建,潘成勇,等.基于鱼鹰优化算法的电力系统无功优化[J].电工技术,2024(14):75-78.
CHEN Heng, TU Jian, PAN Chengyong, et al. Osprey optimization-based reactive power optimization of power systems [J]. Electric Engineering, 2024(14): 75-78.
- [8] LIU S L, HUANG W, ZHANG Y J. Multi-time scale coordinated control method for distribution network based on point of common coupling reactive power/voltage optimization of photovoltaic [J]. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2019: 580-585.
- [9] 周运斌,杨静,董楠.基于人工蜂群算法的配电网无功优化调度研究[J].微型电脑应用,2024,40(8):178-180.
ZHOU Yunbin, YANG Jing, DONG Nan. Research on reactive power optimal dispatch of distribution network based on artificial bee colony algorithm [J]. Microcomputer Applications, 2024, 40 (8): 178-180.
- [10] 马喜平,甄文喜,梁琛,等.考虑风电场无功潜力的风电集群接入电网双层无功优化[J/OL].南方电网技术,2024:1-10 [2025-03-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241205.1447.012.html>.
MA Xiping, ZHEN Wenxi, LIANG Chen, et al. Bi-level reactive power optimization for wind cluster integrating the power grid considering the reactive capability of wind farm [J/OL]. Southern Power System Technology, 2024: 1-10 [2025-03-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20241205.1447.012.html>.
- [11] 滕杰,刘家会,肖懂.基于自适应图注意力网络的多时间尺度配电网重构与无功功率协同优化[J/OL].南方电网技术,2024:1-13 [2025-03-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240523.0831.004.html>.

- TENG Jie, LIU Huijia, XIAO Dong. Multi-time scale distribution network reconfiguration and reactive power collaborative optimization based on adaptive graph attention network [J/OL]. Southern Power System Technology, 2024: 1-13 [2025-03-29]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240523.0831.004.html>.
- [12] 马永翔,张勋,淡文国,等.基于混合策略改进粒子群算法的配电网无功优化研究[J].电力电容器与无功补偿,2023,44(6):32-38,78.
MA Yongxiang, ZHANG Xun, DAN Wenguo, et al. Study on reactive power optimization of distribution network based on multi-strategy fusion improved particle swarm algorithm [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(6): 32-38, 78.
- [13] 高金兰,刁楠,侯学才,等.基于改进粒子群算法的主动配电网无功优化[J/OL].自动化技术与应用,2024:1-5[2025-03-29]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZDHJ20241120005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
GAO Jinlan, DIAO Nan, HOU Xuecai, et al. Reactive power optimization of active distribution network based on improved particle swarm algorithm [J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-5 [2025-03-29]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZDHJ20241120005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [14] ZHOU H Y, LIANG J Y, DU X, et al. Multi-timescale reactive power optimization and regulation method for distribution networks under a multi-source interaction environment[J]. Processes, 2024, 12(10):2254.
- [15] ZHAO J, WANG C H, ZHAO B, et al. Neural network-based integrated reactive power optimization study for power grids containing large-scale wind power [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2024, 18(16):2587-2603.
- [16] XIA L, LIN X J, ZHOU R R, et al. Research on multi-objective reactive power optimization of distribution grid with photovoltaics [J]. World Electric Vehicle Journal, 2025, 16(2):70.
- [17] 许水清,陶松兵,柴毅,等.基于瞬时幅值的光伏系统电流传感器微小故障检测及估计[J].控制与决策,2022,37(3):583-592.
XU Shuiqing, TAO Songbing, CHAI Yi, et al. Incipient fault diagnosis and estimation for current sensors of PV system based on instantaneous amplitude [J]. Control and Decision, 2022, 37(3): 583-592.
- [18] 王华佳,张岩,尹书林,等.分布式光伏并网系统电压越限风险及谐波影响[J].电网与清洁能源,2024,40(3):128-138.
WANG Huajia, ZHANG Yan, YIN Shulin, et al. Voltage instability and harmonic risk for the distributed photovoltaic grid-connected system [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 128-138.
- [19] 陈懿,刘涤尘,吴军,等.分布式光伏电源对配电网电压波动的影响研究[J].电测与仪表,2018,55(14):27-32.
CHEN Yi, LIU Dichen, WU Jun, et al. Research on the impact of distributed photovoltaic power sources on voltage fluctuations in distribution networks [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(14): 27-32.
- [20] 杨剑锋,李婷,杨爱民,等.含电路由器的光伏配电网电压越限问题潮流优化研究[J].发电技术,2025,46(1):113-125.
YANG Jianfeng, LI Ting, YANG Aimin, et al. Research on tidal optimization of voltage overrun problem in photovoltaic distribution network with electrical energy router [J]. Power Generation Technology, 2025, 46(1): 113-125.
- [21] 陈茜,白晶,陈小月,等.分布式光伏并网对配电网的影响综述[J].科学技术与工程,2024,24(27):11491-11504.
CHEN Qian, BAI Jing, CHEN Xiaoyue, et al. Review of the impact of distributed PV grid integration on the power grid [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(27): 11491-11504.
- [22] 卢锦玲,赵增辉,胡兴华,等.计及光伏波动性的主动配电网双层有功无功协调优化[J/OL].电力系统及其自动化学报,2023:1-9[2025-03-29]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DLZD20230814004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LU Jinling, ZHAO Zenghui, HU Xinghua, et al. Double-layer active and reactive power coordination optimization of active distribution network considering photovoltaic fluctuation [J/OL]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023: 1-9 [2025-03-29]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DLZD20230814004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [23] WANG L, HÉTROUY-WHEELER F, BOYER E. A hierarchical approach for regular centroidal voronoi tessellations [J]. Computer Graphics Forum, 2016, 35(1):152-165.
- [24] 曾耀辉.基于改进小生境PSO算法的主动配电网中分布式电源优化调度[J].机电信息,2023(23):16-19.
ZENG Yaohui. Optimal dispatching of distributed generation in active distribution network based on improved niche PSO algorithm [J]. Mechanical and Electrical Information, 2023(23): 16-19.
- [25] 王生亮,刘根友.一种非线性动态自适应惯性权重PSO算法[J].计算机仿真,2021,38(4):249-253.
WANG Shengliang, LIU Genyou. A nonlinear dynamic adaptive inertial weight PSO algorithm [J]. Computer Simulation, 2021, 38(4): 249-253.

收稿日期:2025-03-29

修回日期:2025-08-05

作者简介:

李彬(1983),男,博士,副教授,研究方向为电气信息技术及电力系统通信;

崔玮晋(1999),通信作者(cuiwei jin0905@163.com),女,硕士在读,研究方向为电力需求侧响应、人工智能、大数据AI;

张凯伯(2001),男,硕士在读,研究方向为电力需求侧响应、人工智能、大数据AI。

(责任编辑 张丹丹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.240493

面向极端灾害的配-微电网两阶段协同优化运行策略

梁伟宸¹, 马鑫晟¹, 李 焜¹, 吴 盈^{2*}, 孙嘉祖²

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045; 2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要:近年来,洪水、台风等极端灾害的频率和强度显著增加,给网架结构相对薄弱的农村配电网(distribution network, DN)造成了严重影响,导致出现大范围、长时间的停电现象。针对农村地区远离电源、供电半径长和负荷分布分散等特点,在重要农村用户区域利用分布式电源、移动储能(mobile energy storage, MES)等部署微电网(microgrid, MG),是提升农村电网韧性的有效手段。为此,本文构建一种配电网与微电网协同的两阶段优化模型。在灾前阶段,通过预防布置移动储能,保障局部重要用户的应急供电;在灾后阶段,构建考虑移动储能和施工队的恢复资源调度模型。同时,考虑资源调度与电网运行的差异性,将该模型构建为双层混合整数线性优化问题,并利用列与约束生成(column and constraint generation, C&CG)法迭代求解,得到灾前和灾后两阶段的配-微电网协同优化运行策略。算例表明,该方法能够在极端灾害下有效保障农村负荷的持续供电,显著缩短供电恢复时间,从而大幅提升农村电网韧性。

关键词:农村配电网;两阶段;配-微电网协同;极端灾害

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)01-0047-09

Two-stage Coordinated Optimal Operation Strategy for Distribution Network and Microgrid Under Extreme Disasters

LIANG Weichen¹, MA Xinsheng¹, LI Xuan¹, WU Ying^{2*}, SUN Jiazu²

(1. Electric Power Science Research Institute of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: In recent years, the frequency and intensity of extreme weather events such as floods and typhoons have significantly increased, severely impacting rural distribution network (DN) with relatively weak grid structures, leading to large-scale and prolonged power outages. The resilience enhancement of rural power distribution networks is achieved through strategic deployment of microgrids (MG) in key user areas. This approach is necessitated by three rural characteristics: remote distance from centralized power sources, extended supply radii, and geographically dispersed load distribution. Distributed generation resources and mobile energy storage (MES) is systematically integrated to enable this infrastructure upgrade. To address this issue, this paper proposes a two-stage optimization model for the coordinated operation of distribution network and microgrid. In the pre-disaster phase, mobile energy storage is strategically deployed to ensure emergency power supply for critical local users. In the post-disaster stage, a restoration resource scheduling model is constructed, considering both MES and repair crews. Due to the different requirements of resource scheduling and grid operation, the model is formulated as a bi-level mixed-integer linear optimization problem. The column and constraint generation (C&CG) algorithm is employed to iteratively solve this problem, yielding optimal strategies for the coordinated operation of distribution network and microgrid during both pre-disaster and post-disaster stages. Case studies demonstrate that the proposed method can effectively ensure continuous power supply to rural loads under extreme weather conditions, significantly reduce the restoration time, and substantially enhance the resilience of rural-power grids.

Keywords: rural power distribution network; two-stage; cooperation of distribution network and microgrid; extreme disasters

基金项目:国网冀北电力有限公司科技项目(B3018K23000F)。
Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power
Company(B3018K23000F)。

0 引言

近年来,极端气候灾害的频率和强度不断增加,

加之农村配电网网架结构相对薄弱^[1]、供电半径长,转供能力弱,导致其在极端灾害下的风险应对能力薄弱,使得农村配电网的安全运行面临着严峻挑战。尤其是在洪水、台风等极端灾害发生时,农村配电网更容易出现大规模、大范围停电事故^[2-3]。例如,2021年河南省遭遇特大暴雨,多个乡村地区的农网设施严重受损,数百条供电线路中断,影响了数十万用户的电力供应^[4]。2024年第11号超强台风“摩羯”于9月6日16时20分、22时20分先后在海南文昌市、广东徐闻县登陆,导致大量用户的供电中断,尤其给农村区域的种植业、养殖业等大量用户带来严重损失^[5]。此类事件表明,在极端灾害引发的大规模停电事故中,农村电网由于恢复速度较慢且应急能力有限,韧性水平亟待提升^[6-7]。目前,针对农村地区远离电源、供电半径长和负荷分布分散等特点,在高附加值种植业、旅游业等重要农村用户区域就地配置微电网(microgrid, MG),是提高农村电网韧性的有效手段^[8]。同时,基于柔性软开关,能够有效利用用户侧资源,实现不同馈线间的灵活互济,增强农村电网的抗灾能力和恢复速度^[9-11]。

现有学者基于灾前主动防御和灾后快速恢复两个阶段研究提升农村配电网韧性^[12-14]。文献^[15]通过预先部署配电网中的移动储能(mobile energy storage, MES),在灾后更快更有效地将资源派遣至故障点。文献^[16-17]针对即将到来的极端天气,提前部署配电网中的施工队和抢修物资,提升灾后资源派遣效率。文献^[18]通过调整电源出力和负荷减载来维持功率平衡。文献^[19]通过优化施工队和移动电源调度策略,加快电网复电。文献^[20]提出结合施工队和主网潮流的抢修优化策略,最小化停电损失。文献^[21]根据极端天气故障场景,构建动态微电网以减少灾害期间的负荷损失。随着分布式光伏大规模接入农村配电网,农村配电网已具备构建局部微电网的条件^[22-24]。微电网在极端灾害场景下能够实现与配电网断开后的离网自主运行,通过分布式光伏和储能为本地的关键负荷提供电力保障,显著提升供电可靠性^[25]。农村地区由于负荷相对较少且分布式光伏接入比例较高,微电网可以高效利用光伏资源,在离网运行期间满足本地需求,并在灾后修复过程中向配电网返送电力,为主网提供功率支

撑^[26]。在灾前和灾后两阶段开展农村配电网与微电网的协同优化运行成为提升农网韧性和恢复能力的关键。

然而,现有研究多聚焦于灾前或灾后单一资源的优化利用,例如仅针对移动电源车、储能设备或施工队的调度进行研究,但对于农村配电网特有的高比例分布式光伏组成微电网、移动电源车、储能设备、施工队以及柔性软开关(soft open point, SOP)等多种资源的综合协调仍显不足。这种缺乏协同的策略限制了农村配电网在极端灾害中的韧性提升和恢复能力优化。为此,本文提出了一种配-微电网两阶段协同优化运行策略,特别构建了一种涵盖灾前和灾后两阶段的移动储能、施工队等多种应急资源调度的协同优化模型。该模型采用混合整数线性规划方法,利用MATLAB调用CPLEX求解器进行优化求解。在灾前阶段,该模型可制定开关操作优化方案,并合理提前布置移动储能设备;在灾后阶段,通过对抢修计划、施工队调度、移动储能再部署以及SOP调节进行优化,充分发挥各类资源的协同作用,保障农网的电力供应,并减少停电损失,实现了极端灾害下农网韧性的全环节提升。

1 配电网与微电网协同运行模型

面对极端灾害时,开展微电网与配电网的高效协同运行,有助于实现资源的最优配置和利用,保障重要负荷供电。在农村配电网中,用户可以通过储能、分布式电源等构建微电网,其运行约束条件为:

$$P_{i,t}^{MG} = P_{s,t}^{pv} + P_{n,t}^{dis} - P_{n,t}^{ch} - P_{i,t}^D, s, n \in \Omega_i^{MG} \quad (1)$$

$$Q_{i,t}^{MG} = Q_{s,t}^{pv} - \alpha_i P_{i,t}^D \quad (2)$$

$$0 \leq P_{s,t}^{pv} \leq \eta_s^{pv} P_s^{pv, \max} \quad (3)$$

$$Q_s^{pv, \min} \leq Q_{s,t}^{pv} \leq Q_s^{pv, \max} \quad (4)$$

$$\sqrt{(P_{s,t}^{pv})^2 + (Q_{s,t}^{pv})^2} \leq S^{pv} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{ch} \leq u_{n,t}^{ch} P_n^{ch, \max} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{dis} \leq u_{n,t}^{dis} P_n^{dis, \max} \quad (7)$$

$$S_{oC, n, t} = S_{oC, n, t-1} + \left(\eta_n^{ch} \sum P_{n, t-1}^{ch} - \sum \frac{P_{n, t-1}^{dis}}{\eta_n^{dis}} \right) \frac{\Delta T}{E_n} \quad (8)$$

$$S_{oC, n}^{\min} \leq S_{oC, n, t} \leq S_{oC, n}^{\max} \quad (9)$$

$$0 \leq u_{n,t}^{ch} + u_{n,t}^{dis} \leq 1 \quad (10)$$

式中: $P_{i,t}^{MG}$ 、 $Q_{i,t}^{MG}$ 分别为微电网在时刻 t 流入配电网节点 i 的有功和无功功率; $P_{s,t}^{pv}$ 和 $Q_{s,t}^{pv}$ 分别为光伏 s 在时

时刻 t 的有功和无功功率; $P_{n,t}^{\text{ch}}$ 和 $P_{n,t}^{\text{dis}}$ 分别为储能 n 在时刻 t 的充放电功率; $P_{i,t}^{\text{D}}$ 为配电网节点 i 在时刻 t 的有功功率; α_i 为节点 i 的负荷功率因数; Ω_i^{MG} 为与节点 i 相连的微电网内光伏与储能的集合; η_s^{pv} 为光伏 s 的效率; $P_s^{\text{pv,max}}$ 为光伏 s 的有功上限; $Q_s^{\text{pv,max}}$ 、 $Q_s^{\text{pv,min}}$ 分别为光伏 s 的无功上下限; S^{pv} 为光伏 s 的容量; $u_{n,t}^{\text{ch}}$ 和 $u_{n,t}^{\text{dis}}$ 分别为微电网内储能 n 在时刻 t 的充放电状态; $P_n^{\text{ch,max}}$ 和 $P_n^{\text{dis,max}}$ 分别为储能 n 的充放电功率上限; $S_{\text{oc},n,t}$ 为储能 n 在时刻 t 的荷电状态; η_n^{ch} 和 η_n^{dis} 分别为储能 n 的充放电效率; ΔT 为时间间隔; $S_{\text{oc},n}^{\text{max}}$ 和 $S_{\text{oc},n}^{\text{min}}$ 分别为储能 n 的容量上下限; E_n 为储能 n 的容量。式(1)一式(2)为微电网流入配电网节点的有功和无功约束。式(3)一式(4)为光伏的有功和无功功率输出限制。式(6)一式(10)为储能 n 的出力模型^[27]。其中,式(6)一式(7)为储能 n 的充放电功率约束;式(8)为储能的容量约束,确保储能 n 在任何时刻都不会超过其最大容量;式(9)为储能的荷电状态约束;式(10)为储能 n 的充放电状态约束,确保储能 n 不能同时进行充放电。

配电网的运行约束条件为:

$$\sum_{\forall j} (P_{j,i,t}) + P_{i,t}^{\text{C}} + P_{i,t}^{\text{MG}} = P_{i,t}^{\text{D}} + \sum_{\forall j} (P_{i,j,t}) \quad (11)$$

$$\sum_{\forall j} (Q_{j,i,t}) + Q_{i,t}^{\text{C}} + Q_{i,t}^{\text{MG}} = k_i P_{i,t}^{\text{D}} + \sum_{\forall j} (Q_{i,j,t}) \quad (12)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 \leq 2(R_{i,j}P_{i,j,t} + X_{i,j}Q_{i,j,t}) \quad (13)$$

$$U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 \geq 2(R_{i,j}P_{i,j,t} + X_{i,j}Q_{i,j,t}) \quad (14)$$

$$\underline{U}_i \leq U_{i,t} \leq \bar{U}_i \quad (15)$$

式中: $P_{i,j,t}$ 、 $P_{j,i,t}$ 分别为节点 i 到节点 j 、节点 j 到节点 i 的线路有功功率; $Q_{i,j,t}$ 、 $Q_{j,i,t}$ 分别为节点 i 到节点 j 、节点 j 到节点 i 的线路无功功率; $P_{i,t}^{\text{C}}$ 和 $Q_{i,t}^{\text{C}}$ 分别为节点 i 的配电网电源有功和无功功率; $U_{i,t}$ 和 $U_{j,t}$ 分别为节点 i 和节点 j 在时刻 t 的电压; $R_{i,j}$ 和 $X_{i,j}$ 分别为节点 i 到节点 j 的电阻和电抗系数; \bar{U}_i 和 \underline{U}_i 分别为节点 i 电压的上下限。式(11)一式(12)保证线路的有功和无功功率平衡;式(13)一式(15)保证电压平衡且电压在偏差范围内。

同时,引入柔性软开关来确保农村配电网能够更有效地响应极端天气事件,减少停电范围和时间,提高韧性和供电可靠性,其 SOP 的运行约束条件为:

$$P_i^{\text{sop}} + P_j^{\text{sop}} = 0, i, j \in \Omega_p \quad (16)$$

$$-Q_i^{\text{sop,max}} \leq Q_i^{\text{sop}} \leq Q_i^{\text{sop,max}} \quad (17)$$

$$\sqrt{(P_i^{\text{sop}})^2 + (Q_i^{\text{sop}})^2} \leq S^{\text{sop}} \quad (18)$$

式中: P_i^{sop} 和 P_j^{sop} 分别为节点 i 和节点 j 的 SOP 的两个端口的有功功率; Ω_p 为配电网中接入 SOP 的节点的集合; $Q_i^{\text{sop,max}}$ 为 SOP 的最大无功功率; Q_i^{sop} 为节点 i 的 SOP 的无功功率; S^{sop} 为 SOP 的容量。式(16)为 SOP 的功率平衡;式(17)为 SOP 的无功功率的上下限;式(18)为 SOP 的容量约束限制。

配电网的功率潮流约束采用 Lindistflow 模型进行表述^[28]。值得注意的是,极端灾害有可能改变网络拓扑结构。因此,引入支路停运因素 $\delta_{i,j}$ 来修改支路电压方程。同时,运用大 M 法将式(13)一式(14)转化为线性约束。

$$M(\delta_{i,j} - 1) \leq U_{i,t}^2 - U_{j,t}^2 - 2(R_{i,j}P_{i,j,t} + X_{i,j}Q_{i,j,t}) \leq M(1 - \delta_{i,j}) \quad (19)$$

式中: M 为人为引入的大数值常数。式(19)可以通过使用 $U_{i,t}^2 = u_{i,t}$ 线性化。此外,式(5)和式(18)可以通过内接多边形线性化^[29]。

$$a_l P_i^{\text{sop}} + b_l Q_i^{\text{sop}} + c_l S^{\text{sop}} \leq 0, l \in \{1, 2, \dots, 19\} \quad (20)$$

式中: a_l 、 b_l 、 c_l 为线性化系数,用于将非线性约束转化为线性约束;下标 l 为第 l 个线性化约束条件。

2 两阶段配-微协同优化模型

本文构建了极端灾害下涵盖两阶段的配-微电网协同优化模型,其框架如图 1 所示。灾前,针对极端灾害可能造成的影响,采取主动预防措施,预先布置移动储能;灾后,通过移动储能和施工队调度,优先恢复关键负荷的电力供应,随后逐步恢复其他次要负荷。在此基础上,配电网和微电网在灾前和灾后两阶段开展协同优化。

2.1 目标函数

由于极端灾害发生造成大量负荷失电,因此以配置成本与负荷损失成本最小为目标函数。

$$\min \left(\sum_{\forall m} \sum_{\forall i} c^{\text{M}} x_{i,m}^{\text{pre}} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall t} c_i^{\text{L}} P_{i,t}^{\text{D}} \Delta t \right) \quad (21)$$

式中: c^{M} 为配置成本; $x_{i,m}^{\text{pre}}$ 为移动储能 m 在灾前阶段的布置状态,取值为 1 时表示移动储能 m 布置在节点 i ,取值为 0 时表示移动储能 m 没有布置在节点 i ; c_i^{L} 为节点 i 负荷损失的单位成本; Δt 为时间步长。

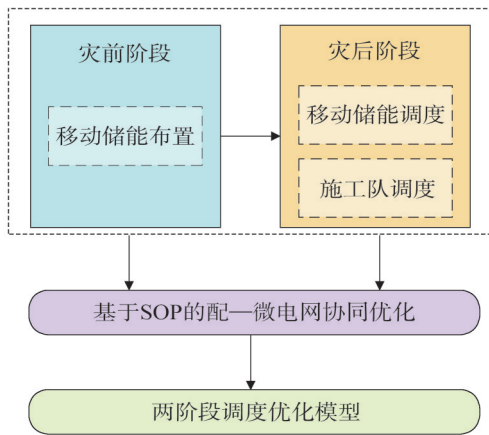


图1 灾前和灾后两阶段配-微协同调度框架图

Fig.1 Framework of two-stage coordinated operation scheduling of distribution network and microgrid for pre-disaster and post-disaster

2.2 灾前主动防御

移动储能的灾前布置模型为:

$$\sum_{\forall i} x_{i,m}^{pre} \leq 1 \quad (22)$$

$$\sum_{\forall m} x_{i,m}^{pre} \leq 1 \quad (23)$$

式中:式(22)为每个移动储能 m 最多只能接入一个节点 i ;式(23)为每个节点 i 最多只能连接一个移动储能 m 。

2.3 灾后快速恢复

移动储能的灾后再调度约束条件为:

$$x_{i,i,m}^{pos} = x_{i,m}^{pre} \quad (24)$$

$$\sum_{\forall j} x_{j,i,m}^{pos} - \sum_{\forall j} x_{i,j,m}^{pos} = 0 \quad (25)$$

$$0 \leq A_{m,i} \leq (1 - x_{i,i,m}^{pos}) T_{max} \quad (26)$$

$$A_{m,i} \geq (\sum_{\forall j} x_{j,i,m}^{pos}) T_{max} \quad (27)$$

$$A_{m,i} - A_{m,j} \geq r_{m,i,j} - (1 - x_{i,j,m}^{pos}) M \quad (28)$$

$$A_{m,i} - A_{m,j} \leq r_{m,i,j} + (1 - x_{i,j,m}^{pos}) M \quad (29)$$

$$\sum_{t \in T_{max}} t \cdot v_{m,i,t} \leq A_{m,i} \quad (30)$$

$$z_{m,i,t} \leq \sum_{i} v_{m,i,t} \quad (31)$$

式中: $x_{i,j,m}^{pos}$ 为灾后阶段移动储能 m 从节点 i 到节点 j 的移动状态; $x_{j,i,m}^{pos}$ 为灾后阶段移动储能 m 从节点 j 到节点 i 的移动状态; $x_{i,i,m}^{pos}$ 为移动储能 m 在节点 i 移动储能灾后调度的位置; $x_{i,i,m}^{pre}$ 为移动储能 m 在节点 i 移

动储能灾后调度的初始位置。 $A_{m,i}(A_{m,j})$ 为灾后阶段移动储能 m 到达节点 $i(j)$ 的时间; T_{max} 为总的时间步长; $r_{m,i,j}$ 为移动储能 m 从节点 i 到节点 j 的移动时间; $v_{m,i,t}$ 为移动储能 m 在时刻 t 到达节点 i 的状态, 为 1 时移动储能 m 到达节点 i , 为 0 时移动储能 m 没有到达节点 i ; $z_{m,i,t}$ 为移动储能 m 在时刻 t 接入节点 i 的状态, 取值为 1 时移动储能 m 接入节点 i , 取值为 0 时移动储能 m 没有接入节点 i 。式(24)为灾后移动储能的初始位置受到灾前位置的限制; 式(25)为移动储能的移动路径, 表示移动储能 m 在节点 i 的流入和流出必须平衡; 式(26)~式(29)为移动储能重新分配的到达时间约束; 式(30)为移动储能 m 到达某个节点的时间不会早于其在各个时间步长内接入其他节点的时间加权和; 式(31)为移动储能在某个时刻接入某个节点的状态不会超过其在所有时间步长内接入该节点的总次数。

施工队的调度模型为:

$$\sum_{\forall i} x_{c,i,t} \leq 1 \quad (32)$$

$$\sum_{\tau=0}^{r_{c,i,t}} x_{c,i,t} = 0 \quad (33)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+r_{c,i,j}} x_{c,j,t} \leq (1 - x_{c,i,t}) \cdot r_{c,i} \quad (34)$$

$$z_{c,i,t} \leq \frac{\sum_{\tau=1}^t x_{c,i,t}}{r_{c,i}} \quad (35)$$

$$z_{c,i,t} \leq z_{c,i,t+1} \quad (36)$$

$$\sum_{\forall c} z_{c,i,t} \leq 1 \quad (37)$$

式中: $x_{c,j,t}, x_{c,i,t}$ 分别为灾后阶段施工队 c 在时刻 t 检测到故障节点 j, i 的状态, 取值为 1 时表示故障节点 j, i 处于可修复状态, 取值为 0 时表示故障节点 j, i 处于不可修复状态; $r_{c,i,j}^c$ 为施工队 c 在节点 i 和节点 j 之间的运动时间; $r_{c,D,i}^c$ 为施工队 c 从仓库到第一个故障点的运动时间; τ 为时间变量; $r_{c,i}$ 为施工队 c 修复故障节点 i 所需要的时间; $z_{c,i,t}$ 为施工队 c 在 t 时刻对故障节点 i 进行修复的状态, 取值为 1 时表示当前完成修复任务, 取值为 0 时表示当前没有完成修复任务。式(32)为保证每个施工队能在同一时刻最多修复一个故障; 式(33)为施工队前往第一个故障点的状态; 式(34)为施工队的调度路径和移动时间, 确保施工队在修复时间中不能修复其他故障点; 式(35)为施

工队在修复时间之后才能完成故障修复;式(36)为故障一旦修复, $z_{c,i,t}$ 恒等于1;式(37)为保证一个故障仅由一个施工队修复。

2.4 资源调度与配-微电网运行耦合约束

由于配电网运行状态受到故障抢修、移动储能接入等因素影响,因此需要通过建立耦合约束将抢修资源的调度和配-微电网运行相关联。对于移动储能,其在配电网运行优化中功率输出与调度策略有关,如式(38)一式(39)所示。其中,配-微电网的协同优化模型参考式(1)和式(18)。

$$0 \leq P_{m,i,t}^M \leq z_{m,i,t} P_m^{M,\max} \quad (38)$$

$$0 \leq Q_{m,i,t}^M \leq z_{m,i,t} Q_m^{M,\max} \quad (39)$$

式中: $P_{m,i,t}^M$ 和 $Q_{m,i,t}^M$ 分别为时刻 t 移动储能 m 在节点 i 的有功、无功出力; $P_m^{M,\max}$ 和 $Q_m^{M,\max}$ 分别为移动储能 m 的有功功率和无功功率的上限。

3 模型优化求解方法

3.1 双层模型构建

考虑资源调度与电网运行的差异性,将两阶段配-微电网协同优化模型构建为双层模型。其中,上层模型针对灾前和灾后两阶段的资源调度,下层模型则针对灾后阶段的电网调度。所提出的两阶段配-微电网协同优化模型如式(40)所示,所建立的双层优化模型可以表示为式(41)的矩阵形式。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left[\min \left(\sum_{\forall m} \sum_{\forall i} c^M x_{i,m}^{\text{pre}} + \sum_{\forall i} \sum_{\forall t} c_i^L P_{i,t}^D \Delta t \right) \right] \\ \text{s.t. 式(1)一式(18), 式(21)一式(39)} \end{array} \right. \quad (40)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \min (\mathbf{a}^T \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{y}) \\ \text{s.t. } \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{g} \\ \mathbf{G} \mathbf{y} + \mathbf{E} \mathbf{x} \leq \mathbf{w} \end{array} \right. \quad (41)$$

式中: \mathbf{x} 为上层模型的决策向量,包括两阶段中各种应急资源; \mathbf{y} 为下层模型的潮流决策向量,包括储能出力等; \mathbf{a} 为与上层模型决策向量 \mathbf{x} 相关的系数向量; \mathbf{b} 为与下层模型潮流决策向量 \mathbf{y} 相关的系数向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{G} 、 \mathbf{E} 为对应的约束系数矩阵; \mathbf{g} 、 \mathbf{w} 为对应的约束常数向量; $\mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{g}$ 为应急资源调度的整数约束; $\mathbf{G} \mathbf{y} + \mathbf{E} \mathbf{x} \leq \mathbf{w}$ 为应急资源出力的实数约束。

与传统求解方法相比,C&CG算法在求解问题时使用更多变量和约束条件,适应更广泛的优化问

题,故C&CG算法在解决问题时具有更高的计算效率、更强的适应性和更快的收敛速度。在C&CG算法迭代过程中,上层模型用于决策施工队、移动储能等应急资源的最优调度策略,模型表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{f}_M = \min (\boldsymbol{\eta} + \mathbf{a}^T \mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \boldsymbol{\eta} \geq \mathbf{b}^T \mathbf{y}_k, \forall k \\ \mathbf{A} \mathbf{x} \leq \mathbf{g} \end{array} \right. \quad (42)$$

式中: \mathbf{f}_M 为最优调度策略; $\boldsymbol{\eta}$ 为辅助变量; \mathbf{y}_k 为经过 k 次迭代的下层模型决策向量。约束条件中,包含了从初始到第 $k+1$ 次迭代期间的所有变量及其相应的约束。通过求解下层问题,得到一个优化结果,为上层模型的目标函数提供了一个上界。由于上层问题被构建为一个混合整数规划问题,因此可以利用优化求解器来求解该问题,从而得出当前阶段的最优资源调度策略。

下层模型专注于解决局部决策问题,以确保上层的资源调度方案能够得到有效执行,使负荷损失最小,模型表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{f}_S = \min \mathbf{b}^T \mathbf{y} \\ \text{s.t. } \mathbf{G} \mathbf{y} + \mathbf{E} \mathbf{x}_k \leq \mathbf{w}, \forall k \end{array} \right. \quad (43)$$

式中: \mathbf{f}_S 为负荷损失。

3.2 双层模型求解步骤

为了得到模型的最优调度策略,构建了双层模型并使用C&CG算法进行迭代求解,具体步骤如下:

1)初始化。

设定初始值,设定下界 $L=0$ 、上界 $U=1$,收敛指标 $\varepsilon=0.01$,并设置初始迭代次数 $k=1$ 。

2)求解上层模型。

求解上层模型式(42),得到基于上层模型的决策变量 \mathbf{x} 和目标函数值 \mathbf{f}_M ;对下界进行更新,即 $L = \min\{L, \mathbf{f}_M\}$ 。

3)求解下层模型。

求解下层模型式(43),得到基于给定抢修策略的应急资源出力及子问题目标函数值 \mathbf{f}_S ;对上界 U 进行更新,即 $U = \max\{U, \mathbf{f}_S\}$ 。

4)收敛性验证。

如果 $U - L \leq \varepsilon$,求解结束,输出最后一次迭代中的决策变量 \mathbf{x} ;否则,根据最坏场景并增加新的变量和约束条件到主问题中。

C&CG 算法流程如图 2 所示。

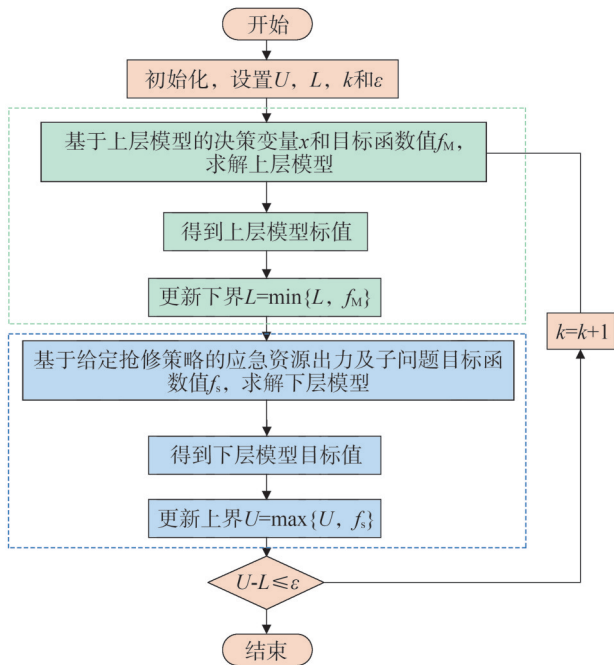


图 2 C&CG 算法流程示意图

Fig.2 Flowchart of the C&CG algorithm

4 算例分析

4.1 仿真场景

采用北方某农村配电系统来验证所提方法的有效性,系统的拓扑结构如图 3 所示。该系统配置了两台容量分别为 500 kW 和 400 kW 的 SOP,假设灾后阶段持续 10 h,分为 20 个时步,每个时步 30 min。

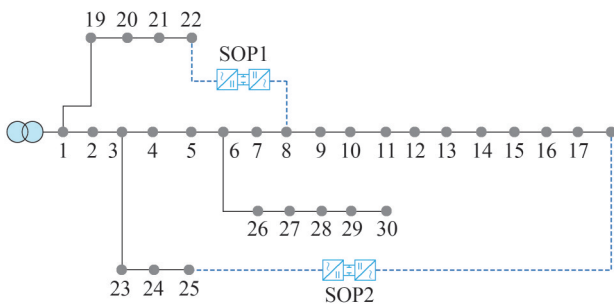


图 3 拓扑结构图

Fig.3 The topological structure

4.2 两阶段调度结果

通过对双层优化模型的求解,得到了极端灾害下配-微电网两阶段协同优化方案。

4.2.1 灾前主动预防措施

在灾前阶段,通过移动储能的提前布置以及开关操作与移动储能的协同操作,构成主动孤岛,增强电网弹性。其中, MES1 和 MES2 的参数设置如表 1 所示,主动预防策略如图 4 所示。图 4 中节点 9、12、16、20、23、26 具备移动储能接口,作为移动储能接入候选点。

表 1 MES 参数
Table 1 Parameters of the MES

| 参数 | 数值 | |
|----------|-------|-------|
| | MES1 | MES2 |
| 最大功率/kW | 200 | 115 |
| 额定容量/kWh | 4 500 | 4 000 |
| 成本/万元 | 1.33 | 1.08 |

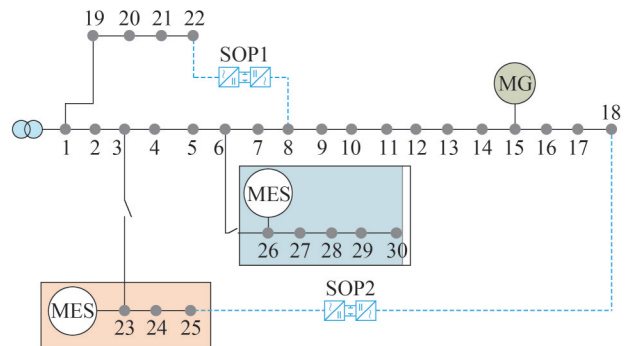


图 4 灾前部署策略

Fig.4 Pre-disaster deployment strategy

为减少极端灾害期间线路故障导致的功率短缺造成的负荷损失,两个移动储能分别被提前布置于节点 23 和节点 26, MG 在节点 15 与配电网相连,为附近节点提供局域供电,提供功率支撑。此外,通过打开线路 3—23 和线路 6—26 的开关,将重要负荷进行隔离,并利用移动储能为重要负荷提供功率支撑,可减少故障发生后带来的停电损失,提高重要用户的生存能力。

4.2.2 灾后快速恢复措施

在灾后阶段,由于配电线路不再发生故障,故移动储能可以根据故障情况重新部署,用于恢复重要负荷供电,同时派遣施工队修复故障线路,实现配电网停电负荷全恢复,灾后负荷恢复如图 5 所示。

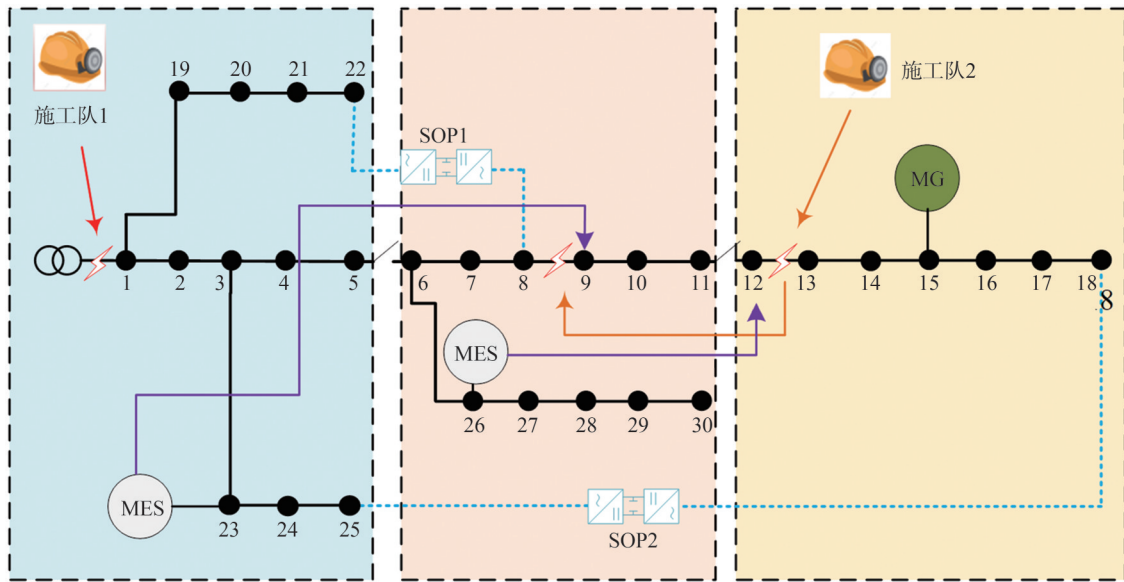


图5 灾后恢复策略

Fig.5 Diagram of the post-disaster restoration strategy

如图5所示,灾后恢复策略聚币实施步骤如下。

步骤1:施工队1从仓库出发前往修复故障线路变电站,施工队2从仓库出发前往故障线路12—13。布置在节点26处的移动储能开始向节点12移动,布置在节点23处的移动储能保持不变。

步骤2:施工队2到达故障线路12—13,开始抢修工作。

步骤3:施工队1到达故障线路变电站,移动储能到达节点12进行供电支撑。

步骤4:施工队2完成线路12—13的修复工作,开始向故障线路8—9移动,位于节点23处的移动储能开始向节点9移动。节点12处的移动储能和节点15处的微电网,支撑局域供电和负荷恢复。

步骤5:施工队2到达故障线路8—9开始恢复,移动储能到达节点9开始供电。施工队1仍在抢修故障线路变电站1。

步骤6:施工队2修复完成线路8—9,在节点9移动储能的作用下,该区域的供电逐步恢复,保障了重要节点和线路的负荷支持。此时,通过SOP1连接节点22和节点8,在线路变电站1未修复完成的情况下,支撑关键节点22的电力供应。

步骤7:施工队1完成故障线路变电站1的修复工作,至此,全部故障抢修完成,在配-微电网协同、移动储能、SOP的作用下,系统逐步恢复。

4.2.3 两阶段调度方法对比

为验证所提方法的优越性,将两阶段协同优化与其他方法的恢复结果进行对比。方法A为不考虑配-微电网协同的两阶段调度方法,方法B为不考虑移动储能的两阶段调度方法。3种不同方法的成本对比如图6所示。所提方法的成本比方法A减少了27.14万元,比方法B减少了11.03万元。

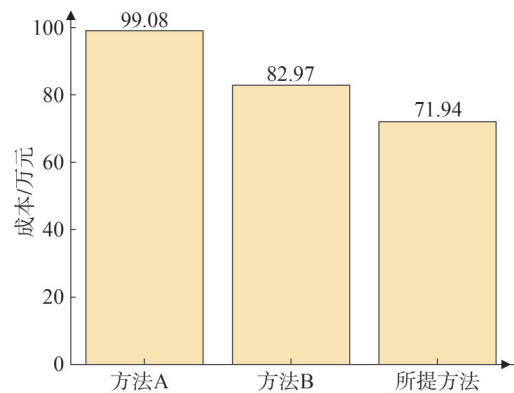


图6 不同方法下的成本对比

Fig.6 Cost comparisons of different methods

不同方法的负荷削减量对比结果如表2所示。所提方法与方法A相比,负荷削减量减少了0.84 MWh,负荷削减率降低了15.2个百分点;与方法B相比,负荷削减量减少了0.48 MWh,负荷削减

率降低了8.7个百分点。这表明配-微两阶段协同优化模型在应对极端故障时显著增强了电力系统的供电能力。该模型通过在关键节点部署移动储能以及开关操作,实现了故障区域与供电区域的隔离,确保了在极端情况下关键负荷的持续供电。同时最小化了极端灾害对整个配电网的影响,不仅提高了配电网的韧性,也为未来的电网规划和灾害响应提供了参考依据。

表2 不同方法的负荷削减对比

Table 2 Load curtailment comparisons of different methods

| 方法 | 负荷削减量/MWh | 负荷削减率/% |
|------|-----------|---------|
| 所提方法 | 1.26 | 22.9 |
| 方法 A | 2.10 | 38.1 |
| 方法 B | 1.74 | 31.6 |

5 结论

本文提出了面向极端灾害的配-微电网两阶段协同优化运行方法。首先,建立了配电网与微电网运行模型,进而构建了考虑极端灾害的两阶段配-微电网协同优化模型。其次,通过关注灾前和灾后的不同阶段,制定移动储能、施工队等资源的调度和优化策略,并将其构建为一个双层混合整数线性问题,采用列与约束生成算法迭代求解。最后,算例结果表明,与传统的优化方法相比,所提方法在面对极端灾害时可有效降低负荷削减量,提高了灾后农村配电网的恢复效率,显著提升了农村配电网在极端灾害下的应对能力。

参考文献

- [1] 朱明媛.农村配电网的规划策略分析[J].集成电路应用,2024,41(2):94-95.
ZHU Mingyuan. Analysis of planning strategies for rural distribution networks[J]. Application of IC, 2024, 41(2): 94-95.
- [2] 张海风,孔锋.透视我国农村地区暴雨洪涝灾害风险防范及提升对策[J].水利水电技术(中英文),2022,53(9):13-24.
ZHANG Haifeng, KONG Feng. Perspective on risk prevention of storm-flooding disaster in rural areas of china and enhancement of relevant countermeasures [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(9): 13-24.
- [3] 薛国斌,梁魁,马国哲.陇南暴雨洪灾对农村配电网的危害特征及防治对策[J].科学家,2016,4(7):62-63.
- [4] 河南受强降雨影响停运的变电站、输电线路已全部恢复送电[EB/OL].(2021-08-09)[2024-11-26].<https://m.news.cctv.com/2021/08/09/ARTIcXdK20VHvuypni50Qxny210809.shtml>.
- [5] 海南受超强台风“摩羯”影响地区“户户通电”[EB/OL].(2024-09-29)[2024-11-26].<https://news.cctv.com/2024/09/29/ARTIeNkVUvTsRMp3erpWmwdw240929.shtml>.
- [6] 张俊成,陶毅刚,黎敏,等.农村配电网规划项目可靠性提升效果评估方法[J].南方能源建设,2022,9(增刊2):112-117.
ZHANG Juncheng, TAO Yigang, LI Min, et al. Evaluation method for reliability improvement effect of rural distribution network planning project[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(S2): 112-117.
- [7] RAYMOND L SMITH I I I, FILHO F J. Renewable powered microgrid adoption: improving critical infrastructure resilience in rural coastal communities[J]. IIE Annual Conference. Proceedings, 2022: 1-6.
- [8] 方子闻,周永智,但扬清,等.考虑微电网协同的线路冰灾下配电网韧性提升策略[J/OL].上海交通大学学报,2024:1-31[2024-11-26].<https://link.cnki.net/doi/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.117>.
FANG Ziwen, ZHOU Yongzhi, DAN Yangqing, et al. Resilience improvement strategy of distribution network during ice disaster considering microgrids coordination [J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024: 1-31 [2024-11-26]. <https://link.cnki.net/doi/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.117>.
- [9] YU W S, YOU R, ZHOU J, et al. Research on operation optimization of active distribution networks based on multi-port SOP integrated energy storage system [C]//2021 6th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). IEEE, 2021: 707-712.
- [10] 孟凡卓,贾宏宇,冯景瑶,等.基于智能软开关和储能的有源配电网优化运行[J].电气技术与经济,2024(12):352-355.
- [11] 叶宇鑫,李更丰,别朝红,等.考虑智能软开关的有源配电网恢复力评估与提升[J].全球能源互联网,2022,5(3):203-212.
YE Yuxin, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Resilience assessment and improvement of active distribution networks considering soft open point [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 203-212.
- [12] BAHRAMI M, VAKILIAN M, FARZIN H, et al. A stochastic framework for optimal island formation during two-phase natural disasters[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 2090-2101.
- [13] LUO S J, CHEN C M, QIU W Q, et al. Bi-layer optimal planning of rural distribution network based on KKT condition and Big-M method[J]. Energy Reports, 2021, 7: 637-644.
- [14] 卞艺衡,别朝红,黄格超,等.弹性配电网分布式可再生能源电源最优配置模型[J].全球能源互联网,2020,3(3):213-221.
BIAN Yiheng, BIE Zhaohong, HUANG Gechao, et al. Optimal renewable energy distributed generators placement for resilient

- distribution system[J].Journal of Global Energy Interconnection, 2020,3(3):213-221.
- [15] BIAN Y H, BIE Z H, LI G F. Proactive repair crew deployment to improve transmission system resilience against hurricanes [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(5): 870-882.
- [16] ARIF A, WANG Z Y, CHEN C, et al. A stochastic multi-commodity logistic model for disaster preparation in distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11 (1) : 565-576.
- [17] JIANG X Y, CHEN J, CHEN M, et al. Multi-stage dynamic post-disaster recovery strategy for distribution networks considering integrated energy and transportation networks [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(2) : 408-420.
- [18] GHOSH P, DE M L. A stochastic investment decision making method for distribution system resilience enhancement considering automation, hardening and distributed energy resources [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 237: 109395.
- [19] 张刚. 应对自然灾害的弹性配电网规划与恢复研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [20] 梁海平, 石皓岩, 王岩, 等. 基于提升韧性的输电网灾后应急维修策略优化[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 142-151.
LIANG Haiping, SHI Haoyan, WANG Yan, et al. Resilience - improving based optimization of post - disaster emergency maintenance strategy for transmission networks [J]. Electric Power, 2022, 55(3) : 142-151.
- [21] LI J Q, XU X Y, YAN Z, et al. Coordinated optimization of emergency response resources in transportation-power distribution networks under extreme events [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4607-4620.
- [22] GHASEMI M, KAZEMI A, GILANI M A, et al. A stochastic planning model for improving resilience of distribution system considering master-slave distributed generators and network reconfiguration [J]. IEEE Access, 2021, 9: 78859-78872.
- [23] HUBBLE A H, USTUN T S. Feasibility of microgrid optimization and grid extension for rural electrification [C] // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). IEEE, 2016: 1266-1269.
- [24] 王辉, 王勇, 张晓滨, 等. 构网型分布式电源渗透率高的微电网潮流计算及优化控制[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(4) : 35-43.
WANG Hui, WANG Yong, ZHANG Xiaobin, et al. Power flow calculation and optimization control of the microgrid with high Penetration of grid-forming distributed generators [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(4) : 35-43.
- [25] 袁晓冬, 郁正纲, 张宸宇, 等. 计及光伏区间预测和储能SOC均衡的配电网优化[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6) : 598-607.
YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, ZHANG Chenyu, et al. Optimization operation of distribution network considering photovoltaic interval prediction and energy storage SOC equilibrium [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2 (6) : 598-607.
- [26] 张新鹤, 熊俊杰, 何桂雄, 等. 计及柔性负荷的乡村地区电-热多能系统经济优化运行[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(5) : 501-511.
ZHANG Xinhe, XIONG Junjie, HE Guixiong, et al. Economical and optimal operation of rural electric heating multi-energy system considering flexible load [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5) : 501-511.
- [27] 王笑雪, 迟林林, 陈海文. 考虑移动储能的风雨灾害配电网弹性提升方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(5) : 69-79.
WANG Xiaoxue, CHI Linlin, CHEN Haiwen. Elastic lifting method of distribution network in wind and rain disaster considering mobile energy storage [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36 (5) : 69-79.
- [28] 姚艳, 许家玉, 崔勤越. 基于DistFlow的含分布式电源配电网优化重构模型[J]. 能源工程, 2020, 40(1) : 12-16.
YAO Yan, XU Jiayu, CUI Qinyue. Study on optimization reconfiguration modelling for distribution network with distributed generators based on DistFlow equations [J]. Energy Engineering, 2020, 40(1) : 12-16.
- [29] WANG S X, CHEN S J, GE L J, et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3) : 1111-1123.

收稿日期: 2024-11-27

修回日期: 2025-03-06

作者简介:

梁伟宸(1989), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网保护与控制;

马鑫晟(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网;

李 焯(1979), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为智能配电网;

吴 盈(2000), 通信作者(xxxxxxx123456@163.com), 男, 硕士在读, 主要研究方向为电力系统灾后恢复;

孙嘉祖(1997), 男, 硕士在读, 主要研究方向为电力系统调度。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.240508

考虑配电网结构演化的光储充柔性互联规划方法

侯承昊*, 闫鹏飞, 王启民, 朱 辉, 陈亚潇

(国网山东省电力公司聊城供电公司, 山东 聊城 252000)

摘要:随着电动汽车(electric vehicles, EVs)的不断普及,含光储的快速充电站逐渐成为配电网的重要负荷类型,光储充一体的快速充电站的运行状态将影响配电网的运行状态。本文针对光储充接入的配电网问题,通过柔性互联配合储能实现配电网的潮流分布的调整,提出了一种考虑配电网结构演化的光储充柔性互联规划方法。本方法分成两层实现规划,上层基于蒙特卡洛模拟实现配电网结构演化的模拟,下层以配电网的运行成本为优化目标实现柔性互联装置的规划。首先,以快速充电站(fast charging station, FCS)、储能(energy storage, ES)和软开关(soft open point, SOP)为研究对象,建立快速充电站充电负荷模型,建立储能充放电模型,建立 SOP 互联装置功率交互模型。其次,考虑配电网的负荷需求,构建基于节点度和联络距离的配电网结构演化概率模型。再次,建立以配电网运行费用为优化目标的 SOP 柔性互联规划模型,进而构建双层求解算法,上层算法基于蒙特卡洛模拟实现配电网结构演化的模拟,从而确定配电网的演化结构;下层算法基于上层演化结构,考虑充电负荷、储能的充放电情况和 SOP 的功率交互情况,对 SOP 的柔性互联位置做出规划。最后,基于 IEEE 33 节点算例,对本文所提方法进行了验证,仿真结果表明,当采用本文所提方法时,配电网的运行成本、有功网损和电压越限情况得到了改善。

关键词:软开关;柔性化互联;快速充电站;配电网优化运行

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)01-0056-10

A Flexible Interconnection Planning Method for Photovoltaic, Energy Storage and Charging Considering the Structural Evolution of the Distribution Network

HOU Chenghao*, YAN Pengfei, WANG Qimin, ZHU Hui, CHEN Yaxiao

(State Grid Liaocheng Power Supply Company, Liaocheng 252000, China)

Abstract: With the continuous popularization of electric vehicles (EVs), fast charging stations (FCSs) integrated with photovoltaic and energy storage gradually become an important load type of the distribution network. The operation status of integrated FCSs with photovoltaic energy storage and charging will affect the operation status of the distribution network. Aiming at the problem of the distribution network, this paper realizes the adjustment of the power flow distribution of the distribution network through flexible interconnection in cooperation with energy storage. And a flexible interconnection planning method is proposed for photovoltaic, energy storage and charging considering the structural evolution of the distribution network. This method realizes the planning in two layers. The upper layer realizes the simulation of the structural evolution of the distribution network based on Monte Carlo simulation. And the lower layer realizes the planning of the flexible interconnection device with the operation cost of the distribution network as the optimization objective. Firstly, taking the FCS, energy storage (ES) and soft open point (SOP) as the research objects, a charging load model of the FCS, a charging and discharging model of the energy storage, and a power interaction model of the SOP interconnection device are established. Secondly, considering the load demand of the distribution network, a probability model of the structural evolution of the distribution network based on the node degree and the connection distance is constructed. Thirdly, an SOP flexible interconnection planning model with the operation cost of the distribution network as the optimization objective is established. Then a two-layer solution algorithm is constructed. The upper-layer algorithm realizes the simulation of the structural evolution of the distribution network based on Monte Carlo simulation, so as to determine the evolution structure of the distribution

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520611240005)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (520611240005).

network. The lower-layer algorithm makes a plan for the flexible interconnection location of the SOP based on the upper-layer evolution structure, taking into account the charging load, the charging and discharging conditions of the energy storage, and the power interaction conditions of the SOP. Finally, the method proposed in this paper is verified based on the 33-node system. The simulation results show that when the proposed method in this paper is adopted, the operation cost, active power loss and voltage violation situation of the distribution network are improved.

Keywords: soft open point; flexible interconnection; fast charging station; optimization operation of distribution network

0 引言

随着全球能源结构的调整,以清洁能源为核心的消费体系已成为势不可挡的发展趋势。光储充系统作为新型能源技术之一,具有很高的潜力和实际应用价值,可为能源转型提供有效的解决方案。为应对全球范围内传统能源逐渐枯竭、环境问题逐渐加剧的挑战,我国政府不断推动能源革命,加速向新能源替代转型^[1]。光储充一体化快速充电站,一方面有利于促进新能源发电的就地消纳,提高配电网新能源发电的消纳水平;另一方面可以丰富快速充电站的运行方式,增加光储充一体充电站与电网能量交互的方式^[2]。

为此国内外学者开展了对含光储充的配电网的研究。文献[3]综合考虑配电网、新能源发电、储能和充电负荷的源-荷匹配关系,提出了一种基于混合整数的成本最低能量调度策略。文献[4]则针对光储充一体充电站进行了系统架构的分析,基于分时电价提出了基于削峰的优化调度策略。文献[5]综合考虑储能系统的运行成本、充电站的运行费用,提出了一种多时间尺度自适应鲁棒多层调度优化策略。文献[6]分析了实时电价对电网负荷的影响,进而提出了基于实时电价的光储充一体化充电站优化调度方法,但是没有考虑实时电价对充电负荷需求响应的影响。文献[7]首先分析了负荷需求响应模型的建模方法,进而提出了基于需求响应的光储充一体充电站运行模式切换方法。但是上述研究并没有进一步深入探究光储充一体充电站对配电网的负面影响。文献[8]对居民区充电站进行了充电负荷建模,并构建以负荷曲线的峰谷差最小化为目标的优化模型。通过需求响应参与削峰填谷,实现负荷曲线的峰谷差的优化,但是需求响应参与调控的能力有限。文献[9]综合分析电动汽车充电负荷、光伏发电及储能系统等的运行特性,提出了考虑电网购

电成本和储能运行成本的多目标优化模型。虽然该方法在一定程度上缓解了电动汽车负荷对电网产生的负面影响,但是该优化模型不适用于快速充电站。文献[10]针对以分布式电源和储能为源、以普通负荷和充电负荷为荷的微电网,提出了基于多智能体的源-荷互动优化方法,但是该方法不适用于配电网的优化。

近年来,直流柔性互联技术的迅速发展引起了国内外的高度重视。为验证软开关(soft open point, SOP)的性能特性,文献[11]比较了SOP柔性互联装置与传统联络开关的性能差异,SOP的有功和无功功率流灵活可控性有助于提高网络的性能。为缓解高渗透分布式发电输出功率的波动将导致配电站区域的电压严重越限问题,文献[12]提出使用SOP进行配电站区域柔性互联,以缓解电压越限和电压波动。因此,SOP在缓解电力系统运行问题和提高网络灵活性方面具有重要的作用。

在SOP应用方面,为实现铁路电气化系统和当地低压配电网的柔性互联,提高两个网络的灵活性和可控性,文献[13]提出基于SOP的智能软开关,实现了不同平均功率水平下两个网络之间的能量传输。在应对极端事件方面,为应对自然灾害、网络攻击等极端事件导致的停电事故,并降低电网的失负荷率与经济损失,对于多电压等级配电网而言,其柔性互联的潜力被忽视。文献[14]对多电压等级配电系统智能软开关技术展开研究,并提出了多电压等级配电系统智能软开关协同配置模型。文献[15]针对极端灾害会导致配电网线路断开和负荷失电等问题,提出了以智能软开关与移动储能作为灵活性资源的两阶段配电网韧性提升策略,基于灾前部署方案,建立多源协同的配电网灾后故障恢复混合二阶锥规划模型,进而考虑智能软开关、移动储能的优化调度及电动汽车充放电,求解得到最优灾后故障恢复方案。通过上述研究可知,SOP可以实现不同网

络之间的互联。为进一步发掘 SOP 的应用潜力,文献[16]基于 SOP 提出了一种计及阻塞管理的交直流柔性配电网协调优化调度方法,以电价手段引导配电网之间的友好互动,但是忽略了 SOP 接入位置对配电网运行状态的影响。文献[17]则提出了一种基于动态权重的柔性互联配电系统自适应优化调度策略,通过动态调整 SOP 的交互功率实现了配电网系统的潮流分布的动态调整,但是也没有考虑 SOP 接入点对配电网潮流分布的影响。在提高配电网韧性方面,文献[18]在多阶段弹性提升过程中,考虑了分布式发电(distributed generation, DG)规划、主动孤岛运行、SOP 快速故障隔离和供电恢复,建立了含 SOP 的多阶段混合整数线性规划模型,通过 SOP 实现了故障隔离和非故障区域供电恢复,但是由于 SOP 的接入点是提前设定好的,因此其故障恢复能力受到了限制。文献[19]针对具有多个交流供电区域的柔性互联配电网的故障恢复问题,建立了配电网柔性互联的拓扑结构和 SOP 的故障恢复模型,并在此基础上,建立了柔性互联配电网故障恢复的随机优化模型。文献[20]则基于 SOP 提出了一种联合网络重构的配电网供电恢复策略,通过储能型 SOP 和网络重构实现了极端事件下主动配电网的快速恢复。上述研究表明,SOP 的应用能够实现配电网内部或者外部的柔性互联,因此 SOP 对于解决光储充接入配电网产生的问题提供了思路。

在光储充柔性互联方面,文献[21]针对分布式光伏出力随机性的问题,提出了一种基于柔性互联的系统优化运行策略,该策略主要解决光伏出力随机性引发的功率不平衡问题,但是没有考虑配电网的运行成本。由于网络结构的固有限制,传统开环交流配电网的风险控制能力受到极大限制,阻碍了大规模可再生能源并入电网。文献[22]提出了一种有效的风险评估模型和风险规避方法,以充分利用柔性直流互联来提高风险控制能力,提高可再生能源在配电网中的渗透率,但是该方法并没有考虑阻塞管理问题。文献[23]针对配电网大规模分布式电源和充电站,提出了基于 SOP 的高度集成的多站系统融合的协调控制策略,该方法通过分布式电源和充电负荷时空特性,提高了分布式电源和充电负荷的渗透水平,但是该方法仅通过考虑分布式电源与

充电负荷的匹配程度实现源-荷的匹配。为此,为减少在高比例光伏接入下由于潮流倒送造成的网络损耗,文献[24]提出了基于 SOP 和潮流控制器的高比例光伏接入情况下的主动配电网协调优化策略,通过 SOP 调整光伏接入功率的流向,从而实现网络损耗的减少,但是该方法仅考虑了配电网的网络损耗,并没有考虑配电网的运行成本。文献[25]提出了基于 SOP 和储能的两阶段规划模型来解决配电网发生故障时 SOP 接入对负荷转移的影响。文献[26]提出了在 SOP 直流侧接入光储一体化系统对柔性配电网进行潮流优化。但是文献[25]和文献[26]并没有综合考虑 SOP 接入位置对配电网潮流的影响。

综上所述,SOP 柔性互联为光储充的并网提供了解决思路,在 SOP 柔性互联规划方面,现有的规划方法仅考虑了当前的配电网的拓扑结构状态,随着城市电网的发展,城市配电网拓扑结构将发生变化,因此,本文提出了基于考虑配电网结构演化的光储充柔性互联规划方法。本文的主要工作如下。

1) 提出配电网结构演化模型。本文针对新生用电节点对配电网拓扑结构的影响,提出考虑配电网节点度和接入位置的配电网结构演化概率模型,以实现配电网结构演化的模拟。

2) 提出考虑配电网结构演化的光储充柔性互联双层规划方法。上层算法基于配电网结构演化模型,采用蒙特卡洛模拟实现配电网演化结构的仿真;下层算法考虑配电网运行费用和运行状态,对 SOP 的柔性互联位置进行规划。

1 系统模型

光储充一体快速充电站拓扑结构如图 1 所示。

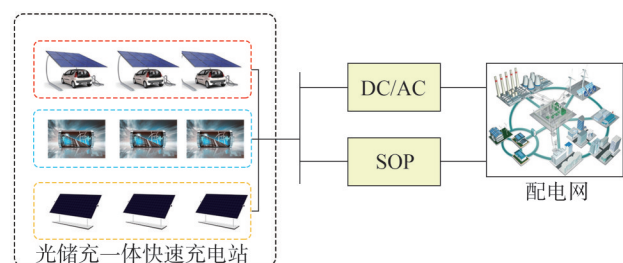


图 1 拓扑结构图

Fig.1 Topological structure diagram

在图 1 中光储充一体快速充电站包含快速充电站、储能和光伏发电,三者可通过 DC/AC 与配电网实现并网,也可通过 SOP 与配电网实现柔性互联。

1.1 快速充电站模型

对于充电站而言,其内部包含了多个充电桩,因此快速充电站的充电负荷是由充电桩的充电负荷聚合而成。

$$P_{\text{FCS}} = \sum_{i_{\text{FCS}}=1}^{N_{\text{pile}}} \mu_{i_{\text{FCS}}} P_{\text{pile}} \quad (1)$$

$$\mu_{i_{\text{FCS}}} = \begin{cases} 0, & \text{充电桩未被使用} \\ 1, & \text{充电桩被使用} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{FCS} 为快速充电站的充电负荷; $\mu_{i_{\text{FCS}}}$ 为二进制变量,表示充电桩的使用状态; i_{FCS} 为充电站内充电桩的编号; P_{pile} 为充电桩的充电功率; N_{pile} 为快速充电站内充电桩的数目。

1.2 储能模型

对于快速充电站而言,电动汽车的集中充电将对电网产生负面影响,因此在快速充电站配备储能,通过控制储能的充放电状态能够有效缓解充电负荷对电网产生的影响。

$$P_{\text{ES},t} = \mu_{\text{ch},t} P_{\text{ch},t} + \mu_{\text{dis},t} P_{\text{dis},t} \quad (3)$$

$$\mu_{\text{ch},t} = \begin{cases} 1, & \text{充电状态} \\ 0, & \text{未充电状态} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{dis},t} = \begin{cases} 1, & \text{放电状态} \\ 0, & \text{未放电状态} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{ES},t}$ 为 t 时段储能的功率; $P_{\text{ch},t}$ 为 t 时段储能的充电功率; $P_{\text{dis},t}$ 为 t 时段储能的放电功率; $\mu_{\text{ch},t}$ 和 $\mu_{\text{dis},t}$ 为二进制变量,表示储能能在 t 时段的充放电状态。

1.3 SOP 模型

采用 SOP 实现快速充电站的柔性互联。通过 SOP 充电站可实现功率分配,充电站将不再从单一的节点获取电能,可通过 SOP 互联,实现多节点功率获取,同时可以实现功率的双向流动。

$$P_{\text{sop},t} = \mu_{\text{sop},t}^+ P_{\text{sop},t}^+ + \mu_{\text{sop},t}^- P_{\text{sop},t}^- \quad (6)$$

$$Q_{\text{sop},t} = \eta_{\text{sop},t}^+ Q_{\text{sop},t}^+ + \eta_{\text{sop},t}^- Q_{\text{sop},t}^- \quad (7)$$

$$\mu_{\text{sop},t}^+ = \begin{cases} 0, & \text{未正向有功功率传输} \\ 1, & \text{正向有功功率传输} \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{\text{sop},t}^- = \begin{cases} 0, & \text{未反向有功功率传输} \\ 1, & \text{反向有功功率传输} \end{cases} \quad (9)$$

$$\eta_{\text{sop},t}^+ = \begin{cases} 0, & \text{未正向无功功率传输} \\ 1, & \text{正向有功功率传输} \end{cases} \quad (10)$$

$$\eta_{\text{sop},t}^- = \begin{cases} 0, & \text{未反向无功功率传输} \\ 1, & \text{反向有功功率传输} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{sop},t}$ 为 t 时段充电站通过 SOP 的有功功率交换值; $P_{\text{sop},t}^+$ 为 t 时段其他节点通过 SOP 柔性互联传输给充电站节点的有功功率值; $P_{\text{sop},t}^-$ 为 t 时段充电站通过 SOP 柔性互联传输给其他节点的有功功率值; $\mu_{\text{sop},t}^+$ 和 $\mu_{\text{sop},t}^-$ 为二进制变量,表示 t 时段 SOP 的有功功率的流向状态; $Q_{\text{sop},t}$ 为 t 时段充电站通过 SOP 的无功功率交换值; $Q_{\text{sop},t}^+$ 为 t 时段其他节点通过 SOP 柔性互联传输给充电站节点的无功功率值; $Q_{\text{sop},t}^-$ 为 t 时段充电站通过 SOP 柔性互联传输给其他节点的无功功率值; $\eta_{\text{sop},t}^+$ 和 $\eta_{\text{sop},t}^-$ 为二进制变量,表示 t 时段 SOP 的无功功率的流向状态。

2 基于柔性互联含光储充的配电网规划策略

2.1 配电网结构演化模型

当新的负荷需求产生后,在本文中统称为用电新生节点,当用电新生节点与已有的电网距离较近时,可直接并网;当距离较远时,应建立中间用电新生节点。

假设,初始配电网包含 n 个节点和 m 条支路,在新的负荷需求产生后,需要新加入用电新生节点,用电新生节点通过特定的择优原则连接到现存的配电网节点上。用电新生节点连接到节点 i 的概率为

$$P_i^{\text{new}} = \frac{\partial_i}{\sum_j \partial_j} \quad (12)$$

式中: ∂_i 为用电新生节点连接到节点 i 的优选因子; j 为除新生节点外的其他配电网节点; ∂_j 为用电新生节点连接到节点 j 的优选因子。

$$\partial_i = \left(\frac{k_i}{\sum_i k_i} \right)^\alpha \left(\frac{1/l_i}{\sum_i (1/l_i)} \right)^\beta, \alpha \geq 0, \beta \geq 0 \quad (13)$$

式中: k_i 为节点 i 的度; l_i 为用电新生节点到达节点 i 的物理距离; α 和 β 为调节指数,用于调节节点度和物理距离的影响。

2.2 SOP 规划方法

在已确定含光储的快速充电站接入位置的基础上,通过合理规划 SOP 的接入节点,并做出调度,能

有效降低配电网的运行成本,因此本文的优化目标为

$$F = \min f_{\text{Grid}} + f_{\text{ES}} + f_{\text{SOP}} + f_{\text{loss}} \quad (14)$$

式中: F 为配电网的运行费用; f_{Grid} 为配电网的购电费用; f_{ES} 为储能的运行费用; f_{SOP} 为SOP的调度运行费用; f_{loss} 为配电网的有功网损。

$$f_{\text{Grid}} = \sum_{t=1}^T \lambda_t S_t^{\text{grid}} \quad (15)$$

$$f_{\text{ES}} = \lambda_{\text{ES}} \sum_{t=1}^T S_t^{\text{ES}} \quad (16)$$

$$f_{\text{SOP}} = \lambda_{\text{SOP}} \sum_{t=1}^T S_t^{\text{SOP}} \quad (17)$$

$$f_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{node}}} \sum_{t=1}^T \sum_{ij}^{N_{\text{Branch}}} \varepsilon_i I_{t,ij} r_{ij} \Delta t \quad (18)$$

式中: T 为总的时段数目; λ_t 为 t 时段配电网的分时电价; S_t^{grid} 为 t 时段配电网的购电量; λ_{ES} 为储能的单位调度费用; S_t^{ES} 为 t 时段储能的充放电电量; λ_{SOP} 为SOP的单位调度费用; N_{node} 为配电网的节点数目; N_{Branch} 为配电网的支路数目; S_t^{SOP} 为 t 时段SOP的交互功率; ε_i 为二进制变量,当SOP接入节点 i 时 $\varepsilon_i = 1$,当SOP不接入节点 i 时 $\varepsilon_i = 0$; $I_{t,ij}$ 为 t 时段流过支路 ij 的电流幅值; r_{ij} 为支路 ij 的电阻值; Δt 为单位调度周期。

2.3 约束条件

2.3.1 配电网潮流运行约束条件

配电网潮流运行约束条件为式(19)一式(23)。

$$U_{\min}^2 \leq V_{i,t} \leq U_{\max}^2 \quad (19)$$

$$P_{ij,t} + \sum_{i_{\text{PV}}=1}^{N_{\text{PV}}} \kappa_j P_{t,i_{\text{PV}}} = r_{ij} I_{ij,t}^2 + P_{j,t} + \sum_{j \rightarrow k} P_{jk,t} + \sum_{i_{\text{FCS}}=1}^{N_{\text{FCS}}} v_j P_{t,i_{\text{FCS}}} + \sum_{i_{\text{SOP}}=1}^{N_{\text{SOP}}} s_j P_{t,i_{\text{SOP}}} + \sum_{i_{\text{ES}}=1}^{N_{\text{ES}}} \chi_j (\mu_{\text{ch},t} P_{\text{ch},t} + \frac{\mu_{\text{dis},t} P_{\text{dis},t}}{\varphi}) \quad (20)$$

$$Q_{ij,t} = x_{ij} I_{ij,t}^2 + q_{j,t} + \sum_{j \rightarrow k} Q_{jk,t} \quad (21)$$

$$V_{i,t} + I_{ij,t}^2 (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) = 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) + V_{j,t} \quad (22)$$

$$\left\| \begin{array}{l} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ V_{i,t} - I_{ij,t}^2 \end{array} \right\| \leq V_{i,t} + I_{ij,t}^2 \quad (23)$$

式中: k 为配电网节点; $j \rightarrow k$ 表示功率由 j 节点流向 k 节点; $P_{ij,t}$ 为 t 时段支路 ij 的有功功率; $Q_{ij,t}$ 为 t 时段

支路 jk 的无功功率; $P_{i,t}$ 为 t 时段支路 i 的有功功率; $Q_{jk,t}$ 为 t 时段支路 jk 的无功功率; $V_{i,t}$ 为 t 时段节点 i 电压幅值的平方; $I_{ij,t}$ 为 t 时段支路 ij 的电流幅值的平方; U_{\min} 和 U_{\max} 分别为节点电压幅值的最小值和最大值; x_{ij} 为支路 ij 的电抗值; N_{PV} 为光伏发电的数目; $P_{t,i_{\text{PV}}}$ 为 t 时段光伏 i_{PV} 的发电功率; κ_j 为二进制变量,表示光伏是否安装于节点 j 处; i_{SOP} 为SOP的编号; $P_{t,i_{\text{SOP}}}$ 为SOP的交互功率; s_j 为二进制变量,表示SOP是否与节点 j 实现互联; $P_{t,i_{\text{ES}}}$ 为储能 i_{ES} 的功率; χ_j 为二进制变量,表示储能是否安装于节点 j 处; $P_{t,i_{\text{FCS}}}$ 为快速充电站 i_{FCS} 的功率; v_j 为二进制变量,表示快速充电站是否安装于节点 j 处; N_{PV} 为光伏发电的总数; N_{SOP} 为SOP的总数; N_{FCS} 为快速充电站的总数; N_{ES} 为储能的总数; $p_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 的有功负荷; $q_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 的无功负荷; φ 为储能的充放电效率; $P_{\text{ch},t}$ 为储能在 t 时段的充电功率; $P_{\text{dis},t}$ 为储能在 t 时段的放电功率。

2.3.2 储能约束条件

储能约束条件为式(24)一式(28)。

$$S_{\text{ES},t} = S_{\text{ES},t-1} + \varphi \mu_{\text{ch},t} P_{\text{ch},t} + \frac{\mu_{\text{dis},t} P_{\text{dis},t}}{\varphi} \quad (24)$$

$$S_{\text{ES},\min} \leq S_{\text{ES},t} \leq S_{\text{ES},\max} \quad (25)$$

$$P_{\text{ch},\min} \leq P_{\text{ch},t} \leq P_{\text{ch},\max} \quad (26)$$

$$P_{\text{dis},\min} \leq P_{\text{dis},t} \leq P_{\text{dis},\max} \quad (27)$$

$$0 \leq \mu_{\text{ch},t} + \mu_{\text{dis},t} \leq 1 \quad (28)$$

式中: $S_{\text{ES},t}$ 为储能在 t 时段的电量; $S_{\text{ES},\min}$ 为储能的最小剩余电量; $S_{\text{ES},\max}$ 为储能的剩余最大电量; $P_{\text{ch},\max}$ 和 $P_{\text{ch},\min}$ 分别为储能的充电功率和最小充电功率; $P_{\text{dis},\max}$ 和 $P_{\text{dis},\min}$ 为储能的放电功率和最小放电功率。

2.3.3 SOP约束条件

SOP约束条件为式(6)、式(7)、式(29)一式(35)。

$$P_{\text{sop},\min}^+ \leq P_{\text{sop},t}^+ \leq P_{\text{sop},\max}^+ \quad (29)$$

$$P_{\text{sop},\min}^- \leq P_{\text{sop},t}^- \leq P_{\text{sop},\max}^- \quad (30)$$

$$0 \leq \mu_{\text{sop},t}^+ + \mu_{\text{sop},t}^- \leq 1 \quad (31)$$

$$Q_{\text{sop},\min}^+ \leq Q_{\text{sop},t}^+ \leq Q_{\text{sop},\max}^+ \quad (32)$$

$$Q_{\text{sop},\min}^- \leq Q_{\text{sop},t}^- \leq Q_{\text{sop},\max}^- \quad (33)$$

$$0 \leq \eta_{\text{sop},t}^+ + \eta_{\text{sop},t}^- \leq 1 \quad (34)$$

$$\sqrt{(P_{\text{sop},t}^+)^2 + (Q_{\text{sop},t}^+)^2} \leq S_{\text{sop}} \quad (35)$$

式中: $P_{sop,max}^+$ 和 $P_{sop,min}^+$ 分别为 SOP 正向功率传输的最大值和最小值; $P_{sop,max}^-$ 和 $P_{sop,min}^-$ 分别为 SOP 反向功率传输的最大值和最小值; S_{sop} 为 SOP 的容量。

2.3.4 线路阻塞管理约束

$$-P_{ij,max} \leq P_{ij,t} \leq P_{ij,max} \quad (36)$$

式中: $P_{ij,max}$ 为线路 ij 的阻塞容量。

3 分层求解算法设计

本文构建了双层优化算法以实现所提策略的求解,上层算法实现配电网结构演化的计算;下层算法实现 SOP 位置的选择,同时对储能和 SOP 进行调度优化。算法架构如图 2 所示。

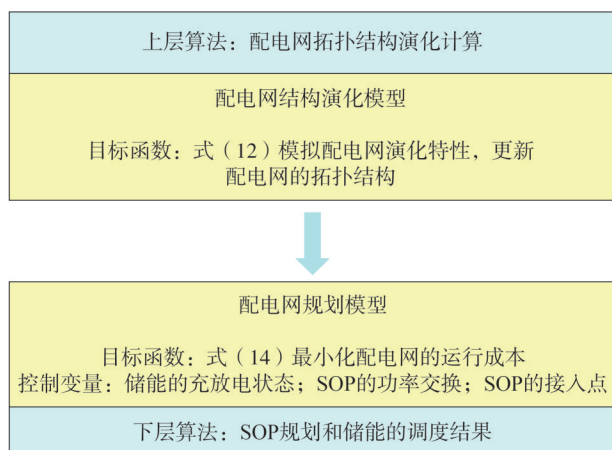


图2 算法架构图

Fig.2 Algorithm architecture diagram

在上层架构中,为能够在下层算法基础上减少未来配电网的运行费用,上层算法通过用电新生节点演化接入,模拟配电网拓扑结构的变化。在下层架构中,为能够在上层演化结果的基础上降低配电网的运行费用,下层算法通过规划 SOP 的接入点和储能的充放电,实现配电网运行成本的最小化。

算法流程如图 3 所示。

4 算例验证

图 4 为含光储充一体快速充电站的配电网拓扑结构,配电网以 IEEE 33 节点系统为基础进行了改进,分别在节点 11 和节点 25 处接入了快速充电站,其中包含了 5 个新生用电节点,充电站数据如表 1 所示,充电负荷分布情况如图 5 和图 6 所示。

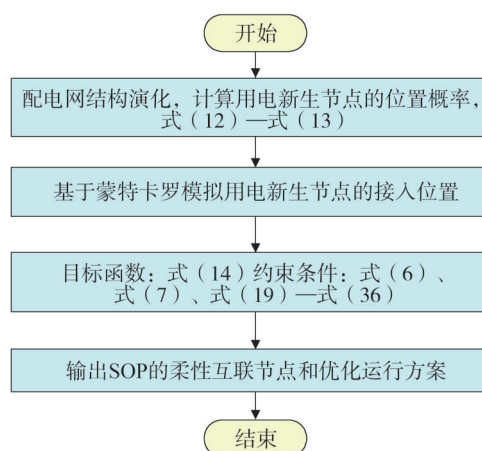


图3 算法流程图

Fig.3 Algorithm flow chart



图4 算例拓扑结构图

Fig.4 Example topology diagram

表 1 充电站数据

Table 1 Charging station data

| 充电站编号 | 接入节点 | 充电桩数 | 单桩功率/kW |
|-------|------|------|---------|
| 1 | 11 | 8 | 60 |
| 2 | 25 | 8 | 60 |

图 7 为配电网的分时电价,配电网分时电价被分成峰-谷-平三个不同的收费时段。表 2 为对比场景设定情况,场景 1 在考虑柔性互联情况下,实现对 SOP 的互联位置选择,同时实现对储能的调控;场景 2 在配电网新生用电节点的基础上,实现对 SOP 的互联位置选择,并对储能和柔性互联功率进行调控。

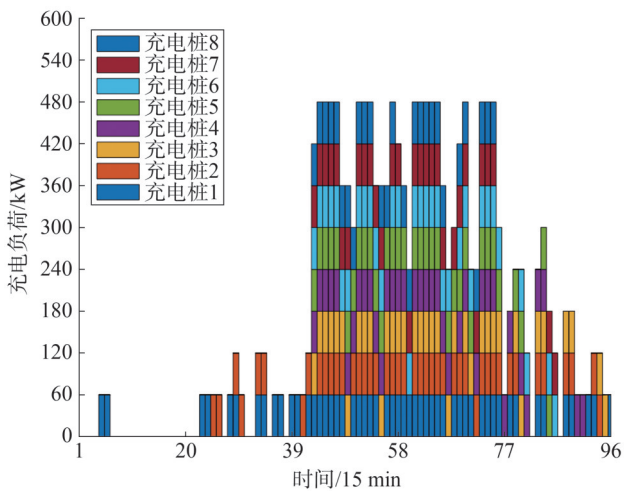


图5 充电站1的充电功率

Fig.5 Charging power of FCS 1

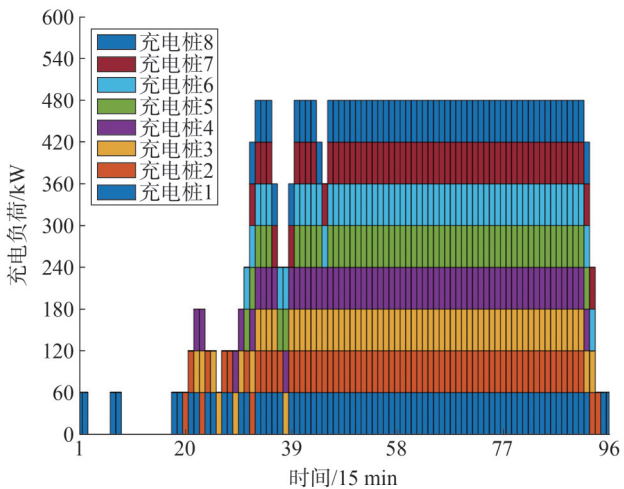


图6 充电站2的充电功率

Fig.6 Charging power of FCS 2

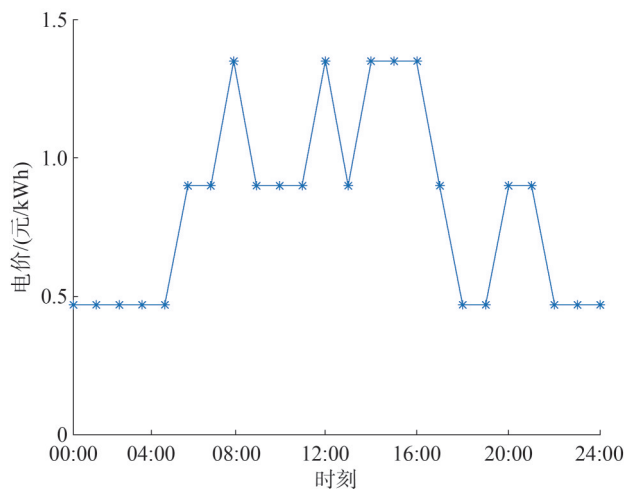


图7 分时电价分布图

Fig.7 Distribution map of time-of-use electricity prices

表2 对比场景设定情况

Table 2 Comparison of scene settings

| 场景编号 | 场景设定 |
|------|------------|
| 1 | 未考虑配电网结构演化 |
| 2 | 考虑配电网结构演化 |

4.1 SOP接入点及电压对比

场景1和场景2的SOP接入点情况如表3所示。

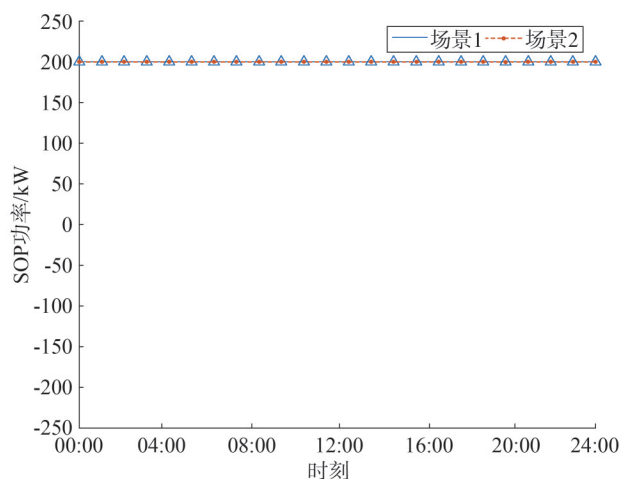
表3 SOP接入点对比

Table 3 SOP access point comparison

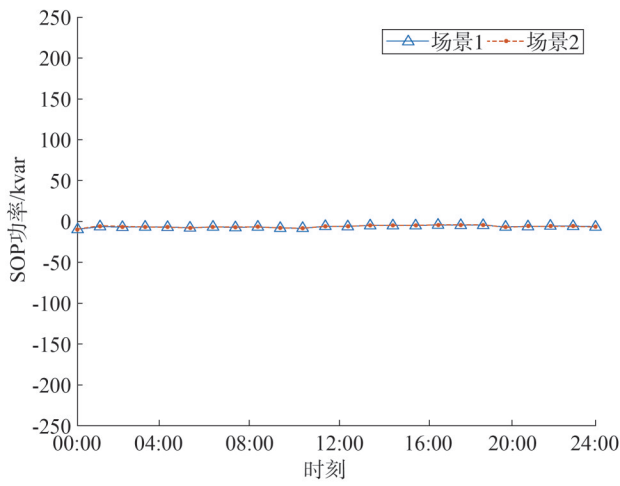
| 场景编号 | SOP 1 柔性互联节点 | SOP 2 柔性互联节点 |
|------|--------------|--------------|
| 1 | 19 | 28 |
| 2 | 19 | 31 |

通过表3可知,场景1在对SOP接入点规划过程中并未考虑配电网的结构演化特性,柔性互联节点最终确定为节点19和节点28;场景2采用了本文提出的考虑配电网结构演化特性的规划方法,柔性互联节点最终确定为节点19和节点31。

图8和图9分别为场景1和场景2的SOP功率交互情况。通过图8和图9可知,场景1和场景2的SOP功率交换状态基本上一致,但是两个场景的互联节点不同。图10和图11为场景1和场景2的电压分布情况。场景1在规划过程中仅考虑现有的配电网拓扑结构,未考虑新生用电节点的情况,因此其部分节点电压在新生用电节点接入后出现了越下限的情况。场景2在过程中考虑新生用电节点的情况,因此在新生用电节点接入后能够维持电压的正常状态。



(a)有功功率



(b)无功功率

图8 SOP1 功率交换状态

Fig.8 SOP1 power exchange status

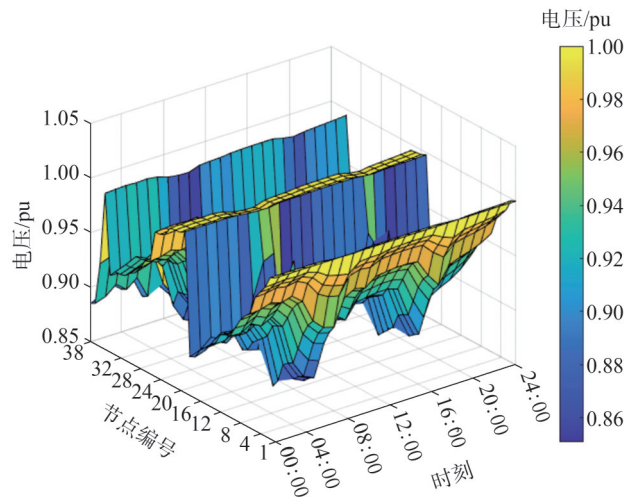
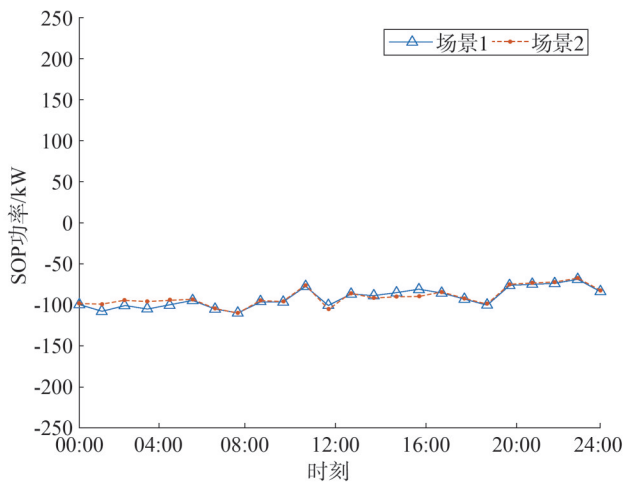


图10 场景1电压分布情况

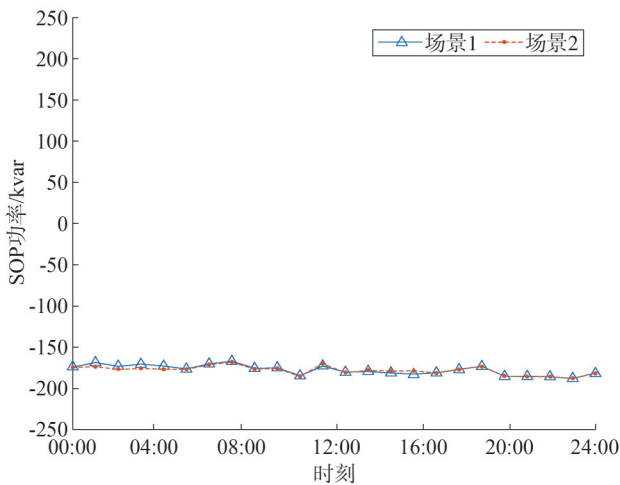
Fig.10 Voltage distribution in scenario 1



(a)有功功率

图9 SOP2 功率交换状态

Fig.9 SOP2 power exchange status



(b)无功功率

图9 SOP2 功率交换状态

Fig.9 SOP2 power exchange status

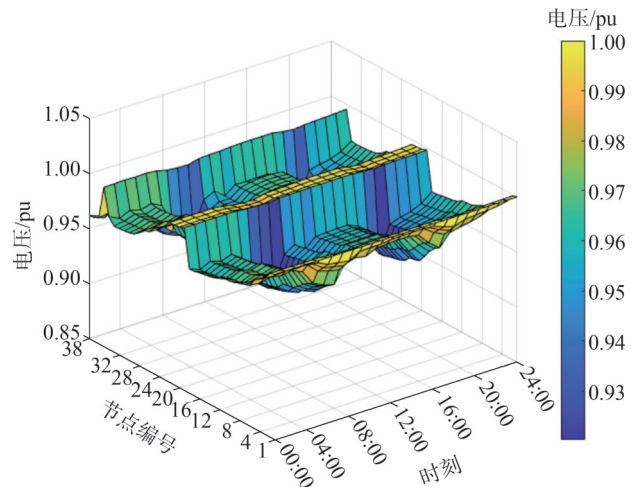


图11 场景2电压分布情况

Fig.11 Voltage distribution in scenario 2

4.2 配电网运行成本对比分析

表4为配电网的运行成本对比,表5为配电网的网损仿真结果。图12和图13为储能的工作状态。

表4 配电网运行成本

Table 4 Operating cost of distribution network 单位:元

| 场景 | 配电网运行成本 |
|----|-----------|
| 1 | 59 595.32 |
| 2 | 57 308.01 |

表5 配电网有功网损

Table 5 Active power loss of distribution network

单位:kWh

| 场景 | 配电网有功网损 |
|----|----------|
| 1 | 1 967.47 |
| 2 | 1 875.91 |

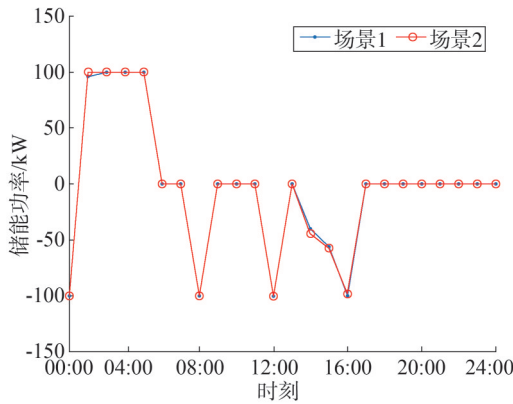


图12 储能1运行状态

Fig.12 Energy storage 1 operating status

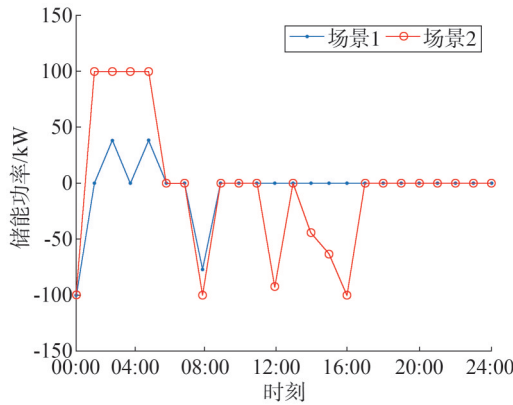


图13 储能2运行状态

Fig.13 Energy storage 2 operating status

通过表4和表5可知,场景2的规划方法在配电网运行成本和配电网有功网损方面都要优于场景1。由图12和图13可知,储能1的运行状态基本一致,这是由于场景1和场景2的SOP的柔性互联节点是相同的,且互联部分拓扑未发生较大变化,因此在储能的充放电方面并未产生较大差异。由图13可知,储能2的充放电状态在两个场景中存在较大差异,这是由于在场景2中储能2所属的充电站下游节点发生了变化,考虑到配电网结构的演化状态,在规划

过程中通过考虑拓扑结构的变化,实现对SOP柔性互联位置的规划选择。因此在改变柔性互联规划节点的同时,实现了对储能2充放电计划的调整,保证了配电网的运行效率。

5 结束语

本文提出了一种考虑配电网结构演化的光储充柔性互联规划方法,在建立系统模型的基础上,构建配电网结构演化模型,并在此基础上提出分层规划求解算法。通过仿真验证分析,采用本文所提策略能够有效降低配电网的运行成本和配电网的有功网损。

参考文献

- [1] 陈立阳,兰征,何东,等.光储快充站直接入的FIDN及其功率协调控制策略[J].智慧电力,2025,53(3):1-8.
CHEN Liyang, LAN Zheng, HE Dong, et al. FIDN with DC access of photovoltaic-energy storage fast-charging stations and its power coordination control strategy[J]. Smart Power, 2025, 53(3): 1-8.
- [2] 陈炯,吴文清,李豪,等.独立光储微电网控制策略研究[J].中国电力,2025,58(5):74-81,198.
CHEN Jiong, WU Wenqing, LI Hao, et al. Research on control strategy of independent micro-grid with photovoltaic energy storage [J]. Electric Power, 2025, 58(5): 74-81, 198.
- [3] SALEHPOUR M J, MOGHADDAS TAFRESHI S M. The effect of price responsive loads uncertainty on the risk-constrained optimal operation of a smart micro-grid [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 106: 546-560.
- [4] 王伟.光储充智慧充电站及其能量调度优化研究[D].武汉:武汉理工大学,2021.
- [5] 高昇宇,柳志航,卫志农,等.城市智能光储充电塔自适应鲁棒日前优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(20):39-48.
GAO Shengyu, LIU Zhihang, WEI Zhihong, et al. Adaptive robust day-ahead optimal dispatch for urban smart photovoltaic storage and charging tower [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 39-48.
- [6] 郭子瑶.光伏型电动汽车充电站实时能量管理策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [7] 蒋甜甜.基于需求响应的光储充一体化系统多目标优化运行研究[D].郑州:郑州大学,2020.
- [8] 汝改革.基于需求响应的电动汽车充电站优化运行研究[D].芜湖:安徽工程大学,2019.
- [9] 王一清,苏岭东,顾捷,等.计及电动汽车充电需求的配电网多场景低碳优化调度研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(7):32-44.
WANG Yiqing, SU Lingdong, GU Jie, et al. Multi-scenario low-carbon optimization scheduling study for urban distribution networks considering electric vehicle charging demand [J]. Water

- Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(7): 32-44.
- [10] 孙丛丛. 基于自动需求响应的微电网源储荷协调优化控制策略研究[D]. 上海: 上海电机学院, 2018.
- [11] EHSANBAKHSI M, SEPASIAN M S. Simultaneous siting and sizing of Soft Open Points and the allocation of Tie switches in active distribution network considering network reconfiguration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(1): 263-280.
- [12] YANG Z C, YANG F, MIN H D, et al. A local control strategy for voltage fluctuation suppression in a flexible interconnected distribution station area based on soft open point[J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4424.
- [13] KAMEL T, TIAN Z B, ZANGIABADI M, et al. Smart soft open point to synergically improve the energy efficiencies of the interconnected electrical railways with the low voltage grids [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142: 108288.
- [14] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14.
- [15] 李子晨, 米阳, 韩云昊, 等. 含智能软开关与移动储能的两阶段配电网韧性提升策略[J]. 上海电力大学学报, 2024, 40(3): 198-205.
LI Zichen, MI Yang, HAN Yunhao, et al. Two-stage distribution network resilience improvement strategy including soft open point and mobile energy storage [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2024, 40(3): 198-205.
- [16] 赵一奇, 郭力, 刘一欣, 等. 计及阻塞管理的交直流柔性配电网协调优化调度方法[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 622-633.
ZHAO Yiqi, GUO Li, LIU Yixin, et al. Coordinated optimal scheduling method of AC / DC flexible distribution network considering congestion management [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 622-633.
- [17] 邓正东, 朱晓丽, 段军鹏, 等. 基于动态权重的柔性互联配电网自适应优化调度[J/OL]. 电力建设, 2024: 1-11 [2024-12-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2583.tm.20241031.1649.004.html>.
DENG Zhengdong, ZHU Xiaoli, DUAN Junpeng, et al. Adaptive optimal dispatching of flexible interconnected distribution System based on dynamic weight [J/OL]. Electric Power Construction, 2024: 1-11 [2024-12-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2583.tm.20241031.1649.004.html>.
- [18] 赵晶晶, 李梓博, 刘帅, 等. 考虑智能软开关电压支撑的城市配电网弹性提升方法[J]. 电力建设, 2023, 44(7): 77-86.
ZHAO Jingjing, LI Zibo, LIU Shuai, et al. Resilience lifting method of urban distribution network considering soft open point voltage support [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(7): 77-86.
- [19] ZHAO Y D, XIONG W, YUAN X F, et al. A fault recovery strategy of flexible interconnected distribution network with SOP flexible closed-loop operation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142: 108360.
- [20] 喻希, 杨杉, 兰征, 等. 基于储能型智能软开关节点联合网络重构的配电网供电恢复策略[J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(1): 35-42.
YU Xi, YANG Shan, LAN Zheng, et al. Power supply restoration strategy for distribution with integrated network reconstruction based on energy storage intelligent soft switches [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2025, 39(1): 35-42.
- [21] 刘枕志, 庞丹, 葛津铭, 等. 计及光储接入场景下的柔性互联系统多模式优化运行[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(6): 1-10.
LIU Guangzhi, PANG Dan, GE Jinming, et al. The multi-mode optimization operation of the flexible interconnection system considering the photovoltaic and energy storage access scenarios [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(6): 1-10.
- [22] XIAO H, PEI W, DENG W, et al. Enhancing risk control ability of distribution network for improved renewable energy integration through flexible DC interconnection [J]. Applied Energy, 2021, 284: 116387.
- [23] HUO Q H, WANG W Y, YANG Y H, et al. Research on the application of SOP in multi-station integrated system [J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 630234.
- [24] YAN X W, WANG Q G, BU J Y. High penetration PV active distribution network power flow optimization and loss reduction based on flexible interconnection technology [J]. Electric Power Systems Research, 2024, 226: 109839.
- [25] JIA Y X, LI Q, LIAO X, et al. Research on the access planning of SOP and ESS in distribution network based on SOCP-SSGA [J]. Processes, 2023, 11(6): 1844.
- [26] 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.

收稿日期: 2024-12-01

修回日期: 2025-04-24

作者简介:

候承昊(1989), 通信作者(houchenghao2024@163.com), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电气工程及其自动化、新型电力系统;

闫鹏飞(1990), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新型电力系统分析、新能源消纳;

王启民(1999), 女, 硕士, 主要研究方向为配电网规划设计;

朱辉(1990), 男, 高级工程师, 主要研究方向为配电网规划设计;

陈亚潇(1989), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为配电网规划技术、新型电力系统。

(责任编辑 车永强)

基于改进天牛群优化ESN的海上风机叶片腐蚀速率预测

舒征宇*, 黄启昀, 张紫格, 任冠臣, 鲍刚

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000)

摘要:随着海上风电的迅速发展,风机叶片腐蚀速率预测对于海上风机叶片的日常运维极为重要,然而目前该领域多数研究成果考虑的腐蚀环境较为简单,难以直接应用于不间断运行的风机叶片腐蚀速率预测。为解决这一问题,建立一种结合改进天牛群优化(improved beetle swarm optimization, IBSO)算法和回声状态网络(echo state network, ESN)的海上风机叶片腐蚀速率预测模型(IBSO-ESN)。首先,对海上风机叶片腐蚀原理进行分析,确认主要腐蚀因素,尤其是考虑盐雾因素,并将主要腐蚀因素作为模型输入。其次,针对天牛群优化(beetle swarm optimization, BSO)算法存在的种群多样性低、易陷入局部最优问题,提出一种融合差分进化算法的IBSO算法,并利用其对ESN进行参数寻优。最后,应用参数最优ESN对海上风机叶片腐蚀速率进行预测。结果表明,该模型对于海上风机叶片前缘的均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)分别为0.188、1.526%,叶尖区域的RMSE、MAPE分别为0.177 9、1.311%,均远低于对比模型,能够为海上风机叶片腐蚀防护工作提供决策支持。

关键词:海上风机叶片;腐蚀防护;速率预测;天牛群优化;回声状态网络

中图分类号:TM315

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)01-0066-09

Corrosion Rate Prediction of Offshore Wind Turbine Blade Based on ESN Optimized by BSO

SHU Zhengyu*, HUANG Qiyun, ZHANG Zige, REN Guanchen, BAO Gang

(College of Electrical Engineering&New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: Abstract: With the rapid development of offshore wind power, turbine blade corrosion rate prediction is extremely important for the daily operation and maintenance of offshore turbine blades. However, most existing studies in this field consider relatively simplistic corrosion environments, making them difficult to apply directly to the continuous operation of wind turbine blades. To solve this problem, a corrosion rate prediction model for offshore wind turbine blades is established based on the echo state network (ESN) optimized by improved beetle swarm optimization. Firstly, the corrosion principles of offshore turbine blades are analyzed, and the main corrosion factors are identified and used as model inputs. Second, to overcome the limitations of the beetle swarm optimization (BSO), including low population diversity and susceptibility to local optima, BSO incorporating differential evolution is developed to optimize the parameters of the ESN. Finally, the parameter optimal ESN is applied to predict the corrosion rate of offshore wind turbine blades. The results show that the RMSE and MAPE values of the model for the leading edge and tip regions of offshore wind turbine blades are 0.188, 1.526%, and 0.177 9, 1.311%, respectively, which are much lower than those of the comparison model. These findings indicate that the proposed model can provide decision-making support for the corrosion protection of offshore wind turbine blades.

Keywords: offshore wind turbine blades; corrosion protection; rate prediction; bacterial swarm optimization; echo state network

基金项目:国家自然科学基金项目(62476153)。

National Natural Science Foundation of China(62476153).

0 引言

目前,风电发展已经步入了海上时代,复合材料因其具有轻质、高强、耐腐蚀^[1]等特点,在海上风力发电机领域被大量使用,尤其是在风机叶片的制作上。但是复合材料长期暴露在复杂的海洋环境下,会遭遇各种各样的腐蚀与老化^[2]。暴露一段时间后,复合材料表面会发生一定程度的纤维裸露,随着时间进一步推移,外露纤维量将迅速增加,并且复合材料树脂集体呈坑洼状,粗糙程度加大^[3]。因此,利用叶片腐蚀影响因素准确预测海上风机叶片腐蚀速率,及时掌握叶片腐蚀情况,对制定叶片维修策略以及保证叶片正常运行具有非常重要的意义。

目前风机叶片虽采用耐腐蚀性复合材料,但在海洋环境下仍会遭受一系列腐蚀,导致叶片结构异常,发电效率下降^[4]。为降低腐蚀带来的损失,国内外学者针对复合材料寿命、腐蚀速率预测进行了大量研究,主要预测方法包括:机器学习法、力学性能法、经验模型法、物理化学模型法等。Liu等^[5]采用径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络预测复合涂层的腐蚀速率,虽然预测精度有所提高,但其计算过程略显复杂。王涛等^[6]结合玻璃纤维的弯曲强度保留率,搭建反向传播神经网络对复合材料进行耐腐蚀预测,该方法所得到的预测值与实测值具有较好拟合度。曹端兴等^[7]利用改进的Hashin分层失效准则作为分层判据,选取危险层间的局部平均应力,降低了复合材料耐腐蚀寿命预测误差。Gao等^[8]描述了强度和刚度退化引起损伤的发展过程,从强度退化和刚度退化的角度提出复合材料寿命预测方法。孙栋钦等^[9]针对风机叶片实际运行情况,考虑光照、温度、湿度等因素,构建结合海鸥优化算法(seagull optimization algorithm, SOA)与核极限学习机的风机叶片腐蚀速率预测模型。以上研究虽具有较好的预测效果,但仍存在一些不足之处,例如神经网络在大样本情况下存在运算量大、耗费时间较长等问题;所作研究多为实验室内静态材料耐腐蚀预测,未能考虑实际工况下风机叶片所面临的复杂动态腐蚀环境;在进行多方因素考虑时,

未将最重要的海上盐雾环境加入其中。

鉴于此,文中提出一种基于改进天牛群优化(improved beetle swarm optimization, IBSO)算法和回声状态网络(echo state network, ESN)的海上风机叶片腐蚀速率预测模型。首先,确定盐雾等环境因素对叶片的腐蚀影响;其次,将具有强适应性且结构简单的IBSO算法与ESN相结合,利用IBSO算法对ESN进行参数优化,确定出最佳的ESN网络结构;最后,利用海上风电场实测数据进行模型训练与仿真。

1 腐蚀原理

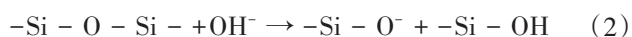
目前环氧树脂增强玻璃纤维复合材料因其卓越的力学性能和耐腐蚀特性,被广泛应用于全球风力发电机叶片的制造。然而,叶片的耐腐蚀性能是影响其运行状态的关键因素,尤其是在海上风电场的发展背景下。海上风力发电机叶片的腐蚀主要原因为水解反应、光氧老化、盐雾腐蚀以及摩擦腐蚀等^[10-12]。

首先,水分子易与基体树脂发生水解反应,令树脂基体产生微裂纹,微裂纹拓展将进一步增强叶片的吸湿能力,加剧裂纹的拓展,再加上分子与叶片的摩擦作用,加速了叶片腐蚀现象的产生^[13]。水解反应式为



其次,受阳光中紫外线影响,树脂基体内的高分子化合物吸收的光子能量大于其化学键能,导致树脂分子链断裂;受空气中氧气的影响,树脂基体随着时间的推移,将与氧气发生反应,并生成活性自由基^[14],导致基体结构变化。

然后,由于海上风电场长期处于海洋盐雾环境中,海洋大气积聚大量 Cl^- ,易与玻璃纤维上的活泼金属离子反应,进而破坏纤维组成成分^[15]。同时盐雾中的水分子能与纤维表面的碱性金属离子发生离子交换反应,使得叶片上的水体呈碱性,将导致 OH^- 与纤维中的 SiO_2 发生反应,造成叶片腐蚀现象^[16],其反应式为



最后,风速不仅影响着风机转速,还影响着空气中的小分子对风机叶片撞击力度。在应力作用

下玻璃纤维的耐腐蚀性能会下降^[17],叶片同时受到风力和风机旋转产生不断交变的力,导致树脂基体时刻处于紧绷状态,再加上空气中的小分子受到风力吹动,频繁撞击、摩擦叶片表面,极易造成树脂基体呈坑洼状,粗糙程度加大,进而产生磨损现象。

经过上述腐蚀原理分析,文中将Cl⁻浓度、光照强度、湿度、温度、风速以及叶片服役时间作为影响预测结果的条件。

2 腐蚀预测模型原理

2.1 改进天牛群优化算法

天牛群优化 (beetle swarm optimization, BSO) 算法^[18]是结合粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法思想,在天牛须搜索 (beetle antennae search, BAS) 算法^[19]上将天牛个体扩展为天牛群体的智能仿生优化算法,具备运算量小、收敛快、适应性强、原理简单等特点。其核心思想源于天牛在觅食过程中利用其触须对食物气味浓度的感知差异来决定行进方向的自然现象。在BSO算法中,每个个体均代表问题的一个潜在解,而群体的最优解则象征着天牛群体觅食的终极目标。该算法通过引入群体内的信息交流机制,能够使个体与群体之间互相交流学习,确定下一次迭代的搜索方向,进而增强算法的搜索能力。然而在算法的迭代过程中,一旦天牛感应到高浓度的个体,天牛群体就会不断向该高浓度个体靠近,此过程同时也导致天牛种群多样性降低,甚至造成种群陷入局部最优情况。

针对以上问题,文中提出一种结合差分进化算法^[20]的IBSO算法。差分进化算法通过向量隔代间的差分原理进化种群,从而获得变异产生的新个体,并经过交叉、选择,使天牛群体趋向种群最优,以此来增加种群多样性,降低种群中局部最优的概率。但由于传统差分进化算法的控制参数极度依赖设计者的个人经验,因此在IBSO算法中,对差分进化算法的变异算子和交叉概率添加自适应机制^[21],以使算法结果更具客观性。自适应变异交叉流程如图1所示。

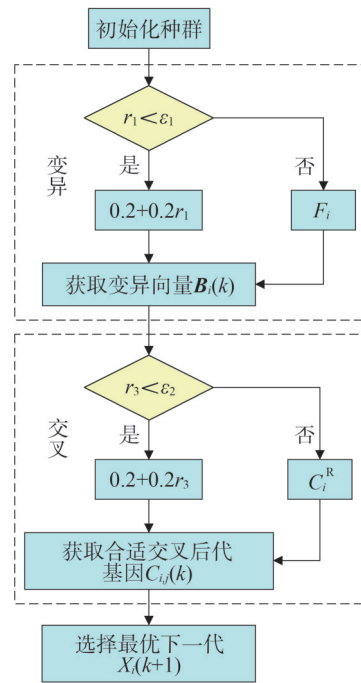


图1 自适应变异交叉流程

Fig.1 Adaptive mutation cross process

首先,对种群进行初始化,并在迭代过程中随机选取种群里天牛个体进行变异。

$$X_i(k) = [X_{i,1}(k), X_{i,2}(k), \dots, X_{i,j}(k)] \quad (1)$$

式中: $X_i(k)$ 为第 k 次迭代的第 i 只天牛个体向量; $X_{i,j}(k)$ 为第 i 只天牛个体的第 j 个基因。种群初始化完成后,在第 k 次迭代种群中随机抽取天牛个体进行变异,得到变异向量 $B_i(k)$ 。

$$B_i(k) = X_{p1}(k) + F_i(X_{p2}(k) - X_{p3}(k)) \quad (2)$$

$$F_i = \begin{cases} 0.2 + 0.2r_1, & r_1 < \varepsilon_1 \\ F_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $X_{p1}(k)$ 、 $X_{p2}(k)$ 、 $X_{p3}(k)$ 为在第 k 次迭代种群中随机抽取的三只天牛个体向量,且 $X_{p1}(k) \neq X_{p2}(k) \neq X_{p3}(k)$; F_i 为加入自适应机制后的变异算子,其值越大,表示越不容易陷入局部极值点; r_1 为独立随机数, $0 \leq r_1 \leq 1$; ε_1 为调整 F_i 的概率。

然后,在第 k 次迭代中,以一定概率让新产生的变异个体与原种群中个体进行交叉重组,增强种群的多样性,并选出最合适的下一代。

$$C_{i,j}(k) = \begin{cases} B_{i,j}(k), & r_2 \leq C_i^R \\ X_{i,j}(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_i^R = \begin{cases} 0.2 + 0.2r_3, & r_3 < \varepsilon_2 \\ C_i^R, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $C_{i,j}(k)$ 为交叉后代的基因; $B_{i,j}(k)$ 为变异后代的基因; C_i^R 为加入自适应机制后的交叉概率; r_2 与 r_3 为独立随机数, $0 \leq r_2, r_3 \leq 1$; ε_2 为调整 C_i^R 的概率。得到交叉后代后, 通过适应度函数在种群中挑选出适应度高的下一代 $X_i(k+1)$ 。

$$X_i(k+1) = \begin{cases} C_i(k), & f(C_i(k)) > f(X_i(k)) \\ X_i(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f(\cdot)$ 为适应度函数; $C_i(k)$ 为交叉重组后的个体向量。

最后, 通过上述方法对传统 BSO 算法的速度 $v_i(k)$ 和位置 $x_i(k)$ 进行更新修改。

$$T_i(k) = \omega(k)v_i(k) + c_1R_{\text{and}} + (P_i^{\text{best}} - x_i(k)) + c_2R_{\text{and}}(G^{\text{best}} - x_i(k)) \quad (7)$$

$$v_i(k+1) = \begin{cases} T_i(k), & R_{\text{and}}(j, 1) \leq C_i^R \\ v_i(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$H_i(k) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (9)$$

$$x_i(k+1) = \begin{cases} H_i(k), & P(x_i(k)) < P(H_i(k)) \\ x_i(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $T_i(k)$ 为第 i 个天牛个体第 k 次迭代的过渡速度向量; $\omega(k)$ 为第 k 次迭代的惯性权重; P_i^{best} 为第 i 个天牛个体的最优位置向量; G^{best} 为天牛群体的最优位置向量; c_1 与 c_2 为学习因子; R_{and} 为 $j \times 1$ 维的随机向量, 其每个元素 $R_{\text{and}}(j, 1)$ 均为 $[0, 1]$ 内随机数; $v_i(k)$ 为第 i 个天牛个体第 k 次迭代的速度向量; $H_i(k)$ 为第 i 个天牛个体第 k 次迭代的过渡位置向量; $x_i(k)$ 为第 i 个天牛个体第 k 次迭代的位置向量; $P(\cdot)$ 为概率函数。

惯性权重在文中所提 IBSO 算法中是一个关键参数, 它显著地影响着算法的搜索行为和收敛性能。当惯性权重较大时, 算法倾向于进行广域的全局搜索, 这有助于提高找到全局最优解的概率, 但过大的移动距离可能导致算法在搜索过程中跳过潜在的最优解, 从而降低算法的精确度。相反, 当惯性权重较小时, 算法则更倾向于进行局部搜索, 这有助于提高解的精度, 但这种策略可能导致算法过早地陷入局部最优解。因此, 采用变惯性权重的搜索策略^[22], 在搜索的初期阶段维持较高的惯性权重, 确

保其具备较强的全局搜索能力, 从而有效地探索解空间。随着搜索进程的推进, 惯性权重逐渐减小, 使算法逐渐转向局部搜索, 以提高解的精度和局部搜索的细致程度。

$$\omega(k) = \omega_{\text{max}} - (\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}) \cdot \frac{k}{k_{\text{max}}} \quad (11)$$

式中: k_{max} 为最大迭代次数; ω_{max} 与 ω_{min} 分别为最大、最小惯性权重。

2.2 回声状态网络

ESN 属于递归神经网络^[23], 与传统人工神经网络相比, 其优势在于学习过程简单、收敛速度较快、能够避免陷入局部最优、非线性处理能力较强等。

ESN 结构如图 2 所示, 其包括三层结构, 分别为输入层、储备层和输出层, 储备层中各个连接权值为随机生成, 一旦生成就不会改变, 只需对储备层到输出层的网络连接权值进行训练就能实现预测输出^[24]。其数学形式为:

$$L(t+1) = g(W_{\text{in}} \cdot U(t+1) + W \cdot L(t) + W_{\text{back}} \cdot Y(t)) \quad (12)$$

$$Y(t+1) = g_{\text{out}}(W_{\text{out}} \cdot [U(t+1), L(t+1)]) \quad (13)$$

式中: $L(t)$ 为储备层 t 时刻的状态矩阵; W_{in} 为输入层到储备层的连接权值矩阵; W 为储备层之间的内部连接权值矩阵; W_{back} 为输出到储备层的反馈矩阵; W_{out} 为储备层到输出层的连接权值矩阵; $g(\cdot)$ 为储备层内部神经元激活函数; $g_{\text{out}}(\cdot)$ 为储备层到输出层的神经元激活函数; $U(t)$ 为 t 时刻的输入矩阵; $Y(t)$ 为 t 时刻的输出矩阵。

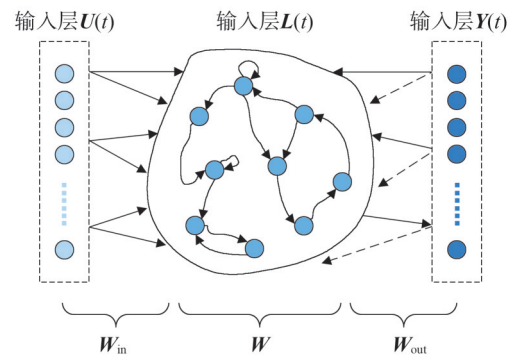


图2 ESN 结构图

Fig.2 Architecture diagram of ESN

2.3 组合预测模型(IBSO-ESN)

文中将IBSO算法与ESN相结合,构建了一个新的IBSO-ESN预测模型。先对传统BSO算法进行改进,将融合自适应机制的差分进化算法引入天牛种群,进行种群进化,增加种群多样性,降低种群中局部最优的概率。再将IBSO算法与ESN相结合,通过IBSO算法优化ESN,并获取其关键参数(如谱半径、输入单元尺度和储备池规模)。最后将优化后的参数输入ESN,形成最终的组合预测模型。预测模型流程如图3所示。

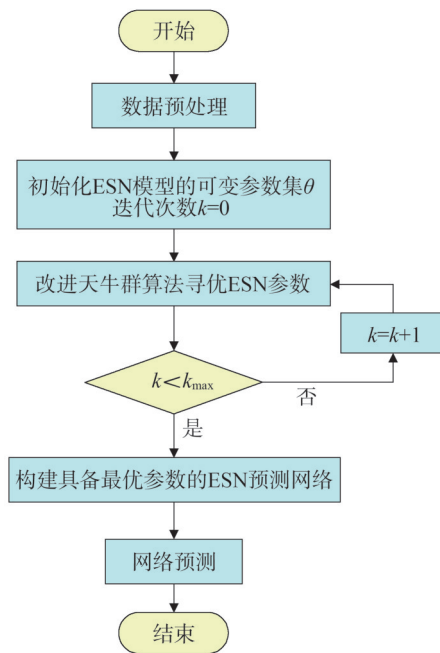


图3 预测模型流程图

Fig.3 Predictive modeling flowchart

首先,对原始数据进行归一化处理,消除输入数据量纲的影响,确保模型的泛化能力。同时初始化ESN模型的可变参数集 θ ,设置迭代次数为零,以便后续操作。归一化公式为

$$\hat{a} = \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} \quad (14)$$

式中: a 为原始数据; \hat{a} 为归一化后的数据; a_{\min} 和 a_{\max} 分别为原始数据的最小值和最大值。

其次,利用IBSO算法进行ESN参数优化。在此过程中,天牛的位置更新是通过随机初始化实现,天牛通过触须感知周围环境的气味浓度,以此作为决

策依据,确定种群的移动方向。在迭代过程中,天牛种群不断调整其搜索位置和搜索范围,以实现参数的优化。当达到预设的最大迭代次数时,算法停止,此时种群的移动也相应终止。

最后,通过分析迭代过程中记录的最优预测误差和对应的最优位置,评估IBSO算法的优化效果,确定ESN的最优参数集,得到具备最优参数的ESN网络。这一方法不仅提高了预测的准确性,也为ESN参数优化提供了一种有效的新途径。

2.4 模型评估办法

为评估所构建天牛群优化ESN的海上风机叶片腐蚀速率预测模型的性能,文中采用均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)以及决定系数 R^2 三个关键指标进行量化分析。RMSE和MAPE作为预测模型准确性的常用指标,能够定量反映模型预测值与实际值之间的偏差程度。具体而言, RMSE和MAPE的值与预测精度成反比关系,即数值越低,表明模型的预测精度越高。而 R^2 则用来衡量模型对因变量的解释能力,其值与模型的拟合优度成正比关系,数值越高,表明模型对数据的拟合效果越佳。通过这三个指标的综合评估,可以全面评价基于IBSO算法优化的ESN模型在海上风机叶片腐蚀速率预测任务中的性能表现。

$$\sigma^{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{s=1}^n [y(s) - y'(s)]^2} \quad (15)$$

$$\sigma^{\text{MAPE}} = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \left| \frac{y(s) - y'(s)}{y'(s)} \right| \quad (16)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{s=1}^n [y(s) - y'(s)]^2}{\sum_{s=1}^n (y(s) - \bar{y})^2} \quad (17)$$

式中: σ^{RMSE} 为RMSE值; σ^{MAPE} 为MAPE值; $y(s)$ 为真实值中第 s 个数据; $y'(s)$ 为预测值中第 s 个数据; \bar{y} 为真实值的平均值; n 为数据的个数。

3 实验分析

3.1 数据选择

海上风电场利用无人机每月记录一次叶片上特定腐蚀区域,计算该月内腐蚀区域面积增长值,以此

作为叶片腐蚀速率。文中选取 2022 年某海上风电场不同风机叶片实测数据共 100 组,部分数据如表 1 所示。 A_1 为 Cl^- 密度、 A_2 为光照强度、 A_3 为湿度、 A_4 为温度、 A_5 为风速、 A_6 为叶片服役时间、 A_7 为叶片腐蚀速率。

表 1 部分 2022 年风电场叶片测量数据
Table 1 Part of the blade measurement data of wind power plant in 2022

| $A_1/$ (mg/m^3) | $A_2/(MJ/m^2)$ | $A_3/\%$ | $A_4/^\circ C$ | $A_5/(m/s)$ | $A_6/月$ | $A_7/$ ($cm^2/月$) |
|------------------------|----------------|----------|----------------|-------------|---------|------------------------|
| 9.64 | 11.53 | 75.34 | 10.5 | 2.43 | 33.5 | 7.421 |
| 17.37 | 10.64 | 87.68 | 8.3 | 2.65 | 34.0 | 8.637 |
| 13.85 | 12.38 | 76.15 | 12.9 | 2.94 | 34.0 | 7.716 |
| 13.29 | 10.96 | 88.59 | 5.6 | 2.39 | 34.5 | 8.835 |
| 7.93 | 13.31 | 64.91 | 11.7 | 2.72 | 34.5 | 8.374 |
| 10.48 | 12.33 | 59.73 | 11.2 | 2.83 | 35.0 | 7.562 |

3.2 模型对比

将所获 100 组数据中的 80 组数据作为训练集、20 组数据作为测试集。利用 IBSO 算法对 ESN 进行参数寻优,应用均方根误差作为寻优过程中的适应度函数,故适应度值越低则参数的适应度越高。

为验证 IBSO 算法的有效性与优越性,文中选取传统 BSO 算法、BAS 算法、PSO 算法^[25]、SOA^[26]对 ESN 进行参数优化。为确保对比的公平性,各对比方法运行次数均设为 50,种群规模均设为 30,最大迭代次数均设为 100。

各算法寻优过程适应度曲线如图 4 所示,从图中可以看出各算法的适应度值随着迭代次数的逐渐增加而降低,但文中所提 IBSO 算法能够在较小的迭代次数下达到最小均方误差,并且相较于传统 BSO 算法,其适应度值更低,寻优能力更好。不仅如此,IBSO 算法的初始适应度值低于传统 BSO 算法,说明经过进化后的种群,初始位置质量有所提高。SOA 虽也能快速地达到较好的适应度值,但其寻优能力略逊色于 IBSO 算法。PSO 算法快速稳定在适应度较高区域,说明其易受困于局部最佳。

BAS 算法适应度值仅次于 PSO 算法,高于其他三种算法。综上所述,文中提出的 IBSO 算法具备一定优越性。

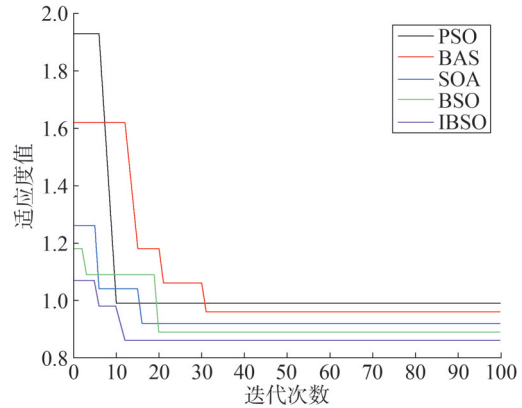


图 4 适应度变化曲线
Fig.4 Change curve of fitness value

为验证文中所提组合模型 IBSO-ESN 的海上风机叶片腐蚀速率预测效果,对叶片前缘和叶尖易受腐蚀区域进行腐蚀速率预测,并与传统 ESN、BSO-ESN 进行对比实验,结果如图 5 所示,可见文中所提 IBSO-ESN 预测模型无论是在叶片前缘还是叶尖区域的预测误差 σ^{RMSE} 和 σ^{MAPE} 值均最低,并且两个区域的预测效果几乎相同,具有一定的适用性与先进性。传统 ESN 的腐蚀速率预测效果在前缘区域要优于叶尖区域,但其在三种对比模型中表现最差。BSO-ESN 在叶尖区域的预测效果优于前缘区域,其预测效果仅次于文中所提 IBSO-ESN 模型。

表 2 为叶片腐蚀速率前缘部分预测结果,表 3 为评估指标对比结果。文中所提 IBSO-ESN 模型的 σ^{RMSE} 值在叶片前缘区域比 ESN 和 BSO-ESN 分别减少 0.306、0.114,在叶尖区域分别减少 0.289、0.097; σ^{MAPE} 值在叶片前缘区域比 ESN 和 BSO-ESN 分别减少 4.381 个百分点、3.328 个百分点,在叶尖区域分别减少 5.374 个百分点、2.95 个百分点;决定系数 R^2 在叶片前缘区域与叶尖区域分别为 0.958、0.963,均高于另外两种方法。以上分析均进一步说明文中所提 IBSO-ESN 预测模型在风机叶片腐蚀速率预测上的先进性。

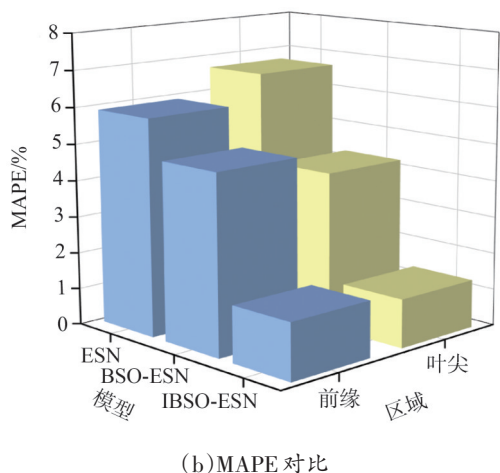
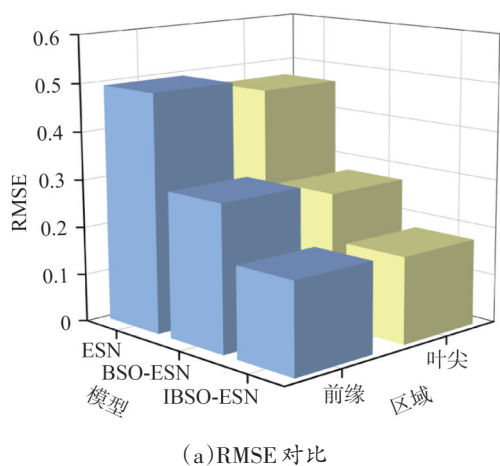


图5 腐蚀速率预测结果误差

Fig.5 Error in corrosion rate prediction results

表2 叶片前缘腐蚀速率预测结果

Table 2 Prediction results of blade front corrosion rate

单位:cm²/月

| 腐蚀速率实际值 | 腐蚀速率预测值 | | |
|---------|---------|---------|----------|
| | ESN | BSO-ESN | IBSO-ESN |
| 7.421 | 7.907 | 7.822 | 7.519 |
| 8.637 | 8.016 | 8.383 | 8.472 |
| 7.716 | 7.397 | 8.019 | 7.951 |
| 8.835 | 8.379 | 8.544 | 8.678 |
| 8.374 | 9.006 | 8.705 | 8.543 |
| 7.562 | 7.929 | 7.386 | 7.308 |

表3 评估指标对比结果

Table 3 Comparative results of assessment indicators

| 方法 | σ^{RMSE} | | $\sigma^{MAPE}/\%$ | | R^2 | |
|----------|-----------------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
| | 前缘 | 叶尖 | 前缘 | 叶尖 | 前缘 | 叶尖 |
| ESN | 0.494 | 0.468 | 5.907 | 6.685 | 0.896 | 0.882 |
| BSO-ESN | 0.302 | 0.276 | 4.854 | 4.261 | 0.904 | 0.915 |
| IBSO-ESN | 0.188 | 0.179 | 1.526 | 1.311 | 0.958 | 0.963 |

4 结论

文中提出一种融合差分进化算法的IBSO算法,并将其与ESN相结合,构建海上风机叶片腐蚀速率预测模型,旨在提高叶片腐蚀速率的预测精度。

1)通过分析海上风机叶片腐蚀产生原理,发现盐雾浓度在很大程度上影响着腐蚀速率,故将盐雾浓度作为一项腐蚀速率预测重要影响条件。

2)将差分进化算法与IBSO算法相结合。通过向量隔代间的差分原理进化种群,提高天牛种群多样性,进而降低种群中局部最优的概率。

3)在差分进化算法的变异算子和交叉概率中添加自适应机制,使算法结果更具客观性,避免过度依赖个人经验。

通过进行模型对比验证,文中所提IBSO-ESN预测模型在叶片前缘与叶尖区域的均方根误差、平均绝对百分比误差都相对较低,在叶片前缘分别为0.188、1.526%,在叶尖区域分别为0.177 9、1.311%,同时确定系数分别为0.958和0.963,表明模型对数据的拟合较好。未来,将继续探索不同优化算法对风机叶片缺陷的预测防护,进而提升风机叶片的在役时间。

参考文献

[1] 陈小乾,尹亮,展宗辉,等.基于注意力机制和RCN-BiLSTM融合的风电机组故障识别[J].中国电力,2025,58(8):94-102.
CHEN Xiaoqian, YIN Liang, ZHAN Zonghui, et al. Fault identification for wind turbine based on attention mechanism and RCN-BiLSTM fusion[J].Electric Power, 2025, 58(8):94-102.

[2] 张雅君,杨心刚,张雅,等.计及风机稳态响应误差的海上风电集群有功功率优化分配[J].智慧电力,2025,53(2):32-40.
ZHANG Yajun, YANG Xingang, ZHANG Ya, et al. Optimal

- Allocation of Active Power in Offshore Wind Power Clusters Considering Steady-state Response Error of Wind Turbines [J]. *Smart Power*, 2025, 53(2): 32-40.
- [3] 刘泽健,杨苹,林旭,等.基于海上风力发电机组中虚拟飞轮储能系统的频率支撑协调控制策略[J].智慧电力,2024,52(2): 101-107.
LIU Zejian, YANG Ping, LIN Xu, et al. Coordination control strategy for frequency support based on virtual flywheel energy storage system in offshore wind turbines[J]. *Smart Power*, 2024, 52(2): 101-107.
- [4] 陈茂新,王凯伦,沈豫,等.适用于二极管整流送出的海上风机构网型控制方案比较[J].中国电力,2025,58(5):166-175.
CHEN Maoxin, WANG Kailun, SHEN Yu, et al. Comparison of grid-forming control solutions for offshore wind farms connected with diode rectifier-based high voltage DC transmission [J]. *Electric Power*, 2025, 58(5): 166-175.
- [5] LIU Y, HAN X G, KANG L, et al. Prediction of corrosion rates of Ni-TiN composite coating using a radial basis function neural network [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2022, 17(6): 220626.
- [6] 王涛,王俊,赵迪宇,等.基于BP神经网络的玻璃纤维增强塑料腐蚀条件下的寿命预测[J].化工学报,2019,70(12):4872-4880.
WANG Tao, WANG Jun, ZHAO Diyu, et al. Life prediction of glass fiber reinforced plastics based on BP neural network under corrosion condition [J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(12): 4872-4880.
- [7] 曹端兴,杨洋,陈新文,等.考虑层间应力的复合材料疲劳寿命预测方法[J/OL].航空动力学报:1-9[2025-01-06].<https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20230644>.
CAO Duanxing, YANG Yang, CHEN Xinwen, et al. A fatigue life prediction method for composite materials considering inter layer stress [J/OL]. *Journal of Aerospace Power*: 1-9 [2025-01-06]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20230644>.
- [8] GAO J X, ZHU P N, YUAN Y P, et al. Strength and stiffness degradation modeling and fatigue life prediction of composite materials based on a unified fatigue damage model [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 137: 106290.
- [9] 孙栋钦,汤占军,李英娜,等.基于ISOA-KELM的风机叶片腐蚀速率预测[J].表面技术,2022,51(11):271-278.
SUN Dongqin, TANG Zhanjun, LI Yingna, et al. Prediction of the corrosion rate of wind turbine blade based on ISOA-KELM [J]. *Surface Technology*, 2022, 51(11): 271-278.
- [10] 朱昊,李勇,还大军.短切CF/PEEK复合材料的制备及抗紫外老化性能[J].材料导报,2024,38(14):289-294.
ZHU Hao, LI Yong, HUAN Dajun. Preparation and ultraviolet aging resistance of chopped CF/PEEK composites [J]. *Materials Reports*, 2024, 38(14): 289-294.
- [11] 王鹏程,季亮,任健铭,等.基于零序电压的海上风电场交流集电线路分层故障定位[J].智慧电力,2025,53(3):35-43.
WANG Pengcheng, JI Liang, REN Jianming, et al. Hierarchical fault location for AC collection lines in offshore wind farms based on zero-sequence voltage [J]. *Smart Power*, 2025, 53(3): 35-43.
- [12] 秦国锋,秦旺招,糜沛纹,等.复合材料在湿-热-载荷作用下的加速老化与自然老化研究综述[J].交通运输工程学报,2024,24(5):173-194.
QIN Guofeng, QIN Wangzhao, MI Peiwen, et al. Review on accelerated aging and natural aging studies of composites under wet-heat-load conditions [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2024, 24(5): 173-194.
- [13] KARBHARI V M. Dynamic mechanical analysis of the effect of water on E-glass-vinylester composites [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2006, 25(6): 631-644.
- [14] 刘志,张勇,张彬,等.玻璃纤维/聚氨酯复合材料耐腐蚀和耐UV研究[J].聚氨酯工业,2020,35(1):26-28.
LIU Zhi, ZHANG Yong, ZHANG Bin, et al. Study on corrosion-resistance and UV-resistance of glass fiber / polyurethane composites [J]. *Polyurethane Industry*, 2020, 35(1): 26-28.
- [15] 李玥,叶林,赵晓文.碳纤维增强环氧树脂复合材料盐雾腐蚀行为及其老化分子机制[J].高分子材料科学与工程,2023,39(5):91-97.
LI Yue, YE Lin, ZHAO Xiaowen. Salt-spray corrosion behavior and aging molecular mechanism of carbon fiber reinforced epoxy resin composites [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2023, 39(5): 91-97.
- [16] 代礼葵,孙耀宁,王国建.玻璃纤维/环氧乙烯基酯树脂复合材料环境综合因素下的冲蚀行为及机制[J].复合材料学报,2019,36(9):2059-2066.
DAI Likui, SUN Yaoning, WANG Guojian. Erosion behavior and mechanism of glass fiber / epoxy vinylester composites under multiple environmental factors [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(9): 2059-2066.
- [17] 张家豪,韩啸,张宇翔,等.湿热老化后CFRP力学性能的细观表征方法[J/OL].机械工程学报:1-9[2025-01-06].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240808.0945.002.html>.
ZHANG Jiahao, HAN Xiao, ZHANG Yuxiang, et al. Mesoscale characterisation on the mechanical properties of CFRP after hygrothermal aging [J/OL]. *Journal of Mechanical Engineering*: 1-9 [2025-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240808.0945.002.html>.
- [18] WANG Q F, CHENG G H, SHAO P. An adaptive beetle swarm optimization algorithm with novel opposition-based learning [J]. *Electronics*, 2022, 11(23): 3905.
- [19] JIANG X Y, LI S. BAS: beetle antennae search algorithm for optimization problems [J]. *International Journal of Robotics and*

- Control, 2018, 1(1): 1.
- [20] 李强, 黄霞, 申东, 等. 基于DV-Hop测距修正的动态调参差分进化定位算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 347-354.
LI Qiang, HUANG Xia, SHEN Dong, et al. Improved DV-hopping - based dynamic parameters differential evolution localization algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 347-354.
- [21] GUO Z L, LIU G, LI D H, et al. Self-adaptive differential evolution with global neighborhood search [J]. Soft Computing, 2017, 21(13): 3759-3768.
- [22] 黄家才, 王徐寅, 高芳征, 等. 基于改进天牛须优化粒子滤波的UWB/LiDAR室内定位方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3261-3269.
HUANG Jiakai, WANG Xuyin, GAO Fangzheng, et al. UWB / LiDAR indoor positioning method based on improved beetle antennae search algorithm optimized particle filter [J]. Control and Decision, 2024, 39(10): 3261-3269.
- [23] HE K, MAO L, YU J B, et al. Long-term performance prediction of PEMFC based on LASSO-ESN [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 3511611.
- [24] 刘嘉蔚, 李奇, 陈维荣, 等. 基于核超限学习机和局部加权回归散点平滑法的PEMFC剩余使用寿命预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7272-7279.
LIU Jiawei, LI Qi, CHEN Weirong, et al. Remaining useful life prediction method of PEMFC based on kernel extreme learning machine and locally weighted scatterplot smoothing [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7272-7279.
- [25] 周航, 王昊, 金仲和. 基于优化粒子群算法的微纳卫星电机参数整定[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 13-23.
ZHOU Hang, WANG Hao, JIN Zhonghe. Parameter tuning of micro - satellite motor based on optimized particle swarm optimization algorithm [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(10): 13-23.
- [26] 刘峰, 陈海忠. 基于CEEMDAN和ISOA-ELM的锂电池荷电状态预测[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1244-1256.
LIU Feng, CHEN Haizhong. Lithium-ion battery state prediction based on CEEMDAN and ISOA-ELM [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1244-1256.

收稿日期: 2025-01-08

修回日期: 2025-02-26

作者简介:

舒征宇(1983), 通信作者(szy26ctgu@163.com), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制、智能电网运维;

黄启昀(2000), 男, 硕士在读, 主要研究方向为智能电网运维;

张紫格(2000), 女, 硕士在读, 主要研究方向为智能电网运维;

任冠臣(2000), 男, 硕士在读, 主要研究方向为图形图像处理;

鲍刚(1977), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250053

基于人类进化优化算法的混合光伏-温差系统最大功率点跟踪

李鸿彪¹, 郜登科¹, 杨博^{2*}

(1.上海科梁信息科技股份有限公司, 上海 201103; 2.昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:混合光伏-温差(photovoltaic-thermoelectric generator, PV-TEG)系统实现了两种不同能源的双重利用,是推进可再生能源技术发展的重要创新。为了使混合PV-TEG系统能够有效应对部分遮蔽条件(partial shading condition, PSC)和非均匀温度分布(non-uniform temperature distribution, NTD)下产生的负面影响,并提高混合系统的能量转换效率和利用率,提出了一种基于人类进化优化算法(human evolutionary optimization, HEOA)的混合系统MPPT方法。HEOA将全局搜索过程分为人类探索和人类发展两个不同的阶段,并利用逻辑混沌映射来提高初始解质量,尤其是人类探索阶段的跳跃策略能够将整体特征和局部特征相结合,提高搜索效率的同时有效避免陷入局部最优状态。在四种算例场景下评估了基于HEOA的混合系统MPPT方法的有效性和适用性,通过与白鲸优化(beluga whale optimization, BWO)和减法平均优化器(subtraction-average-based optimizer, SABO)两种启发式算法进行比较分析表明,该方法无论是在功率输出稳定性、求解质量,还是在应对辐照度快速变化的响应及时性等各个关键方面,都是三种算法中MPPT性能最优的。

关键词:人类进化优化算法;混合光伏-温差系统;最大功率跟踪;部分遮蔽;SimuNPS

中图分类号:TM615;TM913

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)01-0075-13

Maximum Power Point Tracking of Hybrid PV-TEG System via Human Evolutionary Optimization Algorithm

LI Hongbiao¹, GAO Dengke¹, YANG Bo^{2*}

(1.Shanghai KeLiang Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201103, China;

2.Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Hybrid photovoltaic-thermoelectric generator (PV-TEG) system realizes the dual utilization of two different energy sources, representing a significant innovation in the advancement of renewable energy technologies. In order to enable the hybrid PV-TEG system to effectively cope with the negative impacts of partial shading condition (PSC) and non-uniform temperature distribution (NTD), and to improve the energy conversion efficiency and utilization of the hybrid system, a hybrid system MPPT method based on human evolutionary optimization (HEOA) is proposed. HEOA divides the global search process into two distinct phases: human exploration and human development. It employs logical chaotic mapping to enhance the quality of the initial solution. Notably, the jumping strategy utilized in the human exploration phase effectively integrates both global and local features, thereby improving search efficiency while minimizing the risk of converging on local optima. The effectiveness and applicability of the HEOA-based MPPT method for hybrid systems are evaluated in four arithmetic scenarios. A comparison with two heuristic algorithms—beluga whale optimization (BWO) and subtraction-average-based optimizer (SABO)—demonstrates that the HEOA method outperforms the other algorithms in all critical aspects, including power output stability, solution quality, and responsiveness to rapid changes in irradiance.

Keywords: human evolutionary optimization; hybrid photovoltaic-thermoelectric generator system; maximum power point tracking; partial shading; SimuNPS

0 引言

随着全球能源需求的不断增长,传统化石能源面

基金项目:国家自然科学基金项目(62263014);云南省基础研究专项(202401AT070344)。

National Natural Science Foundation of China (62263014); Natural Science Foundation of Yunnan Province (202401AT070344).

临枯竭且对环境造成严重污染^[1-3]。太阳能作为一种清洁能源,具有巨大的开发潜力^[4-6]。但在实际应用中仍然存在发电效率低的问题,光伏电池捕获的大部分太阳能会以热量的形式散失,能量转换效率降低的同时,组件温度的升高也可能对电池的电气参数和使用寿命产生负面影响,导致光伏发电系统的维护和更

换成本增加。混合光伏-温差 (photovoltaic - thermoelectric generator, PV-TEG) 系统能够更充分地利用太阳能,降低光伏电池的温度并充分收集利用光伏 (photovoltaic, PV) 系统产生的废热提高能源转换效率,对实现可持续能源发展具有重要意义。

混合系统在实际应用中常常工作在复杂多变的动态条件下,极易导致混合系统出现多个最大功率点,如何高效、精确地修改运行点以最大化收集功率,对于混合系统来说至关重要。因此有必要借助最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 技术实时跟踪混合 PV-TEG 系统的最佳运行点,以确保系统以最高效率运行,最大限度地输出能量的同时优化系统性能。文献[7]全面回顾并深入讨论了应用于混合 PV-TEG 系统的五大类共 14 种 MPPT 算法。传统的 MPPT 方法例如扰动观测法 (perturbation observation method, P&O)^[8-9]、增量电导法 (incremental conductance method, INC)^[10] 等,具有基础研究较为全面、硬件实现相对简单等优点,得到了广泛应用。但这类算法精度低、速度慢,而且容易在最大功率点 (maximum power point, MPP) 附近振荡,特别是当系统处于部分遮蔽条件 (partial shading condition, PSC) 和非均匀温度分布 (non-uniform temperature distribution, NTD) 下时,存在多个局部最大功率点 (local maximum power point, LMPP),传统方法将无法有效跟踪全局最大功率点 (global maximum power point, GMPP)^[11]。启发式算法有效地弥补了传统方法的缺点和不足。研究[12]和研究[13]分别将算术优化算法 (arithmetic optimization algorithm, AOA) 和原子轨道搜索算法 (atomic orbital search algorithm, AOS) 与混合 PV-TEG 系统的 MPPT 控制相结合。但 AOA 在全局搜索能力上存在局限性,容易陷入局部最优;文献[14]综合了 INC、粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 和 P&O 三种算法实现混合 MPPT 技术,但混合算法会不可避免地增加了算法的复杂度和硬件实现成本;文献[15]采用的樽海鞘算法 (salp swarm optimization algorithm, SSA) 可在全局探索和局部搜索之间取得良好平衡,以获得混合 PV-TEG 系统的最大功率,但其收敛速度较慢,且在复杂环境下容易受到初始解质量的影响;研究[16]探讨了基于进化神经网络的

混合 PV-TEG 系统 MPPT 控制技术,仿真结果表明,基于蛇形优化器的人工神经网络 (snake optimizer based artificial neural network, SOANN) 控制器实现了最快的响应时间、最高的平均效率和较低的功率损耗,同时获得了较高的能量输出;研究[17]提出了一种基于双向长短期神经网络 (bi-directional long short-term memory, Bi-LSTM) 的混合系统 MPPT 技术,该算法可通过在前向层向下搜索最大功率,在后向层向上搜索最大功率,从而接近 GMPP,但神经网络训练的过程存在数据依赖性强、超参数选择困难、耗时长缺点。

在混合 PV-TEG 系统中,由于系统的复杂性增加,需要一种更方便有效的 MPPT 方法来协调两种不同发电方式的功率输出。因此,本文提出了一种基于人类进化优化算法 (human evolutionary optimization, HEOA)^[18] 的混合 PV-TEG 系统 MPPT 方法。HEOA 将搜索过程分为人类探索和人类发展两个阶段,分别侧重于全局搜索和局部优化。这种分阶段策略在保证全局搜索能力的同时,显著提高了局部优化的精度,避免了传统算法在 MPP 附近振荡的问题。同时,HEOA 利用逻辑混沌映射生成高质量的初始解,增强了算法的全局搜索能力。与传统的随机初始化方法相比,逻辑混沌映射能够更均匀地覆盖搜索空间,从而提高找到全局最优解的概率。此外,在人类探索阶段,HEOA 引入了跳跃策略,通过结合整体特征和局部特征,动态调整搜索范围。这一策略不仅提高了搜索效率,还能有效避免陷入局部最优,特别适用于 PSC 和 NTD 等复杂环境。研究将基于 HEOA 的混合系统 MPPT 方法应用于四个不同的算例场景下,并与白鲸优化 (beluga whale optimization, BWO) 和减法平均优化器 (subtraction-average-based optimizer, SABO) 两种启发式算法在功率输出稳定性、求解质量、应对辐照度快速变化的响应及时性等多个方面进行全面的对比分析,以验证基于 HEOA 的混合系统 MPPT 方法的有效性和普适性。

1 混合 PV-TEG 系统建模

1.1 PV 系统

PV 系统在混合 PV-TEG 系统中起着主要作用,

其通常采用单二极管模型(single diode module, SDM),SDM可以轻松提取未知参数,且参数估计所需计算时间较短,基于SDM的PV电池电流关系^[19-20]可表示为

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: I_{PV} 和 V_{PV} 分别为PV电池的输出电流和输出电压; I_{ph} 、 I_D 、 R_s 和 R_{sh} 分别为光生电流、二极管饱和电流、串联电阻和并联电阻。

其中, I_{ph} 和 I_D 可表示为:

$$I_{ph} = (I_{sc} + K(T - T_{STC})) \frac{G}{1000} \quad (2)$$

$$I_D = I_{rs} \left[\exp\left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{N_s kAT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

式中: I_{sc} 和 I_{rs} 分别为短路电流和二极管反向饱和电流; K 为温度系数; k 为玻耳兹曼常数,取值 $k=1.38065 \times 10^{-23}$ J; T 和 G 分别为温度和瞬时辐照度; T_{STC} 为标准测试条件(standard testing conditions, STC)下的温度; N_s 为串联电池数量; q 和 A 分别为电荷量和二极管理想因子。

反向饱和电流 I_{rs} 可表示为

$$I_{rs} = I_{st} \left(\frac{T}{T_{STC}}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

式中: I_{st} 为 T_{STC} 条件下的反向饱和电流; E_g 和 T_0 分别为带隙能和初始温度。

因此,式(1)可改写为:

$$I_{PV} = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left[\exp\left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{N_s kAT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

式中: N_p 为并联电池数量。

PV系统的发电效率计算为

$$\eta_{PV} = \frac{P_{PV}}{GA_{PV}} = \frac{V_{PV} I_{PV}}{GA_{PV}} \quad (6)$$

式中: P_{PV} 和 A_{PV} 分别为PV组件输出功率和表面积。

为了防止在PSC条件下工作时产生的“热斑效应”对PV组件产生损害,通常在PV电池上反向并联一个旁路二极管,但是这也将不可避免地导致PV阵列的 P - V 特性曲线发生改变:由于旁路二极管分流到单个PV电池, P - V 特性曲线上将出现多个LMPP,而非单一GMPP,如图1所示。

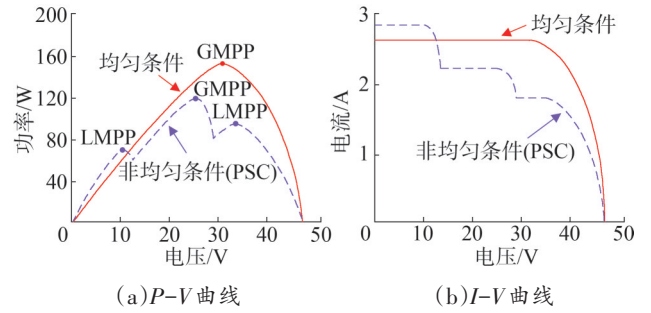


图1 PV电池在不同条件下工作时的输出曲线对比

Fig.1 Comparison of output curves of PV cells operating under different conditions

为实现光能的最大化利用,PV系统运行时应尽可能接近GMPP。存在PSC的PV电池电压 $V_{reverse}$ 受式(7)的约束。

$$V_{reverse} = nV_{op} + V_{Bdiode} \quad (7)$$

式中: V_{op} 和 V_{Bdiode} 分别为开路电压和旁路二极管电压降; n 为正常工作的PV电池数量。

1.2 TEG系统

图2展示了TEG模块的基本结构和等效电路模型。TEG模块由串联的热电偶组成,可以用带有内阻的电压源来表示。假设结点之间的温差恒定,一个TEG模块的开路电压 V_{oc} 理论上可表示为

$$V_{oc} = \alpha_{pn}(T_h - T_c) = \alpha_{pn}\Delta T \quad (8)$$

式中: α_{pn} 为塞贝克系数; T_h 、 T_c 和 ΔT 分别为热侧温度、冷侧温度以及两侧的温度差。

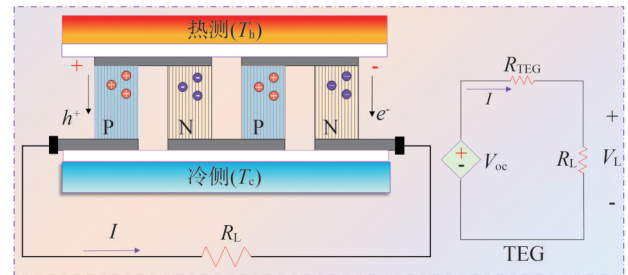


图2 TEG结构及等效电路模型

Fig.2 TEG structure and equivalent electrical model

TEG受汤姆逊效应的影响,即为

$$\tau = T_{avg} \frac{d\alpha_{pn}}{dT_{avg}} \quad (9)$$

式中: τ 和 T_{avg} 分别为汤姆逊系数和平均温度。

由于汤姆逊效应,塞贝克系数会随着平均温度

的变化而动态变化,即为

$$\alpha_{pn} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln\left(\frac{T_{avg}}{T_0}\right) \quad (10)$$

式中: α_0 为初始塞贝克系数; α_1 为参考温度下汤姆逊效应引起的塞贝克系数变化率; T_0 为初始温度。

TEG 模块的输出功率为

$$P_{TEG} = (\alpha_{pn} \Delta T)^2 \cdot \frac{R_L}{(R_L + R_{TEG})^2} \quad (11)$$

式中: R_L 和 R_{TEG} 分别为负载和内阻。

由于热传导、局部遮蔽的影响,TEG 系统会出现NTD。串联旁路二极管用于防止电流绕柱循环。集中式TEG 系统中有 N 个串联/并联TEG 模块,即为

$$I_i = \begin{cases} (V_{oci} - V_{Li}) \frac{I_{sci}}{V_{oci}} = I_{sci} - \frac{V_{Li}}{R_{TEGi}}, \\ 0 \leq V_{Li} \leq \frac{I_{sci}}{V_{oci}}, i = 1, 2, \dots, N \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: V_{oci} 为第 i 个TEG 模块的开路电压; V_{Li} 为第 i 个TEG 模块端电压; I_{sci} 为第 i 个TEG 模块的短路电流; R_{TEGi} 为第 i 个TEG 模块内的电阻。

单个TEG 模块的输出功率 P_{TEGi} 可表示为

$$P_{TEGi} = \begin{cases} V_{Li} I_i = I_{sci} V_{Li} - \frac{I_{sci}^2}{R_{TEGi}} V_{Li}^2, \\ 0 \leq V_{Li} \leq \frac{I_{sci}}{V_{oci}}, i = 1, 2, \dots, N \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_{TEGi} 为第 i 个TEG 模块产生的功率。

TEG 系统的总输出功率为

$$P_{TEG\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_{TEGi} \quad (14)$$

1.3 混合PV-TEG 系统建模

PV 系统产生的热能可以作为TEG 系统的高温热源,适当降低PV 系统温度的同时有效地在TEG 中产生更多的功率和能量,提高系统的整体性能。混合PV-TEG 系统的典型配置如图3所示,PV 和TEG 平行放置,将TEG 的热侧连接到PV 板的背面收集余热,并在冷侧安装散热器进行冷却,从而为TEG 模块提供一个合理的温差水平而持续输出功率和能量。这种结构实现相对简单,不需要复杂的光学设计或跟踪组件^[21]。

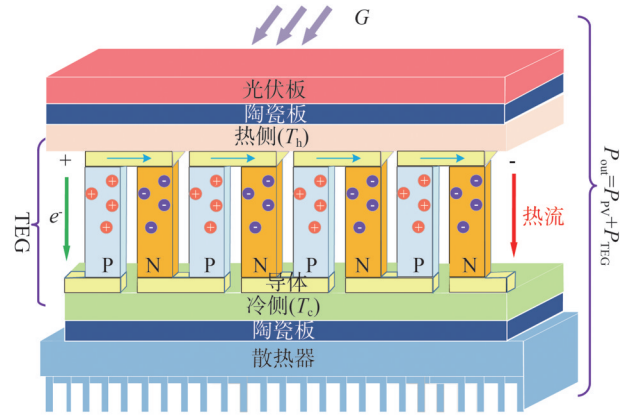


图3 PV-TEG 混合组件的典型物理结构
Fig.3 The typical physical structure of a hybrid PV-TEG module

TEG 系统的 T_h 会随外界条件的变化而动态变化,即为

$$T_h = 0.943T_e + 0.0195G - 1.528V_w + 0.3529 \quad (15)$$

式中: T_e 为环境温度; V_w 为风速,在1~10 m/s 范围内变化。

混合系统的总输出功率和整体能量转换效率分别为:

$$P_{PV-TEG} = P_{PV} + P_{TEG} \quad (16)$$

$$\eta_{PV-TEG} = \eta_{PV} + \eta_{TEG} = \frac{P_{PV} + P_{TEG}}{GA_{PV}} \quad (17)$$

式中: η_{TEG} 为TEG 系统的能量转换效率。

2 基于HEOA 的混合PV-TEG 系统MPPT 设计

2.1 HEOA 介绍

HEOA^[18]包括人类探索和人类发展两个策略。

2.1.1 种群初始化

在HEOA 算法中,采用Logistic 混沌映射来进行种群初始化,逻辑混沌映射是一种广泛应用于优化问题中的非线性动态系统,逻辑混沌映射的初始化公式可表示为

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), 3.569\ 945\ 6 \leq \mu \leq 4 \quad (18)$$

式中: x_n 为第 n 次迭代的值; μ 为控制参数。

式(18)描述了一个典型的逻辑映射过程,生成具有高度敏感性和非线性特征的混沌序列。通过该混沌序列生成的值 x_n 会被映射到实际的搜索空间,即为

$$x_n^0 = L_{\min} + (L_{\max} - L_{\min}) \cdot x_n \quad (19)$$

式中: L_{\min} 和 L_{\max} 分别为搜索空间的下界和上界; x_n^0 为第 n 次迭代将该混沌值通过线性映射转化到目标搜索空间范围内得到的初始解。对于种群中的每一个个体的每一个维度是通过多次迭代式(19)得到的初始值,从而构建整个种群的初始状态。

2.1.2 人类探索阶段

在人类探索阶段,算法进行初始的全局搜索。这个阶段被定义为最大迭代次数的初始1/4。在这个阶段,个体倾向于采用统一的搜索策略,即为

$$X_i^{t+1} = \beta \left(1 - \frac{t}{M_{\max}} \right) (X_i^t - X_{\text{best}}) \text{Levy}(D) + X_{\text{best}} \left(1 - \frac{t}{M_{\max}} \right) + (X_{\text{mean}}^t - X_{\text{best}}) \text{floor} \left(\frac{r}{f_{\text{jump}}} \right) f_{\text{jump}} \quad (20)$$

式中: X_i^t 为个体 i 第 t 次迭代位置; X_i^{t+1} 为个体 i 第 $t+1$ 次迭代位置; M_{\max} 为最大迭代次数; β 为自适应因子; X_{best} 为最佳位置; $\text{Levy}(\cdot)$ 为Levy分布函数; D 为问题的维度或所涉及的变量数量; X_{mean}^t 为迭代次数 t 内平均位置; $\text{floor}(\cdot)$ 为向下舍入的操作函数; r 为 $[0,1]$ 范围内的随机数; f_{jump} 为跳跃系数。

$$X_{\text{mean}}^t = \frac{1}{Z} \sum_{k=1}^Z X_k^t \quad (21)$$

式中: Z 为种群大小; X_k^t 为个体 k 第 t 次迭代位置。

自适应因子 β 解释了人类探索知识的难度越来越大和群体特征。

$$\beta = 0.2 \left(1 - \frac{t}{M_{\max}} \right) (X_i^t - X_{\text{mean}}^t) \quad (22)$$

为了模拟人类探索阶段知识获取的复杂性以及螺旋发展特征,使用了Levy分布。在此背景下,Levy分布的表达式为

$$\begin{cases} \text{Levy}(D) = \frac{\mu \cdot \sigma}{|v|^{\frac{1}{\gamma}}} \\ \mu \sim N(0, D) \\ v \sim N(0, D) \\ \sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\gamma) \cdot \sin\left(\frac{\pi\gamma}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\gamma}{2}\right) \cdot \gamma \cdot 2^{\frac{1+\gamma}{2}}} \right) \end{cases} \quad (23)$$

式中: σ 为飞行步长; $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数; μ 和 v 为标准正态分布; $N(0, D)$ 为从均值为0、方差为 D 的正态分布中采样得到的随机变量; γ 为稳定分布指数,通

常设定为1.5。Levy通过增强全局探索、增加搜索多样性、避免过早收敛,并帮助算法适应动态变化的搜索空间,进而提升了优化算法的性能。这种机制有效地将人类进化中的探索行为引入到优化过程中。

为了增强搜索位置的分散性并避免陷入局部最优解,探索阶段引入了跳跃策略。该策略灵感来源于图像裁剪与重组技术,目的是在搜索过程中结合整体特征与局部特征,从而提高搜索效率。在图像处理中,通过将图像划分为小块并根据特定规则重新排列,能够保持整体形态的同时增强局部特征的表达。类似地,在高维数据的情况下,这一策略通过在多个区域间分布搜索,增强了搜索过程的全局性,从而避免了仅聚焦于局部区域而导致的局部最优解困境。跳跃策略的公式为

$$f_{\text{jump}} = \frac{L_{\min} - L_{\max}}{\delta}, \delta \in [100, 2000] \quad (24)$$

式中: δ 为与跳跃策略相关的一个参数。跳跃策略通过调整当前解的位置,随机跳跃至新的位置,以确保搜索能够覆盖更广泛的区域以探索搜索空间中其他可能的优解区域。跳跃范围通过跳跃系数 f_{jump} 来动态决定,通过调整 δ 值能够控制跳跃的幅度。

2.1.3 人类发展阶段

在人类发展阶段,HEOA将人类社会分为四种不同的角色:领导者、探索者、追随者和失败者。每个角色采用独特的搜索策略,共同协作探索全局最优解。

1)领导者。通常位于最优区域,预适应前40%的个体被指定为领导者。

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} \omega \cdot X_i^t \cdot \exp\left(\frac{-t}{r_{[0,1]} \cdot M_{\max}}\right), R < A \\ \omega \cdot X_i^t + R_n \cdot \text{ones}(1, D), R \geq A \end{cases} \quad (25)$$

式中: ω 为容易度系数; R_n 为一个服从正态分布的随机数; R 为一随机数,通常用于增加搜索的随机性; $\text{ones}(1, d)$ 为生成一个包含 D 个元素的行向量且其中每个元素设置为1的函数; A 为一随机数,用于控制算法的探索和开发阶段; $r_{[0,1]}$ 为 $[0,1]$ 范围内的随机数。

知识获取的容易度系数 ω ,随着发展的推进逐渐减小。

$$\omega = 0.2 \cos\left(\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{t}{M_{\max}}\right)\right) \quad (26)$$

2)探索者。在探索未知领域以发现全局最佳解决方案方面发挥着至关重要的作用。在种群中健康

度排名前40%~80%的个体被指定为探索者。

$$X_i^{t+1} = R_n \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_i^t}{i^2}\right) \quad (27)$$

式中： X_{worst}^t 为在第 t 次迭代时，种群中最差个体的位置。

3) 追随者。坚持最具适应性的领导者的指导，跟随其脚步。最上层的80%至90%的个体被分配为追随者的角色。

$$X_i^{t+1} = X_i^t + 2\omega \cdot R_d \cdot (X_{\text{best}}^t - X_i^t) \quad (28)$$

式中： R_d 为一个随机数，用于控制算法的探索和发展阶段。

4) 失败者。不能很好地适应环境的失败者将被淘汰，在适合人类发展的地区通过繁殖来补充人口。

$$X_i^{t+1} = X_{\text{best}}^t + (X_{\text{best}}^t - X_i^t) \cdot R_n \quad (29)$$

式中： X_{best}^t 为在第 t 次迭代时，种群中最适应的个体。

人类探索阶段与发展阶段之间的过渡是一个渐进过程，在HEOA中，探索阶段主要通过Levy飞行和跳跃策略进行全局范围的随机探索，避免过早收敛，而随着迭代的进行，探索阶段的作用逐渐减弱，发展阶段逐步主导。初期阶段个体搜索较为随机，重点在于发现潜在优解；随着迭代进展，搜索策略逐步转向更精细的局部搜索。探索阶段的个体通过Levy飞行等方式发现新的解空间，发展阶段的角色（如领导者和探索者）则利用已有知识引导群体向更优解推进。整个过程通过角色分工与协作，确保探索与开发阶段相互补充，动态平衡，最终在广度探索的基础上有效收敛到全局最优解。

2.2 基于HEOA的混合系统MPPT设计

基于HEOA的混合PV-TEG系统MPPT控制器通过调节脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号的占空比来控制输出电压接近GMPP，最终目标是实现混合系统功率输出最大化，每个控制周期的适应度值可以通过实时采集电压和电流来确定，较大的适应度值对应的解质量更高，具有更稳定的功率输出。在构建了各个模块的模型之后，两个子系统（光伏和温差系统）分别配备了MPPT控制器和升压电路，基于HEOA的MPPT控制器将提取与最佳输出电压相关的最佳占空比，且该电压被输入绝缘栅双极型晶体管进行下一次迭代，以控制输出电压逼近全局最大功率点，从而实现输出功率的最大化。

混合系统的整体MPPT执行过程如图4所示。

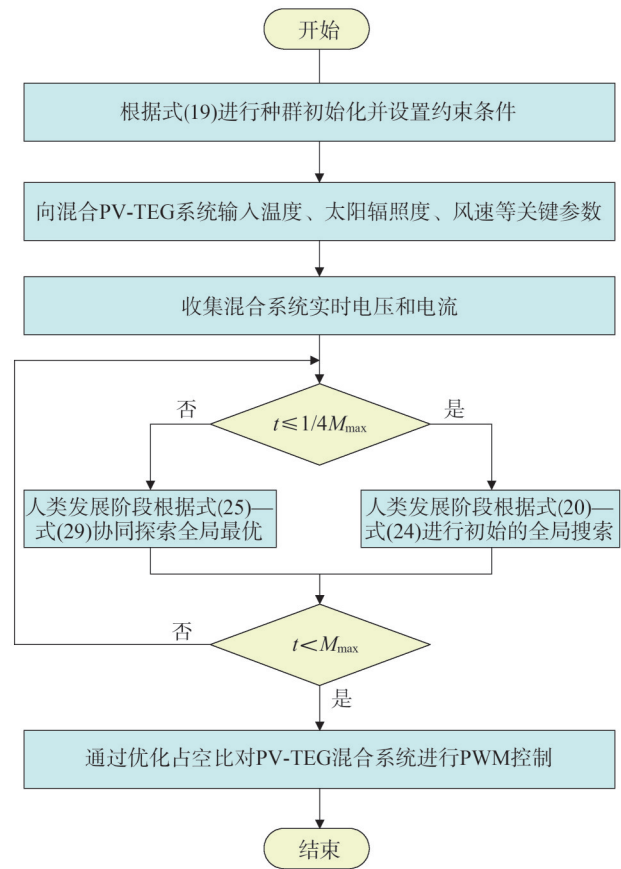


图4 基于HEOA的混合PV-TEG系统MPPT

Fig.4 Hybrid PV-TEG system MPPT based on HEOA

3 算例分析

算例分析将BWO^[22]、SABO^[23]、HEOA三种算法应用于混合PV-TEG系统MPPT，主要包含启动测试、太阳辐照度阶跃变化、随机变化、香港四季典型日实际算例四个场景，以验证HEOA算法在混合PV-TEG系统MPPT应用中的可行性和优越性。PV和TEG系统的规模统一规划为5×1，种群数、最大迭代次数、初始占空比分别设置为12、5和0.5，占空比每0.001 s更新一次。IGBT晶闸管缓震阻尼电阻为1×10⁻⁵ Ω，采用电压控制的方式。混合PV-TEG系统组件参数和DC/DC升压转换器的主要参数如表1所示。仿真均在MATLAB/Simulink 2021a和SimuNPS上进行。在实际应用中，基于HEOA的MPPT方法不需要较高要求的硬件投入或复杂的软件环境，开发难度适中。各算例均借助以下两个指标来评估每

个算法的功率波动情况^[24-26]。

$$\Delta v^{\text{avg}} = \frac{1}{S_{\text{all}} - 1} \sum_{s=2}^{S_{\text{all}}} \frac{|P_{\text{out}}(s) - P_{\text{out}}(s-1)|}{P_{\text{out}}^{\text{avg}}} \quad (30)$$

$$\Delta v^{\text{max}} = \max_{s=2,3,\dots,S_{\text{all}}} \frac{|P_{\text{out}}(s) - P_{\text{out}}(s-1)|}{P_{\text{out}}^{\text{avg}}} \quad (31)$$

式中: Δv^{avg} 为输出功率平均变化值; Δv^{max} 为输出功率最大变化值; $P_{\text{out}}(\cdot)$ 为当前时刻混合系统总输出功率; s 和 S_{all} 分别为当前时间段和时段数量; $P_{\text{out}}^{\text{avg}}$ 为混合系统平均输出功率。

表1 混合PV-TEG系统模型主要参数

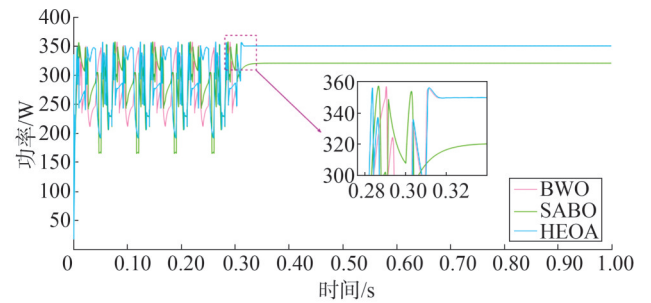
Table 1 Main parameters of the hybrid PV-TEG system model

| 模型类型 | 参数类型 | 数值或表达式 |
|-------------|--------------------------------------|---------------------------|
| TEG 模型 | 塞贝克系数基准值 $\alpha_0/(\mu\text{V/K})$ | 210 |
| | 塞贝克系数变化率 $\alpha_1/(\mu\text{V/K})$ | 120 |
| | 初始温度 T_0/K | 300 |
| | 传递函数 V_{out} | $V_{\text{in}}/(1 - D_c)$ |
| DC/DC 升压转换器 | 开关频率 f_s/kHz | 20 |
| | 负载 R/Ω | 3 |
| | 电感 L/mH | 250 |
| | 电容 $(C_1; C_2)/\mu\text{F}$ | 66; 200 |
| 模型 | American Solar Wholesale ASW-175M | |
| PV 模型 | 每个模块电池个数 | 72 |
| | 最大功率/W | 175.062 |
| | 开路电压 $V_{\text{PV-oc}}/\text{V}$ | 44.2 |
| | 短路电流 I_{sc}/A | 5.25 |
| | 电压最大值 V_{max}/V | 35.8 |
| | 电流最大值 I_{max}/A | 4.89 |

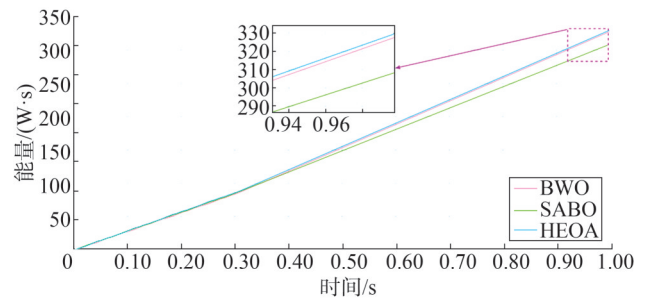
3.1 启动测试

为测试算法在混合系统启动瞬间对不同太阳辐照度的初始响应能力,针对算法的MPPT性能进行初步评估。在本次启动测试中,环境温度恒定为25℃,输入的太阳辐照度也保持恒定,分别为:430 W/m²、820 W/m²、215 W/m²、560 W/m²和990 W/m²。在此条件下,如图5(a)和图5(b)所示,BWO、SABO和HEOA三种算法的功率输出分别为350.09 W、

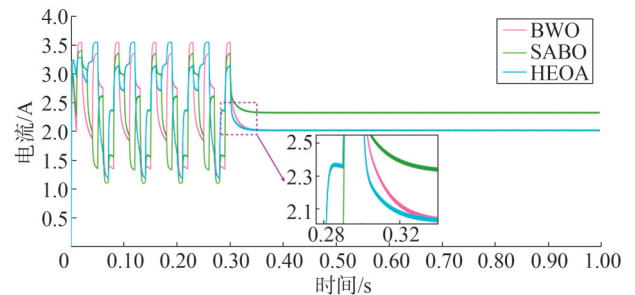
320.69 W和350.09 W,相比SABO,HEOA功率提升了约9.2%;三种算法中HEOA的能量输出最高,为330.25 W·s,超出能量输出最少的SABO(320.69 W·s)约3.0%。尽管HEOA与BWO收敛后的输出功率相同,但HEOA的能量输出更高,这表明HEOA在能量转换效率上更具优势。此外,HEOA在所有算法里的功率波动最小($\Delta v^{\text{max}}=2.25\%$, $\Delta v^{\text{avg}}=0.0044\%$),收敛后也并未出现在全局最大功率点附近波动或引发功率振荡问题。而SABO功率输出最低且波动较大($\Delta v^{\text{max}}=3.47\%$, $\Delta v^{\text{avg}}=0.0048\%$)。综合功率与能量输出,在启动测试阶段,结果表明三个算法中HEOA算法在处理初始输入数据时的稳定性、准确性和效率等方面都是最优的,同时也确保了HEOA在后续更复杂的算例测试中能够可靠地执行混合系统的MPPT。



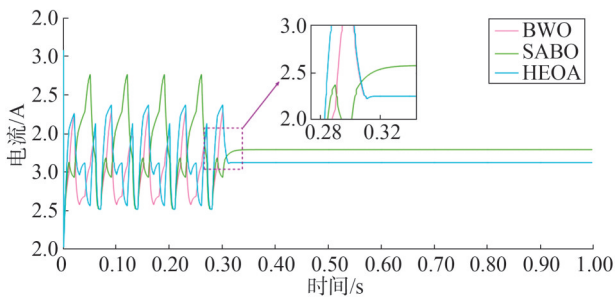
(a) 功率



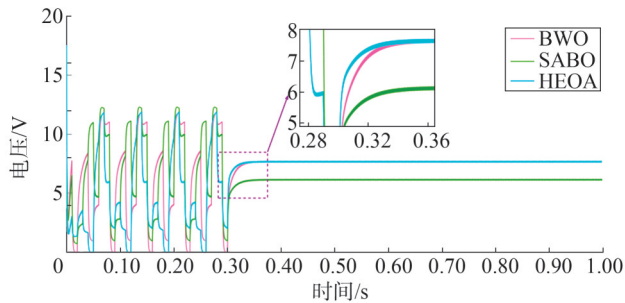
(b) 能量



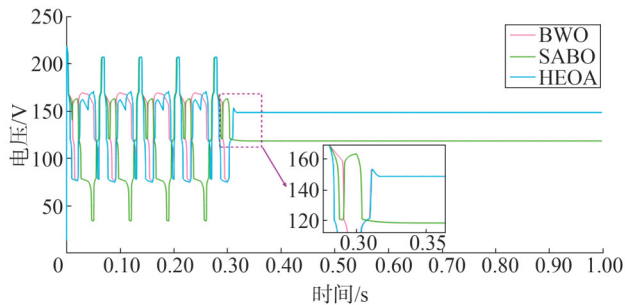
(c) TEG-电流



(d) PV-电流



(e) TEG-电压



(f) PV-电压

图5 混合系统启动测试 MPPT 结果

Fig.5 Hybrid system startup test MPPT results

3.2 阶跃测试

阶跃测试输入的环境温度恒定为 25 ℃、太阳辐照度在 200~1 000 W/m² 范围内呈现出阶跃式的动态变化,如图 6 所示。根据图 7(a)和图 7(b)可知,在阶跃测试阶段,HEOA 始终能够保持最高的功率和能量输出,求解质量较高,功率波动也是三种算法中最小的($\Delta v^{\max}=3.59\%$, $\Delta v^{\text{ave}}=0.006\ 6\%$)。这与 BWO 形成鲜明对比,BWO 易陷入局部最优,功率波动最大(Δv^{\max} 和 Δv^{ave} 分别为 6.36%、0.008 5%),找到的 MPP 质量低,在辐照度快速变化时,BWO 无法及时调整以获取更高功率,而 HEOA 能迅速响应,高效利用太阳能,HEOA 获得的能量(1 730.18 W·s)是 BWO(1 587.34 W·s)的 1.09 倍。SABO 在启动测试阶段表现最差,但在阶跃测试阶段其能量输出与 HEOA 相近,表明其在面对太阳辐照度阶跃变化时

具备一定的优化和适应能力。然而,SABO 依然无法避免在两次阶跃变化时陷入局部最优,响应速度相较 HEOA 较慢,调整不够迅速。综合来看,HEOA 算法在阶跃测试阶段,无论是功率输出的稳定性、求解质量,还是对辐照度快速变化的响应速度方面,均表现出最优的性能,特别是在快速响应和动态调整能力上,显著优于 BWO 和 SABO。

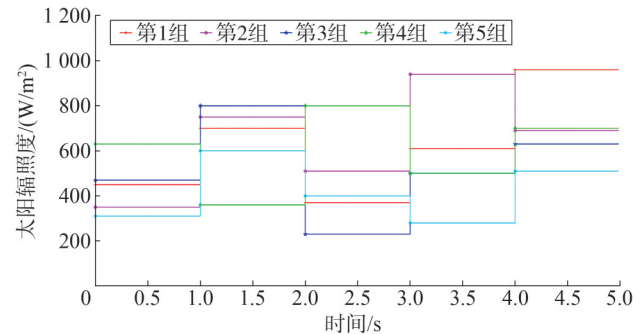
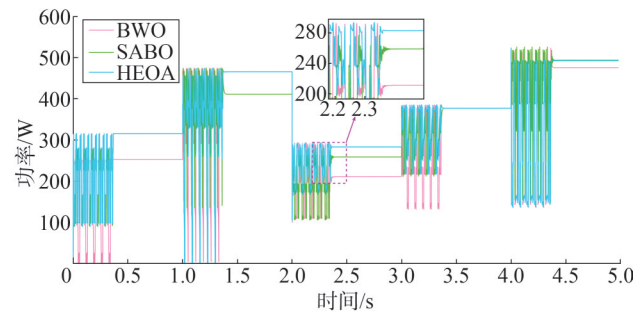
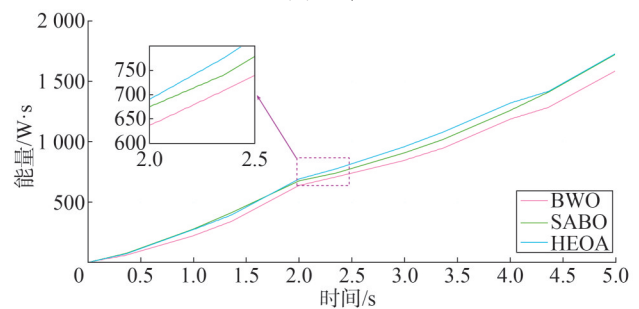


图6 阶跃变化输入曲线图

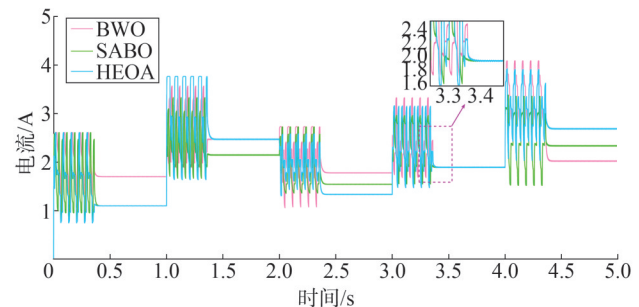
Fig.6 Step change input graphs



(a) 功率



(b) 能量



(c) TEG-电流

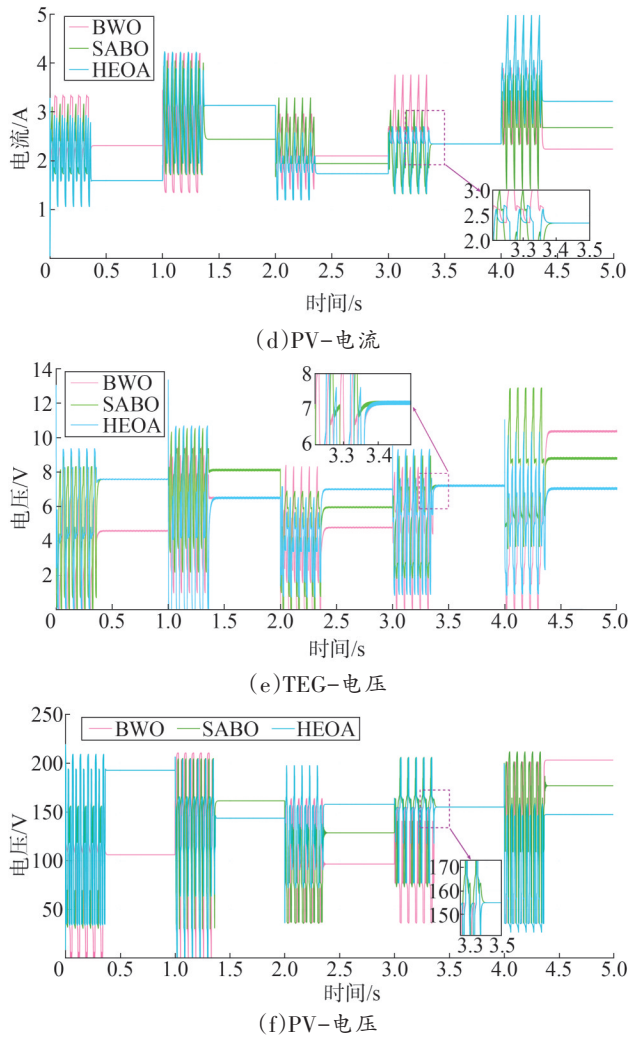


图7 阶跃测试 MPPT 结果
Fig.7 Step test MPPT results

3.3 随机测试

为了能够更真实地模拟自然环境中太阳辐照度的波动情况,随机测试输入的环境温度恒定为 25 °C,一天中 12 h 的太阳辐照度在 200~1 000 W/m² 范围内随机变化,如图 8 所示。结合图 9(a)和图 9(b)分析,在相同的测试条件下,HEOA 输出的能量达到 3.79 kWh,其相较于 BWO 的 3.69 kWh、SABO 的 3.49 kWh 分别高出 2.7% 和 8.6%,能够为系统带来更高的能量输出。在阶跃测试阶段,三种算法中 SABO 的功率波动数值最大($\Delta v^{\max}=122.96\%$, $\Delta v^{\text{avg}}=31.73\%$),这表明其在面对外界工作条件随机变化时,难以精准锁定最大功率点,致使输出功率起伏剧烈,稳定性欠佳。反观 HEOA,其功率波动数值最小($\Delta v^{\max}=87.5\%$, $\Delta v^{\text{avg}}=24.74\%$),相比之下,HEOA 的 Δv^{\max} 比 SABO 下降约 28.84%,在稳定性上远超

SABO,为系统的平稳运行提供了坚实保障。综合考量输出能量与功率波动这两个核心要素,HEOA 在求解质量和稳定性方面均表现卓越,全面优于 BWO 和 SABO,无疑是三种算法中 MPPT 性能最为出色的,为混合系统的高效运行提供了有力支撑。

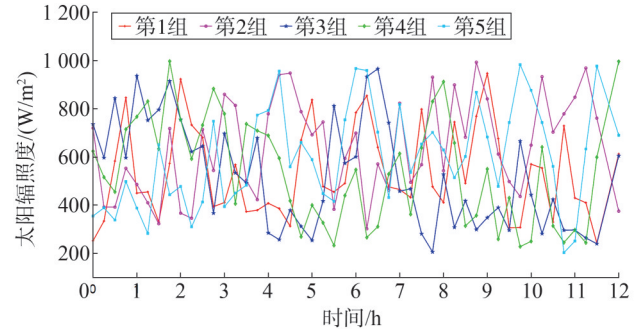


图8 随机变化输入曲线图

Fig.8 Stochastic variation input curves graph

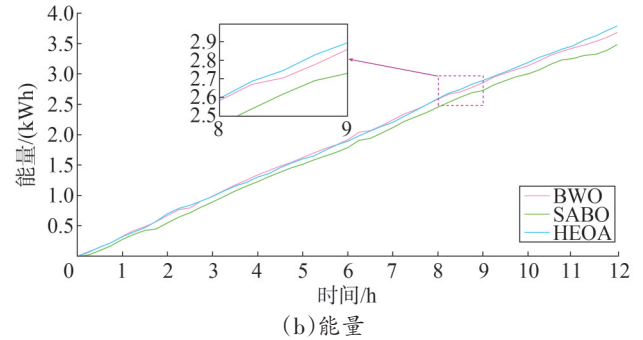
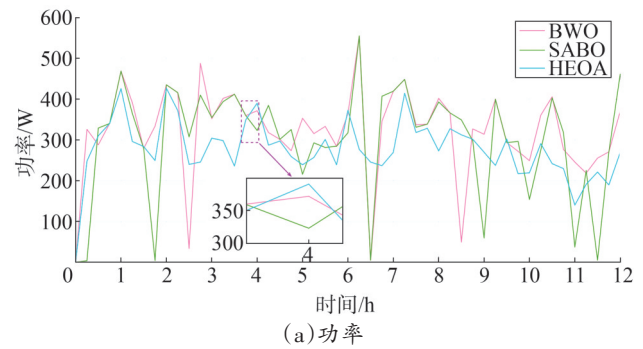


图9 随机测试 MPPT 结果

Fig.9 Random test MPPT results

3.4 香港四季典型日

在一段较长的时间跨度内,典型日能够代表一个地区的平均气候条件、太阳辐照度特征等综合情况。因此该算例从香港地区 2022 年 4 个季节中分别选择一个典型日进行数据收集和采样。为确保数据的精准性与全面性,采样的时间间隔设定为

10 min,具体的数据呈现可详见图 10。图 11 展示了在香港四季典型日条件下三种算法的 MPPT 性能表现,表 2 针对所有算例结果进行了归纳统计。其中,HEOA 在春季、夏季、秋季和冬季的输出能量均稳居三种算法之首,分别输出 1.91 kWh、4.81 kWh、5.35 kWh 和 3.97 kWh,尤其是在秋季优势较为明显,其能量输出比 BWO 和 SABO 分别高出 9.6%、15.55%。此外,HEOA 的功率波动也是所有算法中最小的,而 BWO 和 SABO 的功率波动则普遍偏大,比较具有代表性的是春夏两季,HEOA 在春季的 Δv^{\max} 为 243.68%,比 SABO 降低了 24.39%;HEOA 在夏季的 Δv^{\max} 为 269.47%,比 BWO 降低了高达 30.79%,进一步凸显出 HEOA 在复杂多变的外界环境中,依然能够有效抑制功率大幅波动,确保能源供应的稳定性与持续性。综上所述,HEOA 算法性能稳定,在 MPPT 性能方面表现最优,相较于 BWO 和 SABO 具有显著优势,无论是在能源获取效率还是功率稳定性上,都能更好地适应香港地区复杂多变的气候环境,为实际应用提供更为可靠的技术支撑。

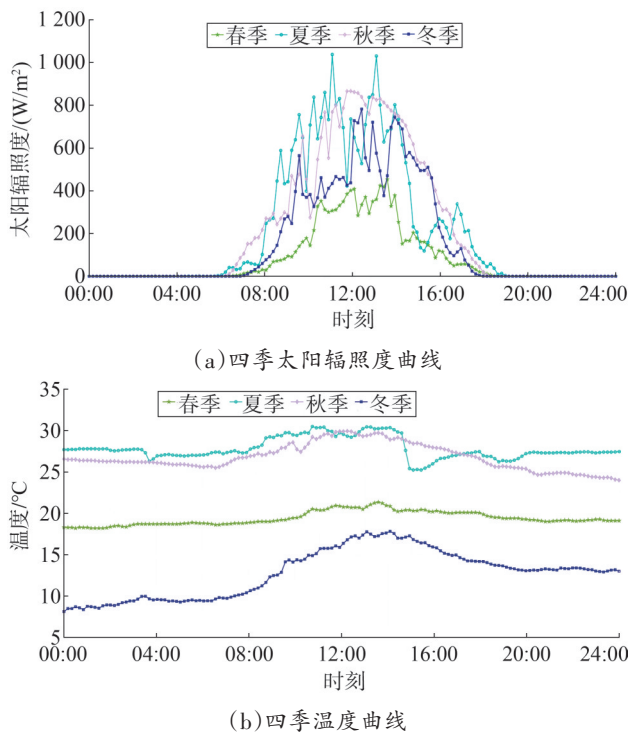
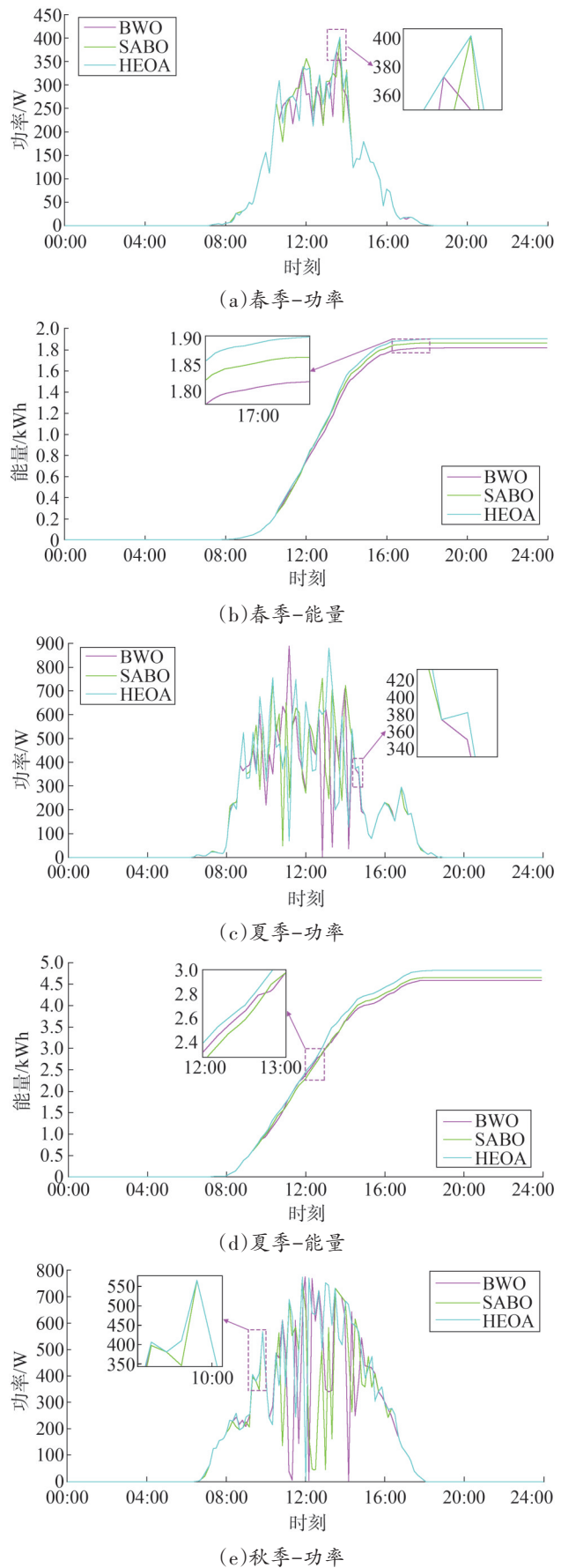
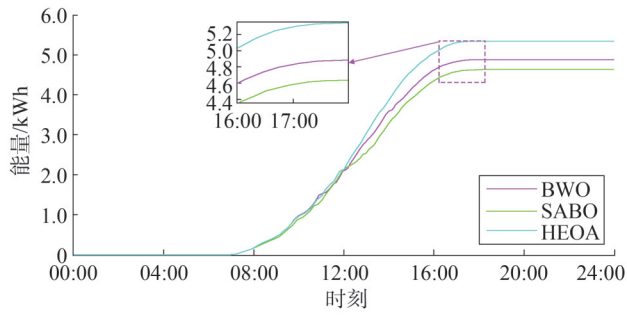
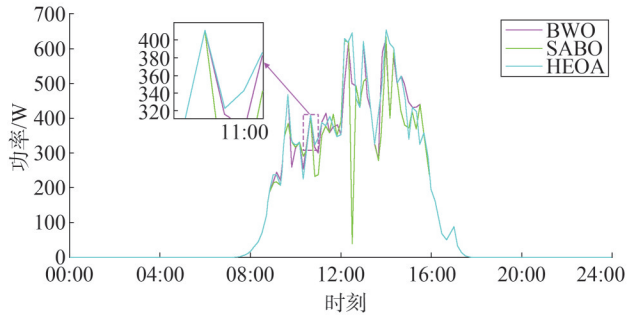


图 10 输入混合 PV-TEG 系统的香港实际算例测量数据
Fig.10 Measured data of actual cases in Hong Kong with input of hybrid PV-TEG system

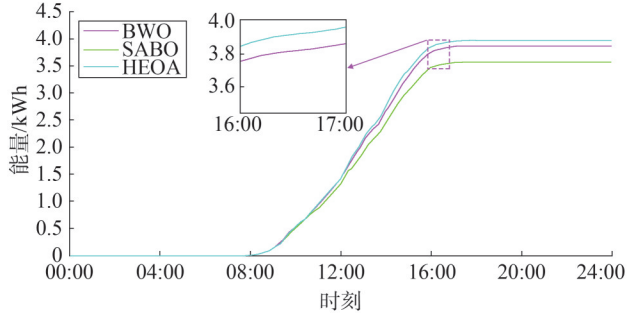




(f)秋季-能量



(g)冬季-功率



(h)冬季-能量

图 11 香港四季算例 MPPT 结果

Fig.11 Hong Kong four seasons case MPPT results

表 2 算例结果统计

Table 2 Summary results for all cases

| 测试类型 | 参数 | 算法类型 | | |
|------|----------------------------|----------|----------|----------|
| | | BWO | SABO | HEOA |
| 启动 | 功率/W | 350.09 | 320.69 | 350.09 |
| | 能量/(W·s) | 328.28 | 309.02 | 330.25 |
| | $\Delta v^{\max}/\%$ | 2.55 | 3.47 | 2.25 |
| | $\Delta v^{\text{avg}}/\%$ | 0.005 1 | 0.004 8 | 0.004 4 |
| | 能量/(W·s) | 1 587.34 | 1 724.83 | 1 730.18 |
| 阶跃 | $\Delta v^{\max}/\%$ | 6.36 | 3.62 | 3.59 |
| | $\Delta v^{\text{avg}}/\%$ | 0.008 5 | 0.006 9 | 0.006 6 |

表2 (续)

| 测试类型 | 参数 | 算法类型 | | |
|------|----------------------------|--------|--------|--------|
| | | BWO | SABO | HEOA |
| 随机 | 能量/kWh | 3.69 | 3.49 | 3.79 |
| | $\Delta v^{\max}/\%$ | 121.82 | 122.96 | 87.50 |
| | $\Delta v^{\text{avg}}/\%$ | 25.44 | 31.73 | 24.74 |
| 香港春季 | 能量/kWh | 1.82 | 1.87 | 1.91 |
| | $\Delta v^{\max}/\%$ | 267.91 | 322.27 | 243.68 |
| | $\Delta v^{\text{avg}}/\%$ | 22.63 | 22.97 | 20.08 |
| 香港夏季 | 能量/kWh | 4.58 | 4.64 | 4.81 |
| | $\Delta v^{\max}/\%$ | 389.35 | 272.05 | 269.47 |
| | $\Delta v^{\text{avg}}/\%$ | 36.35 | 33.12 | 32.87 |
| 香港秋季 | 能量/kWh | 4.88 | 4.63 | 5.35 |
| | $\Delta v^{\max}/\%$ | 348.25 | 364.44 | 295.25 |
| | $\Delta v^{\text{avg}}/\%$ | 32.66 | 27.49 | 31.08 |
| 香港冬季 | 能量/kWh | 3.87 | 3.58 | 3.97 |
| | $\Delta v^{\max}/\%$ | 253.01 | 279.55 | 240.24 |
| | $\Delta v^{\text{avg}}/\%$ | 21.41 | 22.94 | 19.11 |

4 结论

提出一种基于 HEOA 的混合 PV-TEG 系统 MPPT 方法,其主要结论总结如下。

1) 实现了能源的梯级利用,创新性地将 HEOA 算法应用于混合 PV-TEG 系统 MPPT。

2) 算例分析结果表明,HEOA 在三种算法中的能量输出都是最高的,功率波动也是最小的,HEOA 在四种算例场景下均表现出卓越的全局寻优能力、稳定性和适应性,是三种算法中 MPPT 性能最为出色的。此外 HEOA 算法控制参数较少,方便实现和调整,计算复杂度相对适中,适合于混合 PV-TEG 系统 MPPT 实时的优化需求。

3) 随机测试条件下,HEOA 功率波动数值最小 ($\Delta v^{\max}=87.5\%$, $\Delta v^{\text{avg}}=24.74\%$), 相比 SABO, HEOA 的 Δv^{\max} 比其下降约 28.84%, 在稳定性上远超 SABO, 为系统的平稳运行提供了坚实保障。

4) HEOA 在四季的能量输出均稳居三种算法之首,证明 HEOA 算法全局搜索能力最强,不易陷入局部最优解。此外其功率波动也是所有算法中最小的。尤其是春夏两季,HEOA 在春季的 Δv^{\max} 为 243.68%, 比 SABO 降低了 24.39%; HEOA 在夏季的

Δv^{\max} 为 269.47%, 比 BWO 降低了高达 30.79%, 进一步凸显出 HEOA 在复杂多变的外界环境中, 依然能够有效抑制功率大幅波动, 确保能源供应的稳定性与持续性。

未来可以借助 Arduino 硬件平台进一步验证基于 HEOA 的混合 PV-TEG 混合 MPPT 技术的硬件实现能力, 有助于其在工程实践中的应用和推广。此外, 混合算法逐渐成为主流趋势, 将 HEOA 算法与其他算法相结合以进一步优化和提升混合系统的 MPPT 性能具有巨大潜力。

参考文献

- [1] 陈先龙, 王秀丽, 陈洁, 等. 考虑分布式可再生能源交易的风电商与电动汽车充电站协同优化调度[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4598-4610.
CHEN Xianlong, WANG Xiuli, CHEN Jie, et al. Optimal collaborative scheduling of wind power operators and electric vehicle charging stations considering distributed renewable energy trading[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4598-4610.
- [2] 李洋, 王臻懿, 谈竹奎. 基于差分隐私和集成学习的可再生能源出力预测方法[J]. 电力大数据, 2024, 27(10): 1-8.
LI Yang, WANG Zhenyi, TAN Zhukui. Renewable generation prediction method based on differential privacy and ensemble learning[J]. Power Systems and Big Data, 2024, 27(10): 1-8.
- [3] 陈倩, 朱婵霞, 奚巍民, 等. 基于国际对标的风光新能源发电市场政策机制思考[J]. 电力建设, 2024, 45(6): 120-129.
CHEN Qian, ZHU Chanxia, XI Weimin, et al. Policy mechanism thinking for new energy power generation market based on international benchmarking[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 120-129.
- [4] 和萍, 刘鑫, 宫智杰, 等. 高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 112-122.
HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [5] 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.
- [6] 蒋宇, 吕干云, 贾德香, 等. 考虑用户充电行为和光伏不确定性的光储充电站储能容量优化配置[J]. 浙江电力, 2024, 43(5): 10-17.
JIANG Yu, LYU Ganyun, JIA Dexiang, et al. Optimal allocation of energy storage capacity for photovoltaic energy storage charging stations considering EV user behavior and photovoltaic uncertainty[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(5): 10-17.
- [7] YANG B, XIE R, DUAN J H, et al. State-of-the-art review of MPPT techniques for hybrid PV-TEG systems: modeling, methodologies, and perspectives [J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 567-591.
- [8] FATHABADI H. Novel solar-powered photovoltaic/thermoelectric hybrid power source[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 426-434.
- [9] KAHANI R, JAMIL M, IQBAL M T. An improved perturb and observed maximum power point tracking algorithm for photovoltaic power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(4): 1165-1175.
- [10] BAI L. Maximum power point tracking control of PV-TE hybrid power generation system in greenhouse[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 7691291.
- [11] YANG B, ZHU T J, WANG J B, et al. Comprehensive overview of maximum power point tracking algorithms of PV systems under partial shading condition[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 268: 121983.
- [12] MIRZA A F, MANSOOR M, ZERBAKHT K, et al. High-efficiency hybrid PV-TEG system with intelligent control to harvest maximum energy under various non-static operating conditions[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 320: 128643.
- [13] KHAN M K, HAMZA ZAFAR M, MANSOOR M, et al. Green energy extraction for sustainable development: a novel MPPT technique for hybrid PV-TEG system [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53: 102388.
- [14] OBAID W, HAMID A K. Grid-connected hybrid solar / thermoelectric power system with hybrid INC / PSO / PO MPPT system in Sharjah, united Arab emirates [C] // 2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). IEEE, 2022: 1-5.
- [15] YANG B, WU S C, HUANG J X, et al. Salp swarm optimization algorithm based MPPT design for PV-TEG hybrid system under partial shading conditions[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 292: 117410.
- [16] KHAN K, RASHID S, MANSOOR M, et al. Data-driven green energy extraction: machine learning-based MPPT control with efficient fault detection method for the hybrid PV-TEG system[J]. Energy Reports, 2023, 9: 3604-3623.
- [17] YANG B, XIE R, SHU H C, et al. Techno-economic-environmental optimization of hybrid photovoltaic-thermoelectric generator systems based on data-driven approach [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124222.
- [18] LIAN J B, HUI G H. Human evolutionary optimization algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 241: 122638.
- [19] BABU C, PONNAMBALAM P. The theoretical performance

- evaluation of hybrid PV-TEG system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 173: 450-460.
- [20] YANG B, WANG J B, ZHANG X S, et al. Comprehensive overview of meta-heuristic algorithm applications on PV cell parameter identification [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 208: 112595.
- [21] 杨博, 谢蕊, 武少聪, 等. 基于指数分布优化器的混合光伏-温差系统最大功率点跟踪 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(16): 12-25.
- YANG Bo, XIE Rui, WU Shaocong, et al. Hybrid PV-TEG system maximum power point tracking based on an exponential distribution optimizer [J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(16): 12-25.
- [22] ZHONG C T, LI G, MENG Z. Beluga whale optimization: a novel nature-inspired metaheuristic algorithm [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2022, 251: 109215.
- [23] TROJOVSKY P, DEGHANI M. Subtraction-average-based optimizer: a new swarm-inspired metaheuristic algorithm for solving optimization problems [J]. *Biomimetics: Basel*, 2023, 8(2): 149.
- [24] YANG B, ZHANG M T, ZHANG X S, et al. Fast atom search optimization based MPPT design of centralized thermoelectric generation system under heterogeneous temperature difference [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119301.
- [25] ZHANG X S, TAN T, YANG B, et al. Greedy search based data-driven algorithm of centralized thermoelectric generation system under non-uniform temperature distribution [J]. *Applied Energy*, 2020, 260: 114232.
- [26] ZHANG R, YANG B, CHEN N. Arithmetic optimization algorithm based MPPT technique for centralized TEG systems under different temperature gradients [J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 2424-2433.

收稿日期: 2025-01-15

修回日期: 2025-05-13

作者简介:

李鸿彪(1987), 男, 硕士, 从事电力系统、电力电子、综合能源实时仿真技术方向工作;

郜登科(1984), 男, 博士, 主要研究方向为新型电力系统仿真和稳定性分析;

杨博(1988), 通信作者(yangbo_ac@outlook.com), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为基于人工智能的新能源系统优化与控制。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.240431

基于模糊聚类和深度置信神经网络的燃煤机组 NO_x 浓度预测方法研究

冯林魁¹,冯焱飞¹,卢可^{1*},谢生璐¹,刘科²

(1. 国网甘肃电力公司电力科学研究院,甘肃 兰州 730070; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250003)

摘要:针对燃煤机组选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)反应器入口处 NO_x 浓度的预测问题,提出了基于模糊聚类和深度置信神经网络(deep belief network, DBN)的 NO_x 浓度预测方法。首先,通过机理分析和特征权重分析,筛选 NO_x 浓度影响较大的变量。其次,通过模糊聚类算法,实现机组运行工况划分,并分析不同工况条件下SCR入口处 NO_x 浓度的分布。最后,根据选取的辅助变量,抽取不同工况下的历史运行数据,基于深度置信神经网络建立 NO_x 浓度预测模型。通过某660 MW循环流化床锅炉的实际数据对该方法进行验证,结果表明基于模糊聚类和深度置信神经网络的 NO_x 预测模型可精准预测非线性时序燃烧过程的 NO_x 浓度。

关键词:模糊聚类;深度置信神经网络; NO_x 浓度

中图分类号:TP301

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)01-0088-10

Research on NO_x Concentration Prediction Method of Coal-fired Units Based on Fuzzy Clustering and Deep Belief Neural Network

FENG Linkui¹, FENG Yaofei¹, LU Ke^{1*}, XIE Shenglu¹, LIU Ke²

(1. State Grid Gansu Electric Power Research Institute, Lanzhou 730000, China;

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

Abstract: Aiming at the prediction of NO_x concentration at the inlet of the selective catalytic reduction (SCR) reactor in coal-fired units, a NO_x concentration prediction method based on fuzzy clustering and deep belief neural network is proposed. Firstly, the variables that have a greater impact on NO_x concentration are selected through mechanism analysis and feature weight analysis. Secondly, the fuzzy clustering algorithm is used to partition the operating conditions of the unit, and the distribution of NO_x concentration at the inlet of the SCR under different operating conditions is analyzed. Finally, based on the selected auxiliary variables, historical operating data under different operating conditions are extracted, and a NO_x concentration prediction model is established based on the deep belief neural network (DBN). The method is verified by actual data from a 660 MW circulating fluidized bed boiler, and the results show that the NO_x prediction model based on fuzzy clustering and deep belief neural network can accurately predict the NO_x concentration in the nonlinear time-series combustion process.

Keywords: fuzzy clustering; deep belief neural network; NO_x concentration

0 引言

NO_x 是燃煤机组重要的污染物排放种类之一,国家能源局及环境监管部门对 NO_x 排放有严格的要求^[1]。在节能减排背景下,研究控制 NO_x 排放浓度是

基金项目:国网甘肃省电力公司科技项目(LNKJ-QT-20240218-YF01)。

Science and Technology Project of State Grid Gansu Electric Power Company(LNKJ-QT-20240218-YF01)。

燃煤电厂重要的课题。目前燃煤机组普遍采用选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)等末端治理技术减少 NO_x 排放量^[2-5],这项技术要求对SCR装置入口处烟气中的 NO_x 浓度进行实时精准监测,以便合理控制脱硝过程中的氨喷射量,进而达到高效率的脱硝效果和极低的 NO_x 排放水平。然而,电厂的实际操作流程错综复杂,这导致SCR装置入口处烟气中 NO_x 浓度的实时测量难以同步,进而造

成喷氨量的调控不准确,从而影响生产过程的经济效益和环境合规性^[6-7]。因此,SCR入口NO_x浓度预测技术对优化燃煤机组运行和降低NO_x浓度排放具有重要意义。

针对燃煤机组NO_x浓度预测方法,主要依托机理建模分析和机器学习的方式,众多研究人员提出了一系列的方法及其实践结论。在机理建模分析方面,Zhu等^[8]建立了炉内煤粉燃烧流动、传热、燃烧和NO_x生成的数值模拟模型,通过多组工况的燃烧数值模拟,重点分析了锅炉负荷、风量、空气温度对燃烧和NO_x生成的影响。Zeng等^[9]利用数值模拟方法研究了不同喷嘴配置下600 MW锅炉过热空气装置布置对煤粉燃烧特性和NO_x排放的影响。Lyu等^[10]进行了锅炉煤/氨混燃数值研究,分析了NH₃、NO_x、O₂浓度三者燃烧过程中的关系,实现高烟气温度和低NO_x排放策略方法。上述机理建模均实现了特定条件下NO_x浓度的分析,但数值模拟过程需要对当前的设备、燃料、炉内流动等信息进行参数设定,以达到模拟效果,其与实际锅炉过程存在一定的差异,且仿真模型耦合计算过程复杂,因此,机理建模分析不能满足NO_x实时预测需求。

机器学习在燃煤机组NO_x浓度预测方面发挥了重要的作用。Wang等^[11]利用深度学习网络,构建原始NO_x序列预测模型,并利用支持向量机修正不确定工况下的模型预测误差。唐振浩等^[12]结合数据时序特点和Stacking集成学习模型,通过经验模态分解和统计特征提取挖掘数据深层信息,并利用Stacking集成学习方法发挥不同模型的优势,实现NO_x排放浓度预测。金秀章等^[13]基于长短期记忆(long short term memory, LSTM)神经网络预测NO_x浓度,并通过麻雀算法优化模型参数,有效保留了模型输入变量的时间属性。印江等^[14]利用反向传播(back propagation, BP)神经网络算法和改进粒子群优化反向传播(improved particle swarm optimization back propagation, IPSO-BP)算法,对NO_x浓度进行预测,并在170 MW和260 MW两种典型工况下得到了理想的验证结果。李延臣等^[15]采用滑动窗口结合奇异值分解确定机组稳态工况,并基于非线性高斯混合回归,建立NO_x排放浓度预测模型,获得了较小的预测误差。然而,在燃煤机组深度调峰和新能源波

动性负荷冲击下,加剧了机组负荷变化的复杂性和锅炉燃烧的动态不稳定性。现有NO_x浓度预测方法多根据典型工况或稳定工况下的研究及验证,在实际工况下缺乏适用性,模型整体预测精度有待验证。

为提升燃煤机组NO_x浓度预测的精度和模型的泛化能力,剖析不同工况下NO_x浓度的分布,强化数据的特征提取能力,提出了基于模糊聚类和深度置信神经网络的燃煤机组NO_x浓度预测方法。首先,通过锅炉燃烧过程理论和Shapley值理论(Shapley additive explanations, SHAP)进行特征筛选,获得影响NO_x生成较大的变量。其次,以机组运行关键参数为对象,根据模糊C均值聚类(fuzzy C-means, FCM)进行机组变工况划分,确定多维数据工况识别参数,并分析不同工况对SCR入口处NO_x浓度的影响,以加强模型对不同工况条件下预测结果的优化。最后,根据选取的辅助变量,抽取不同工况下的历史运行数据,基于深度置信神经网络(deep belief network, DBN)进行NO_x浓度预测。通过某电厂660 MW燃煤机组实况数据测试,获得了较高的预测精度,同时证明了模型具有较强的泛化能力,对于实际生产应用具有一定的参考价值。

1 NO_x浓度预测辅助变量选取

在燃煤电厂中,煤粉在送入炉膛进行燃烧之前,会经过精心掺混以满足特定的质量标准,并且暂时无法实时监测和获取燃烧过程中煤质数据。因此,本研究在建模过程中假定煤质参数保持不变,将重点研究机组有功功率、锅炉风量配比、温度、压力等运行参数与NO_x排放浓度之间的关系。

1.1 NO_x产生机理分析

在煤粉燃烧的过程中,NO_x的浓度与燃烧过程中的过量空气系数密切相关。按照形成条件大致可以分为燃料型、热力型、快速型三大类^[16-17],燃料型氮是燃料中的氮化合物与氧气反应生成的NO_x,其在总NO_x排放量比例中超过75%;热力型NO_x是空气中的N₂和O₂在高温条件下反应生成,其生成量受炉膛温度的影响;快速型是由燃料中的碳氢化合物CH分子团与N₂碰撞后生成的CN化合物,这些CN化合物再与O₂进一步反应生成NO_x,其在NO_x总量中所占比例相对较小。

根据NO_x的生成机理,NO_x的生成主要受燃煤挥发分含量、过量空气系数以及炉内温度的影响。在本研究中,燃煤挥发分含量作为煤质的一个关键指标,假设在统计周期内煤质保持恒定,过量空气系数的实时监测数据相对较少,因此采用与其相关性较高的测点数据来替代。在机组的正常运行工况下,锅炉燃料量、总风量以及炉内温度随负荷变化而波动,且直接影响过量空气系数,因此,采用锅炉燃料量、总风量、炉内温度、有功功率等参数作为NO_x浓度预测的辅助变量。具体的参数如表1所示。

表1 NO_x浓度预测模型相关变量
Table 1 Related variables of NO_x concentration prediction model

| 名称 | 单位 |
|-----------|-------------------|
| 有功功率 | WM |
| 总风量 | mg/m ³ |
| 总燃料量 | t |
| 机组氧量实际值 | % |
| 炉膛温度 | ℃ |
| 炉膛负压 | kPa |
| SCR入口烟气温度 | ℃ |
| 燃烧器火检强度 | % |
| 凝汽器真空 | kPa |
| 主蒸汽流量 | t/h |
| 主蒸汽压力 | MPa |
| 主蒸汽温度 | ℃ |

1.2 基于SHAP值NO_x特征数据分析

SHAP是一种基于博弈论的方法,由LUNdberg和LEE^[18]于2017年提出,用于解释机器学习模型的预测结果,通过计算特征加入模型时的边际贡献来评估每个输入参数的重要性,其符号表示正向或负向影响,绝对值表示对整体的影响程度。

$$y_i = y_{\text{base}} + f(x_{i1}) + f(x_{i2}) + \dots + f(x_{ij}) \quad (1)$$

式中: y_i 为第*i*个样本预测值; y_{base} 为目标变量在所有样本中的平均值; $f(x_{ij})$ 为第*j*个特征 x_{ij} 对第*i*个样本预测值的贡献。

本文利用SHAP方法结合优化的梯度提升库(extreme gradient boosting, XGBoost)预测模型进行可解释性分析,SHAP值是对参数权重的无偏估计,即

特征对于模型预测输出的贡献度,绝对平均SHAP值越大,说明参数对于模型的影响越大^[19]。通过计算数据集中每个特征值的绝对平均SHAP值,可以明确不同特征值对SCR入口处NO_x浓度的驱动大小。

2 FCM聚类分析

FCM算法对历史数据进行划分,允许数据点以不同的隶属度值存在于多个聚类中。其核心目标在于最小化目标函数,以达到最佳的聚类效果^[20-21],目标函数为

$$J_{\text{FCM}} = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^C u_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2, 0 < m < \infty \quad (2)$$

$$u_{ij} \in [0, 1] \& \sum_{j=0}^C u_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, N$$

式中: J_{FCM} 为模糊C均值聚类的目标函数; N 为数据集中数据点总数,一个样本为一个数据点; C 为聚类总数,一个特征为一个聚类中心; m 为模糊系数,默认取2; u_{ij} 为第*i*个数据点 x_i 对第*j*个聚类中心 c_j 的隶属度; $\|*\|$ 表示欧式距离。

根据式(2)以及约束条件 $\sum_{j=1}^C u_{ij} = 1$,通过拉格朗日求最值方法得到目标函数最小值。

$$L(u, c, \lambda) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C \|x_i - c_j\|^2 + \sum_{i=1}^N (\lambda_i u_{ij} - \lambda_i) \quad (3)$$

式中: $L(u, c, \lambda)$ 为聚类的目标函数,通过调整变量 u, c, λ 最小化函数值; λ_i 为第*i*个数据点权重参数。

式(3)对 u_{ij} 求偏导得

$$u_{ij} = \sum_{k=1}^C \left(\frac{\|x_i - c_j\|^2}{\|x_i - c_k\|^2} \right)^{\frac{-1}{m-1}} \quad (4)$$

式中: c_k 为第*k*个聚类中心。

式(3)对 c_j 求偏导得

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m} \quad (5)$$

FCM算法的具体步骤如下。

步骤1:输入数据 X 、聚类中心 C 、模糊停止标准 $\varepsilon = 0.001$ 以及模糊系数 $m = 2$;

步骤2:每条历史数据随机赋予初始的隶属度函

数值;

步骤 3:由式(5)计算聚类中心;

步骤 4:由式(4)计算隶属度值;

步骤 5:如果 $|u_{ij}^{(t+1)} - u_{ij}^{(t)}| \leq \varepsilon$, 则结束循环, 否则重复步骤 3、步骤 4。

针对聚类数据, 采用模糊分割系数 (fuzzy partition coefficient, FPC) 衡量, 它反映了数据点在聚类中的隶属度分布情况。FPC 的值范围为 [0, 1], 值越接近 1, 表示聚类效果越好, 即数据点的隶属度更加集中于它们所属的聚类中心。其计算公式为

$$P_{FC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\max_j u_{ij})^2 \quad (6)$$

式中: P_{FC} 为模糊分割系数; $\max_j u_{ij}$ 是第 i 个数据点对所有聚类中心隶属度的最大值。

3 深度置信神经网络

DBN 是 HINTONGE 等于 2006 年提出的一种深度神经网络算法, 其网络结构由可视层 V 、隐含层 H (包含多个限制玻尔兹曼机 (restricted boltzmann machine, RBM)、输出层 O 组成, 每层由若干个激活函数 (如 sigmoid) 组成, 层与层之间通过连接权值 w 、

可视层偏置 a 、隐含层偏置 b 双向连接, 网络结构模型^[22-24]如图 1 所示。

DBN 的训练分为无监督预训练和有监督微调。无监督预训练从底部开始, 逐层训练 RBM。每一层 RBM 都用其前一层的输出作为输入, 学习捕捉特征^[25]。预训练帮助初始化权重, 避免了随机权重初始化可能导致的训练困难。有监督微调为在堆叠的 RBM 上添加一个或多个分类层 (如 softmax 层), 然后对整个网络进行有监督的训练, 以优化特定的任务性能。微调通过标准的反向传播算法完成, 调整所有层的权重, 以最小化预测和真实标签之间的差异。具体步骤如下。

步骤 1: 数据特征提取。将与 NO_x 相关的数据输入可视层 V_1 , 并传递至 RBM₁ 的隐含层 H_1 , 并基于数据信息激活 RBM₁ 隐含层的 H_1 神经元节点, 进行能量计算。通过更新 RBM₁ 隐含层 H_1 的连接权值 w_1 、可视层 V_1 的偏置 a 以及隐含层 H_1 的偏置 b 等参数, 模型学习并提取 NO_x 相关数据的内在特征。

步骤 2: 权值调整。将 RBM₁ 的隐含层 H_1 作为 RBM₂ 的可视层 V_2 , 并应用步骤 1 的原理, 对机组运行数据进行自学习, 以实现连接权值 w_2 、可视层 V_2

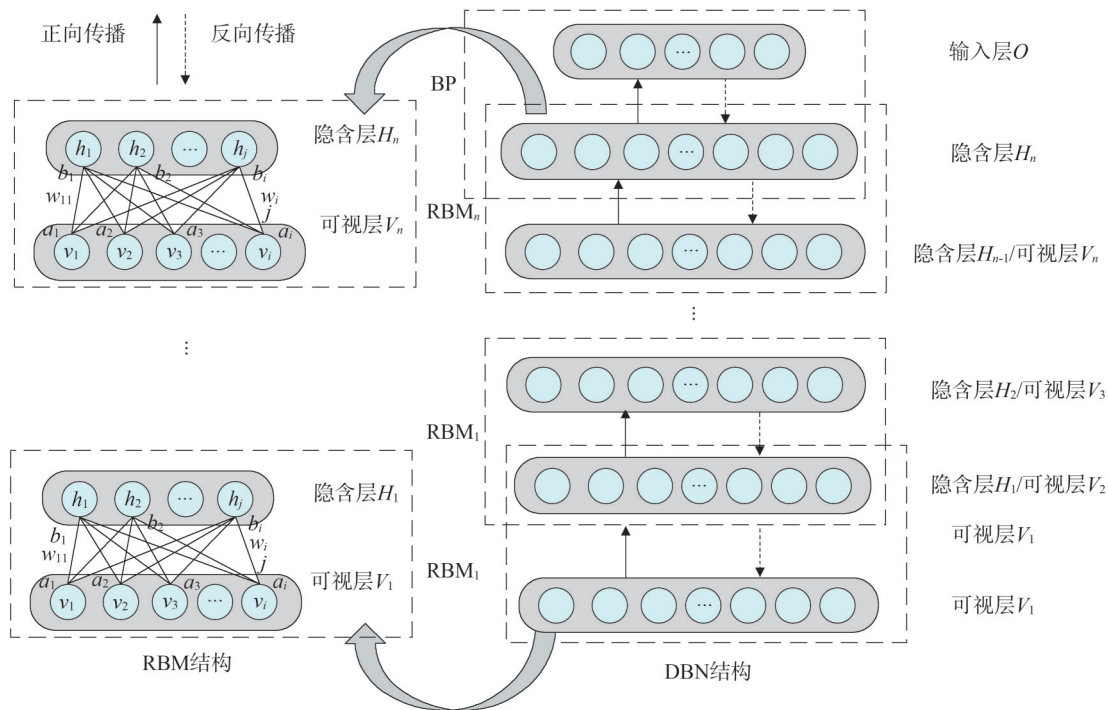


图 1 DBN 神经网络结构

Fig.1 DBN neural network structure

的偏置 aV_2 以及隐含层 H_2 的偏置 bH_2 的更新。

步骤3:结果输出。在最后一个 RBM_n 的隐含层 H_n 中,输出 NO_x 相关数据的最终计算结果,并将这些结果通过输出层 O 进行输出。

步骤4:反向传播与准确率提升。将步骤3的输出结果进行反向传播,从输出层 O 开始,逐层向前根据前一层的反馈信息更新各个神经元的连接权值 w 、可视层 V 的偏置 a 以及隐含层 H 的偏置 b ,以进一步提升 NO_x 浓度预测模型的准确度。

4 基于FCM聚类和深度置信神经网络的 NO_x 浓度预测模型

DBN在处理高维数据时训练效率较低,且随着隐层数增加容易导致过拟合。针对上述问题,采用FCM-DBN的方式构建 NO_x 浓度预测模型。首先,根据FCM聚类算法将历史数据集划分为 C 个子空间,实现机组运行工况划分。其次,DBN模型在样本子空间上独立并行训练,从而形成 C 个DBN模型,每个DBN模型对应不同工况下的 NO_x 浓度预测,具体流程如图2所示。

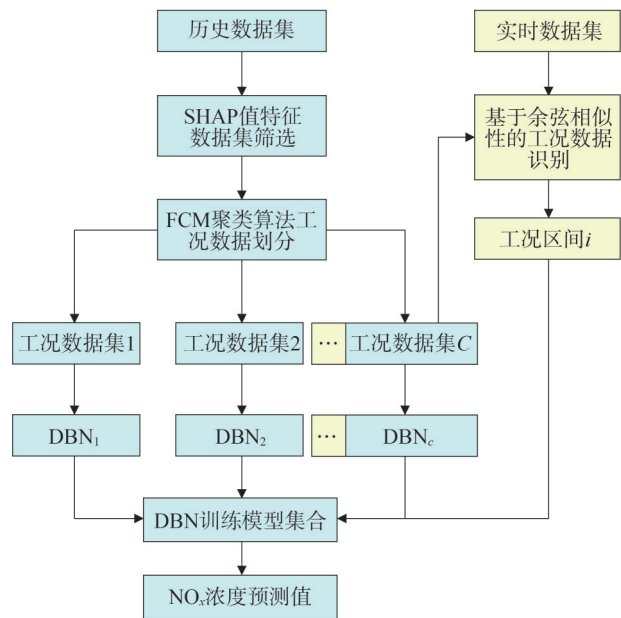


图2 FCM-DBN算法流程
Fig.2 FCM-DBN algorithm flow

不同的工况下聚类中心向量 A , 实时数据向量 B , 两个向量之间的夹角 θ , 余弦相似性 $\cos(\theta)$ 定义为

$$\cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \quad (7)$$

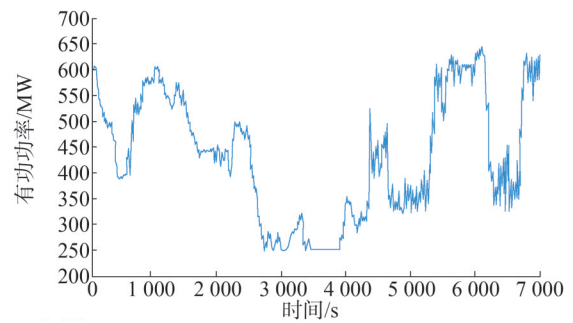
当 $\theta = 0^\circ$ 时, $\cos(\theta) = 1$, 表示两个向量完全相同。

当 $\theta = 90^\circ$ 时, $\cos(\theta) = 0$, 表示两个向量正交, 即无相关性。

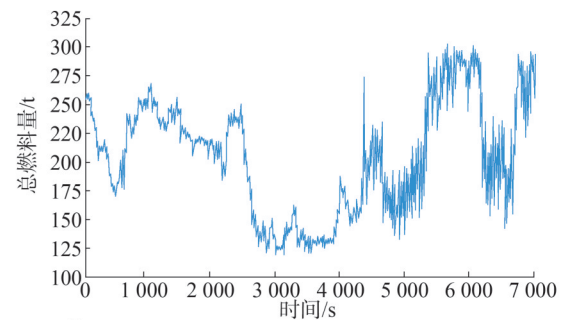
5 火电厂实例分析

5.1 试验数据

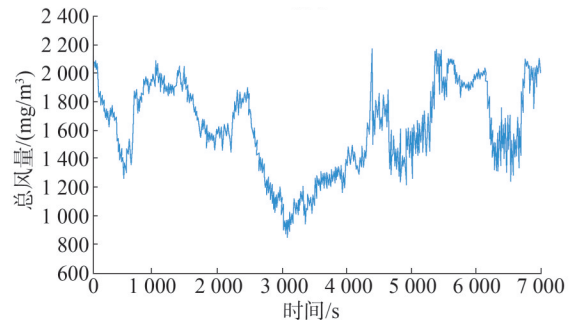
本文选用某660 MW机组锅炉实测运行数据进行验证,选取负荷变化跨度较大的5 d数据进行分析,相关测点数量为20个,数据采样周期1 min,每个测点数据7 200条。通过数据预处理,筛选出较为稳定的数据组。以有功功率、总燃料量、总风量、机组氧量为例,其数据分布如图3所示。



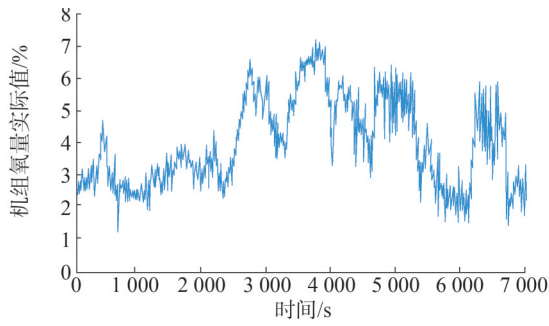
(a)有功功率



(b)总燃料量



(c)总风量



(d) 机组需氧量

图3 试验数据趋势分布图

Fig.3 Trend distribution chart of experimental data

5.2 基于SHAP值特征数据筛选

使用训练好 XGBoost 的模型,通过 SHAP 库中的解释器来计算数据集中每个样本的 SHAP 值,依此表征每个特征对模型预测的贡献度,可以是正的(表示特征对预测结果有正向影响)或负的(表示特征对预测结果有负向影响),预测贡献度为正测点 SHAP 值排序分布如图 4 所示。

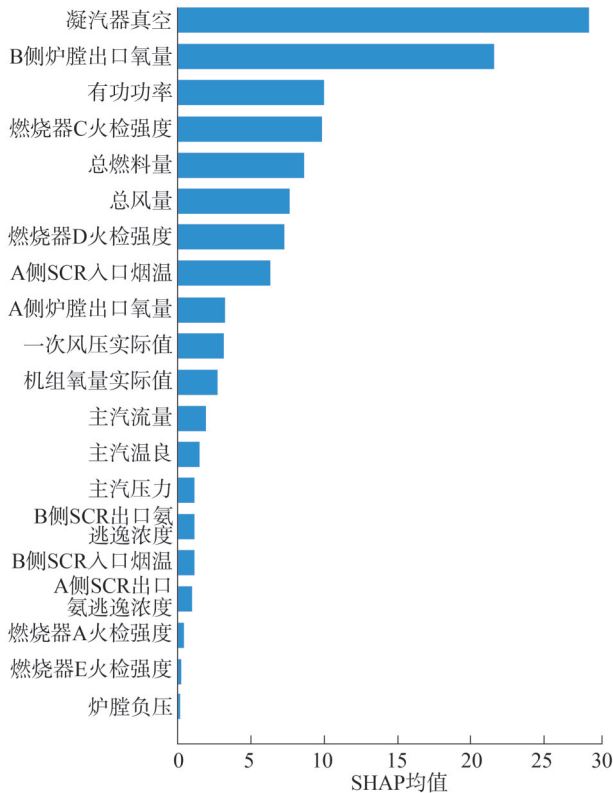


图4 试验数据 SHAP 值排序

Fig.4 Sorting of SHAP values in experimental data

基于上述特征的 SHAP 值,取值大于 3 的特征数据,则最终建模的测点如表 2 所示。

表2 特征数据筛选

Table 2 Feature data filtering

| 名称 | SHAP 值 |
|--------------|--------|
| 凝汽器真空 | 28.6 |
| B 侧炉膛出口氧量 | 23.4 |
| 有功功率 | 12.2 |
| 燃烧器 C 火检强度 | 11.5 |
| 总燃料量 | 10.6 |
| 总风量 | 9.5 |
| A 侧 SCR 入口烟温 | 8.2 |
| 燃烧器 D 火检强度 | 8.2 |
| 一次风压实际值 | 4.5 |
| A 侧炉膛出口氧量 | 4.2 |
| 机组氧量实际值 | 3.5 |

5.3 工况划分

为准确预测不同工况下的 NO_x 浓度,选取有功功率、总燃料量和主蒸汽流量等表征机组运行工况的数据,并通过 FCM 聚类方法实现数据分类,每类数据对应一种工况。其中,聚类数目由 FPC 方法确定,FPC 系数随聚类数目的变化趋势如图 5 所示。

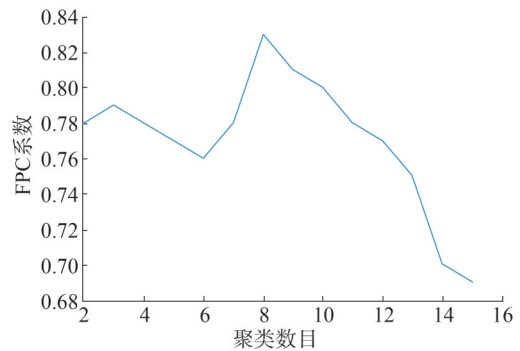


图5 FPC 系数与聚类数目的相关关系

Fig.5 The correlation between FPC coefficient and number of clusters

由图 5 可知,当聚类数据为 8 时,FPC 系数最大,由此,最终得到 8 种工况,取前两个特征绘制聚类结果,如图 6 所示。

根据聚类结果,可以清晰看到每类数据分布形态相对集中,针对每种工况,SCR入口处NO_x浓度的分布如图7所示。

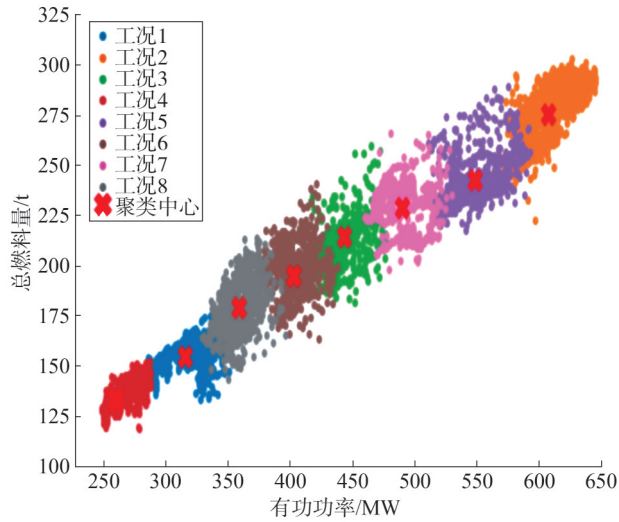


图6 FCM聚类结果
Fig.6 FCM cluster results

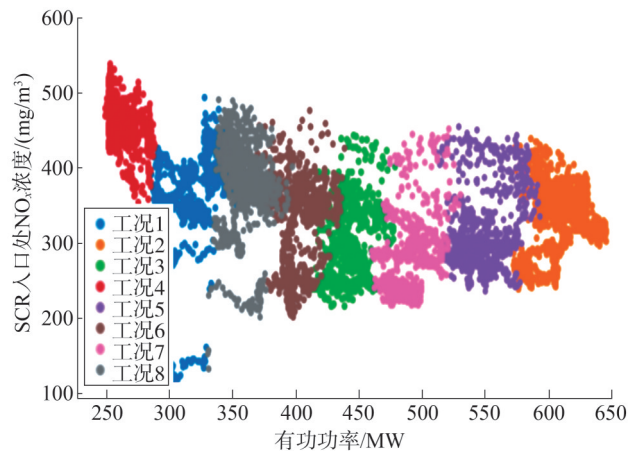


图7 不同工况下SCR入口处NO_x浓度
Fig.7 NO_x concentration at SCR inlet under different operating conditions

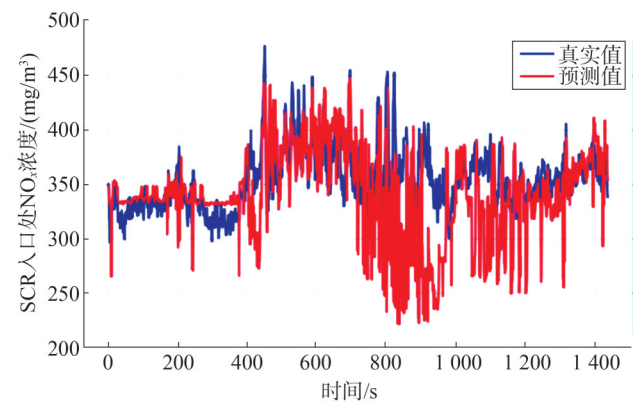
由图7可知,相比于全部工况条件下SCR入口处NO_x浓度分布的无序性,在既定的划分工况条件下,NO_x浓度分布呈现较好的线性度,由此将有效增强预测模型的预测准确性。实时数据通过计算与不同工况聚类中心的余弦相似性,以确定该数据属于的工况,每种工况的聚类中心如表3所示。

表3 特征数据聚类中心
Table 3 Feature data clustering center

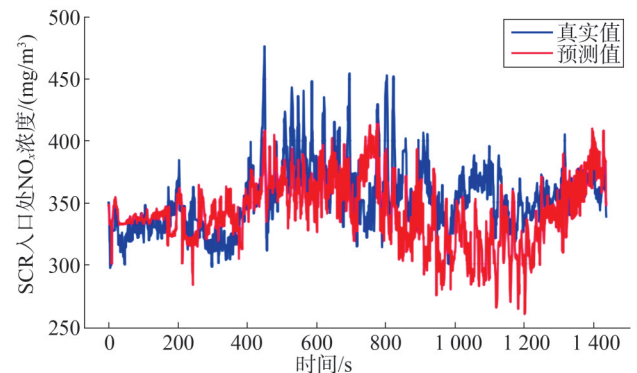
| 工况 | 负荷/MW | 总燃料量/t | 主蒸汽流量/(t/h) |
|----|-------|--------|-------------|
| 1 | 607.5 | 275.6 | 1 763.2 |
| 2 | 548.6 | 242.4 | 1 598.9 |
| 3 | 490.5 | 228.5 | 1 439.3 |
| 4 | 443.5 | 214.1 | 1 295.2 |
| 5 | 403.1 | 194.7 | 1 171.3 |
| 6 | 359.0 | 179.3 | 1 035.8 |
| 7 | 315.5 | 154.5 | 919.3 |
| 8 | 260.3 | 133.1 | 777.9 |

5.4 模型预测

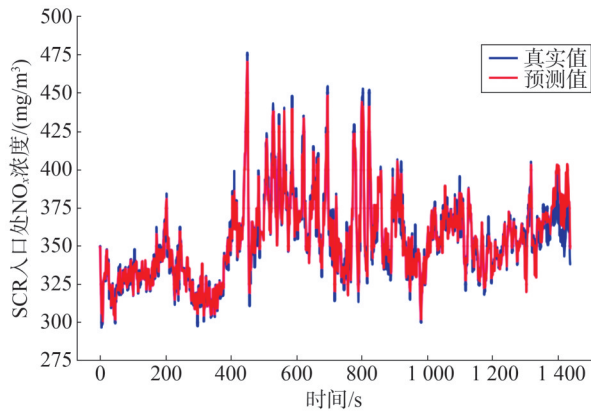
为验证方法的有效性,采用DBN神经网络模型从三个方面进行模型预测。预测一:数据特征未筛选且工况数据未划分;预测二:数据特征筛选但工况数据未划分;预测三:数据特征筛选且工况数据划分,得到模型预测结果如图8所示。



(a) 预测一



(b) 预测二



(c) 预测三

图8 模型预测结果

Fig.8 Model prediction results

根据图8模型预测结果可知,经过数据特征筛选和工况数据划分处理后,模型的预测误差明显减小,具体通过表4的均方根误差(root mean square error, RMSE)和偏差最大值来衡量。

表4 模型预测结果

Table 4 Model prediction results

| 评价指标 | 预测一 | 预测二 | 预测三 |
|-------|--------|--------|-------|
| RMSE | 33.16 | 30.73 | 5.86 |
| 偏差最大值 | 214.68 | 105.95 | 45.36 |

通过预测一和预测二的结果对比可知,数据特征筛选后,模型拟合的偏差最大值明显降低,说明数据特征筛选可提升模型拟合的稳定性;由预测二和预测三的结果对比可知,经过数据特征筛选且工况数据划分处理后的数据,模型的泛化能力明显提升,其拟合误差显著降低,并且表现出较高的模型稳定性。

为全面评估DBN神经网络模型在NO_x浓度预测中的性能,引入LSTM、BP、梯度提升决策树(light gradient boosting machine, LightGBM)进行对比分析,在预测三的数据集运行,以训练时间、RMSE、预测偏差最大值进行对比,解析当前业务场景下最优模型,具体结果如表5所示。

通过对比分析,DBN神经网络模型相比于其他三种模型,表现出了较高的预测精度和稳定性,而其训练时间较长在实际应用中影响有限,且可以通过

计算设备升级和模型结构优化提升模型的实用性。

表5 模型预测结果对比

Table 5 Comparative prediction of models

| 模型 | 训练时间/s | RMSE | 偏差最大值 |
|----------|--------|-------|-------|
| LSTM | 1 200 | 8.52 | 48.34 |
| BP | 350 | 15.18 | 69.65 |
| LightGBM | 2 100 | 5.92 | 52.78 |
| DBN | 960 | 5.86 | 45.36 |

6 结论

本文提出了一种结合FCM聚类和DBN模型的燃煤机组SCR入口NO_x浓度预测方法,并通过实际数据验证了数据筛选、工况数据划分和模型预测各个环节的有效性,有效提升了模型预测的精度,具体结论如下。

1)首次引入SHAP值进行NO_x相关变量筛选,剔除了无关变量,精简了模型输入维度。

2)实现了机组运行工况的软划分,相较于传统的等比例负荷硬划分,其软划分的各工况数据分布形态更具一致性,由预测二和预测三的结果可知,数据划分可显著提高模型对不同工况的适应性和预测准确性。

3)基于选定的辅助变量和不同工况下的历史运行数据,建立DBN预测模型,能够准确预测非线性时序燃烧过程中的NO_x浓度。相比于LSTM对时序数据的时间属性依赖,BP神经网络高效的短期数据非线性关系学习,以及LightGBM对集成弱学习器的管理,DBN模型表现出了很好的泛化能力,突出了该模型在深层次的特征提取能力,使得DBN在NO_x浓度预测中能够更准确地捕捉数据的内在规律,进而获得了突出的预测效果。

参考文献

- [1] 白尊亮.国内外燃机电厂氮氧化物排放标准对比浅析[J].上海节能,2020(5):434-437.
BAI Zunliang. Comparative analysis of NO_x emission standards of gas turbine power plants between China and foreign countries [J]. Shanghai Energy Conservation, 2020(5):434-437.
- [2] 张石凯,程硕,黄庆,等.某燃气轮机电厂启动全过程无硝黄烟排放操作方法[J].南方能源建设,2024,11(4):144-155.

- ZHANG Shikai, CHENG Shuo, HUANG Qing, et al. A methodology for yellow non-nitrate smoke emission during the full-process startup of a gas turbine power plant [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 144-155.
- [3] 赖金平, 李朝兵, 何陆灿, 等. 全燃煤煤的W火焰锅炉改造数值模拟研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(7): 68-74.
- LAI Jinping, LI Chaobing, HE Lucan, et al. Numerical simulation research on the transformation of A W-flame boiler with full combustion of bituminous coal[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(7): 68-74.
- [4] 刘景龙, 张利孟, 赵中华, 等. 1000 MW 燃煤机组SCR脱硝系统变负荷特性试验研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(10): 66-73.
- LIU Jinglong, ZHANG Limeng, ZHAO Zhonghua, et al. Experimental study on characteristics of SCR denitration system of 1 000 MW coal-fired unit under variable load conditions [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(10): 66-73.
- [5] YANG T T, MA K F, LV Y, et al. Real-time dynamic prediction model of NO_x emission of coal-fired boilers under variable load conditions[J]. Fuel, 2020, 274: 117811.
- [6] MA Z R, ZHOU J L, MA J, et al. Current situation and development of denitration catalyst in coal-fired power plant under wide load operation [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 42(23): 1-16.
- [7] 游松林, 罗洪辉, 王振, 等. 燃煤电厂SCR脱硝系统氨逃逸率控制技术[J]. 华电技术, 2019, 41(2): 55-59.
- YOU Songlin, LUO Honghui, WANG Zhen, et al. Study on ammonia escape rate control technology of SCR denitration system in coal-fired power plant [J]. Huadian Technology, 2019, 41(2): 55-59.
- [8] ZHU B, SHANG B C, GUO X, et al. Study on combustion characteristics and NO_x formation in 600 MW coal-fired boiler based on numerical simulation [J]. Energies, 2023, 16(1): 262.
- [9] ZENG L Y, JIANG Z H, LI X G, et al. Experiment and numerical simulation investigations of the combustion and NO_x emissions characteristics of an over-fire air system in a 600 MWe boiler [J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2017, 71(9): 944-961.
- [10] LYU Q, WANG R R, DU Y B, et al. Numerical study on coal/ammonia co-firing in a 600 MW utility boiler [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(45): 17293-17310.
- [11] WANG J J, FENG Y S, YE S M, et al. NO_x emission prediction of coal-fired power units under uncertain classification of operating conditions [J]. Fuel, 2023, 343: 127840.
- [12] 唐振浩, 隋梦璇, 曹生现. 基于组合时域特征提取和Stacking集成学习的燃煤锅炉NO_x排放浓度预测[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14 [2024-11-01]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20230927.1525.004.
- TANG Zhenhao, SUI Mengxuan, CAO Shengxian. Prediction of NO_x emission concentration from coal-fired boilers based on combined time-domain feature extraction and stacking ensemble learning [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14 [2024-11-01]. https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20230927.1525.004.
- [13] 金秀章, 张瑾, 陈佳政. 基于麻雀搜索算法优化TPA-LSTM的火电厂NO_x排放预测[J/OL]. 控制工程: 1-9 [2024-11-01]. https://link.cnki.net/urlid/21.1476.TP.20240317.1855.001.
- JIN Xiuzhang, ZHANG Jin, CHEN Jiazhang. NO_x emission prediction of thermal power plant based on sparrow search algorithm optimized TPA-LSTM [J/OL]. Control Engineering of China: 1-9 [2024-11-01]. https://link.cnki.net/urlid/21.1476.TP.20240317.1855.001.
- [14] 印江, 王尚尚, 李丽锋, 等. 基于IPSO-BP算法的CFB锅炉NO_x浓度预测[J]. 自动化与仪表, 2021, 36(2): 58-63.
- YIN Jiang, WANG Shangshang, LI Lifeng, et al. NO_x concentration prediction of CFB boiler based on IPSO-BP algorithm [J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(2): 58-63.
- [15] 李延臣, 孙智慧, 赵建华, 等. 基于非线性高斯混合回归的燃煤锅炉NO_x排放浓度预测模型[J]. 热能动力工程, 2023, 38(9): 103-112.
- LI Yanchen, SUN Zhihui, ZHAO Jianhua, et al. NO_x emission concentration prediction in coal-fired boiler based on nonlinear Gaussian mixture regression [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 103-112.
- [16] SHI L, FU Z G, DUAN X N, et al. Influence of combustion system retrofit on NO_x formation characteristics in a 300 MW tangentially fired furnace [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98: 766-777.
- [17] 孟磊, 李俊鹏, 姜炜, 等. 多模型内模控制在SCR脱硝系统中的应用[J]. 山东电力技术, 2019, 46(1): 47-51.
- MENG Lei, LI Junpeng, JIANG Wei, et al. Application of multi model internal model control in SCR denitration system [J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(1): 47-51.
- [18] LU N G, LEE S. A unified approach to interpreting model predictions [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017, 30(1): 4765-4774.
- [19] 徐达梁, 徐杭镔, 靳心瑶, 等. 基于机器学习的纳滤膜预测筛选模型构建与评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(6): 8-15.
- XU Daliang, XU Hangbin, JIN Xinyao, et al. Construction and evaluation of prediction model for nanofiltration membranes based on machine learning [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(6): 8-15.
- [20] 李慧君. 基于FCM算法的模糊时间序列预测模型及其应用[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [21] 王胜毅, 蔺晓琨, 于振, 等. 基于聚类的输电线路工程造价综合智能预测方法[J]. 山东电力技术, 2019, 46(5): 12-16.
- WANG Shengyi, MAN Xiaokun, YU Zhen, et al. Clustering based comprehensive intelligent prediction method of transmission line

- cost[J].Shandong Electric Power,2019,46(5):12-16.
- [22] 秦波,罗权毅,冯卫卫,等.基于相关能量波动评估的学习样本筛选与深度置信神经网络的滚动轴承故障诊断研究[J].机械强度,2023,45(2):262-270.
- QIN Bo, LUO Quanyi, FENG Weiwei, et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on learning sample selection via correlation energy fluctuation evaluation and deep belief neural network [J]. Journal of Mechanical Strength, 2023, 45(2): 262-270.
- [23] 吕秋霞,孙亮,车延华,等.基于深度置信网络的配电网负荷预测[J].山东电力技术,2023,50(8):20-26.
- LYU Qiuxia, SUN Liang, CHE Yanhua, et al. Load forecasting of distribution network based on deep belief networks [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(8): 20-26.
- [24] 张春霞,姬楠楠,王冠伟.受限波尔兹曼机[J].工程数学学报,2015,32(2):159-173.
- ZHANG Chunxia, JI Nannan, WANG Guanwei. Restricted Boltzmann machines [J]. Chinese Journal of Engineering Mathematics, 2015, 32(2): 159-173.
- [25] 葛宇.基于时间序列的电力负荷预测研究[J].电子测试,2020(12):33-35.
- GE Yu. Research on power load forecasting based on ARIMA monthly temperature [J]. Electronic Test, 2020(12): 33-35.

收稿日期:2024-11-07

修回日期:2025-07-09

作者简介:

冯林魁(1974),男,高级工程师,主要研究方向为高效火力发电技术;

冯焱飞(1987),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为火电机组节能及调峰分析;

卢可(1985),通信作者(983224858@qq.com),男,博士,高级工程师,主要研究方向为洁净能源发电技术;

谢生璐(1993),男,硕士,工程师,主要研究方向为发电厂涉网性能研究;

刘科(1986),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为燃煤电厂深度调峰与节能减碳、电力系统优化调度等。

(责任编辑 车永强)

基于模型预测控制算法的孤网分布式电压二次控制策略

蔡紫璇^{1*}, 刘毅力¹, 仇继扬², 张艳丽³, 兰丹阳²

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710600; 2. 国网陕西省电力有限公司, 陕西 西安 710048;

3. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 陕西 西安 710100)

摘要: 在传统下垂控制中, 变换器输出线路阻抗的不同会导致分布式电源(distributed generation, DG)输出电流的不均匀分配以及直流母线电压与其参考值的偏移。为解决这一问题, 本文提出了一种基于模型预测控制算法的分布式电压二次控制策略。利用递归最小二乘法估算线路电阻, 将最优电压二次补偿值添加到一次控制中, 进行目标函数最小化以优化预测系数。此外, 在目标函数中设定了两个惩罚项, 既考虑了由线路阻抗造成的电压降, 也考虑了下垂控制过程中下垂系数自身产生的电压降, 以此来提升所提控制策略的性能。在MATLAB/Simulink仿真平台上搭建了上述模型, 仿真结果表明, 该策略可以实现精确地分配输出电流, 并使直流母线电压稳定在参考值, 验证了该策略的有效性和优越性。

关键词: 直流微电网; 递归最小二乘法; 分布式电压二次控制; 模型预测控制

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2026)01-0098-11

Secondary Control Strategy of Isolated Grid Distributed Voltage Based on Model Predictive Control Algorithm

CAI Zixuan^{1*}, LIU Yili¹, QIU Jiyang², ZHANG Yanli³, LAN Danyang²

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China;

3. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Xi'an 710100 China)

Abstract: In traditional droop control, the difference in output line impedance of the converter can lead to uneven distribution of output current in distributed power sources, as well as the deviation of DC bus voltage from its reference value. To address this issue, a distributed voltage secondary control strategy based on model predictive control algorithm is proposed. Firstly, the recursive least squares algorithm is used to estimate the line resistance. Next, the optimal voltage quadratic compensation value is added to the primary control, and the objective function needs to be minimized to optimize the prediction coefficient. In addition, two penalty terms are set in the objective function, taking into account both the voltage drop caused by line impedance and the voltage drop generated by the droop coefficient itself during the droop control process, to improve the performance of the proposed control strategy. The above model is built on the MATLAB/Simulink simulation platform, and the simulation results show that it can accurately allocate the output current and stabilize the DC bus voltage at the reference value, verifying the effectiveness and superiority of the strategy.

Keywords: DC microgrids; recursive least squares; distributed voltage secondary control; model predictive control

0 引言

微电网的提出解决了灵活、数量大、多样性的分布式电源(distributed generation, DG)的并网问题。为负荷提供稳定可靠的电力, 是传统电网向智能电网转型的一种高效策略^[1-2]。相比交流微电网, 直流微电网能更高效可靠地接纳 DG。变换器输出线路

阻抗的不同可能导致分布式电源输出电流的不均匀分配以及直流母线电压与其参考值的偏移。目前广泛使用的传统下垂控制方法难以实现电流的精确分配。为解决这一问题, 同时兼顾电压调节与电流分配的平衡, 引入二次控制成为一种必要的解决方案^[3]。在直流微电网中, 二次控制主要分为集中式、分布式^[4-6]两种实现方式。然而, 集中式控制由于存

在实时性不足、动态响应慢等局限性,其应用正逐步减少。相比之下,分布式二次控制凭借其优势,正在成为主流选择。

文献[7]提出一种基于分布式的、固定时间的二次控制方法来控制独立直流微电网,但其算法是连续时间模型,计算连续时间模型的解需要大量的计算资源和时间,这限制了其在实时系统中的应用。文献[8-9]为实现信息的交流与共享,采用低速通信的同时,引入二次控制以实现精确地分配电流,然而,母线电压未能达到其参考值,并且单个分布式电源也面临着较大的通信压力。文献[10-11]通过采用比例-积分控制来调节电压和频率进行二次调节,但在进行二次控制时,比例积分控制器会在一定程度上增大整个系统对参数改变的敏感度。

最小二乘法是一种通过最小化误差平方和来优化数据拟合的数学方法。采用最小二乘法,可以在确定未知参数的同时,尽可能地降低得到的参数与实际数据的误差平方和。模型预测控制(model predictive control, MPC)在复杂系统中仍能表现出卓然的控制策略。利用 MPC 对未来状态的预测能力,可以实现对当前以及未来的最佳调控,并借助持续优化来调节控制参数,同时对预期的结果进行修正,以此维持输出符合预期。文献[12]采用各个发电设备的小信号模型作为预测模型,进行了滚动优化,相比 PI 控制器下的二次控制,这种方法具有更强的抗干扰能力,但对于通信的需求也会相应增加。文献[13]提出了一种基于 MPC 的多端直流微电网控制器,这种控制器为协调各个 DG 单元而采用调节下垂系数的方法,然而,下垂系数的动态调整会对功率分配的精度和系统稳定性产生一定影响。

综上所述,本文提出了一种适用于独立直流微电网的分布式电压二次控制策略。该策略以 MPC 算法为核心,设计了一种在线校正的电压预测一致性模型。通过将最优电压二次补偿值引入一次控制中,并以最小化目标函数的方式优化预测系数,从而减小线路阻抗带来的电压降以及下垂控制中下垂系数自身带来的电压降,以实现准确地分配电流以及无偏差地控制母线电压。

1 下垂控制及多智能体算法

1.1 传统下垂控制及其局限性

本文以独立运行的直流微电网为研究对象,如图 1 所示,其中光伏、风电等分布式电源为主要的能量来源。超级电容和蓄电池可以在一定程度上平抑由外界因素引起的功率波动。在直流微电网中,各 DG 单元通过电力电子变换器并联接入公共直流母线,因此必须保证其协同工作,以确保系统的正常运行^[14]。

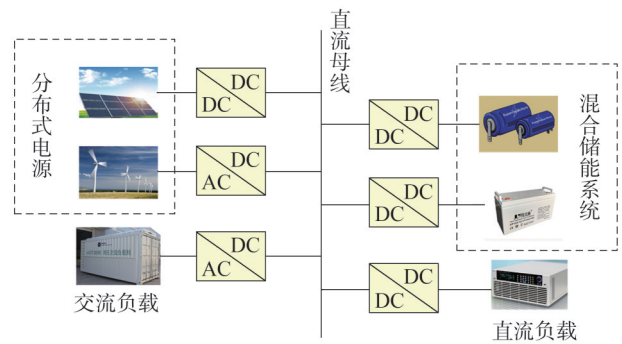


图 1 独立直流微电网典型结构

Fig.1 Typical structure of an independent DC microgrid

考虑到 DG 的分散特性,直流微电网通常采用下垂控制来实现电流分配。

$$u_{dc_i} = u_{ref_i} - r_{di} i_{dc_i} \quad (1)$$

式中: u_{dc_i} 为第 i 台 DG 变换器的输出电压值; u_{ref_i} 为第 i 台 DG 变换器的输出电压参考值,通常情况下容量相同的 DG 的电压参考值保持一致; i_{dc_i} 为第 i 台 DG 变换器的电流输出值; r_{di} 为与之对应的下垂电阻系数。

图 2 为包含两台 DG 的独立直流微电网电路简化模型。图中, r_e 为微电网的等效公共负荷; r_{line_i} 为第 i 台 DG 变换器到直流母线之间的线路电阻; u_{pec} 为直流母线电压。

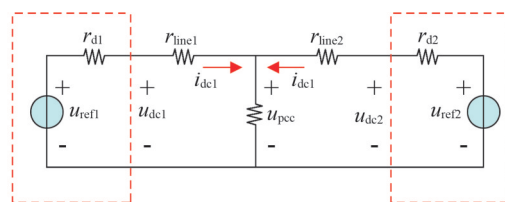


图 2 含两台 DG 的孤网电路简化模型

Fig.2 Simplified model of a stand-alone DC microgrid circuit with two DGs

结合图2中的独立直流微电网电路简化模型及基尔霍夫定律,即可得到各DG输出电流的表达式为

$$i_{dci} = \frac{u_{dci} - u_{pec}}{r_{linei}}, i = 1, 2 \quad (2)$$

联立式(1)和式(2),便可确定两台DG的输出电流关系。

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{r_{d2} + r_{line2}}{r_{d1} + r_{line1}} \quad (3)$$

对下垂系数进行调整,可达到传统下垂控制输出电流和下垂系数成反比的效果,同时可根据DG容量对输出电流进行合理分配。此关系一般只适用于 $r_{di} \gg r_{linei}$ 的情况,即对微型电力系统来说,一般都假设可以忽略线路阻抗^[15]。

尽管如此,线路电阻随直流微电网的不断扩大,其值也将不断增加。由于下垂系数是在最大电压偏差的约束下设定的,所以不能为得到更优的电流分配效果而任意增大下垂系数。为稳定直流母线电压,下垂系数必须受到一定的限制^[16]。

采用传统下垂控制时,变换器输出线路阻抗的不同可能导致DG输出电流的不均匀分配以及直流母线电压与其参考值的偏移,如图3所示。

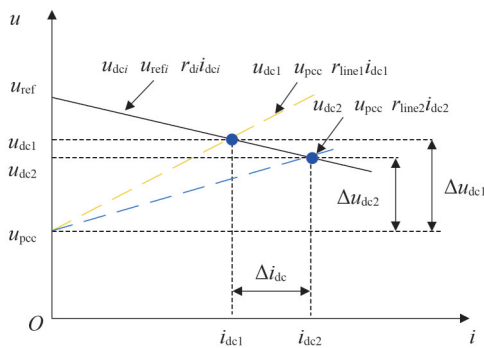


图3 传统的I-U下垂控制特性示意图

Fig.3 Schematic diagram of traditional I-U droop control characteristics

由上文可以得出,变换器输出线路阻抗的不同可能导致DG输出电流的不均匀分配以及直流母线电压与其参考值的偏移,这可能会对DG的工作效率和母线电压调节范围造成负面影响。因此,需要分布式电压二次控制以实现对外下垂控制造成的电压偏差的补偿^[17]。

1.2 多智能体一致性算法

在微电网进入孤岛运行模式时,由于一级控制中下垂控制的限制,可能导致微电网输出的电压与设定的参考值存在一定的偏差。为消除这些偏差,确保微电网系统的安全稳定运行,需要在二级控制层中制定相应的控制方案。

在多智能体系统中,为更清晰地呈现各智能体之间的相互联系,运用图论的原理来进行分析。一个内部包含 n 个智能体的智能系统,其通信拓扑可以用 $G=(V,E,A)$ 表示所有节点的集合,用 $V=\{1,2,\dots,n\}$ 表示所有节点的集合,用 $E \in V \times V$ 表示边的集合,如果 $(l,m) \in E$,那么节点 m 就是节点 l 的邻居, $N_l = \{m \in V | (l,m) \in E\}$ 为节点 l 的邻居集合^[18]。

图4描绘了基于图论的微电网分布式一致性结构,将微电网看作一个多智能体系统。在图4中,微电网的每个分布式电源都被视为多智能体系统中的一个节点。这些节点可以通过稀疏通信网络进行信息传输。

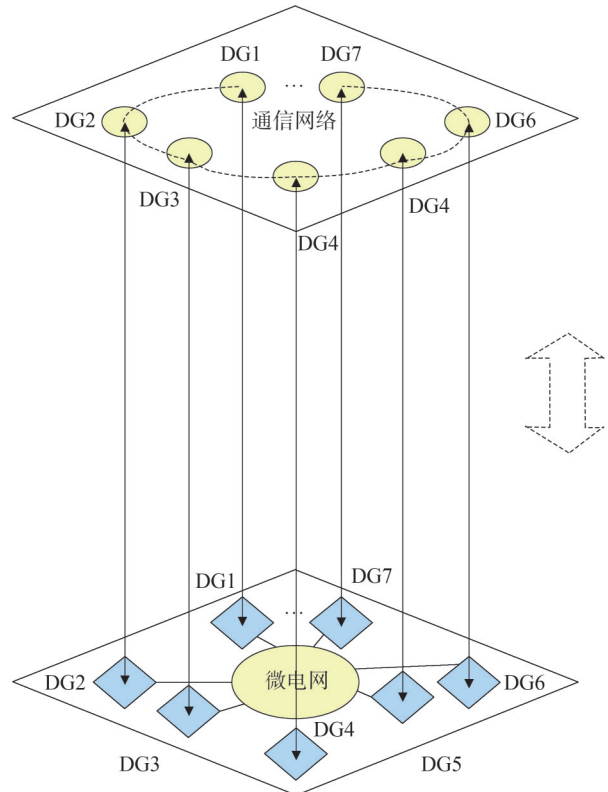


图4 基于图论的微电网分布式一致性结构

Fig.4 Distributed coherence structure diagram of microgrid based on graph theory

2 分布式电压二次控制策略

2.1 基于递归最小二乘法的阻抗估计

实现所采用的电压恢复策略的第一步是得到线路阻抗的实际值。为此,可以利用各种阻抗测量方法(侵入式和非侵入式)。侵入式方法需要向网络注入额外的干扰,如脉冲和伪随机二进制序列。非侵入性方法是使用现有的测量值来估计网络阻抗,而不向网络注入额外的干扰。非侵入性方法包括递归最小二乘(recursive least squares, RLS)算法和卡尔曼滤波器^[19]。

本文采用 RLS 算法对线路电阻进行估计。与侵入式方法相比,RLS 算法具有更快的计算时间、较低的计算复杂度。最小二乘法是一种通过最小化误差平方和来优化数据拟合的数学方法。采用最小二乘法,可以在确定未知参数的同时,尽可能地降低得到的参数与实际数据的误差平方和。在处理数据过程中,与传统的最小二乘法相比,RLS 算法不需要假设输入序列的统计特性。为实现模型参数的迭代优化这一目标,RLS 算法需要通过历史数据以辨识参数。RLS 算法在每次迭代更新的过程中,从历史数据中计算出最恰当的模式参数,从而最终可以高精度地预测系统参数。

RLS 算法应用在二次控制回路中,为估计指定线路的线路阻抗,RLS 算法需要测量该线路两端的电流和电压。为进一步详细说明,本节的其余部分给出了第 j 个变换器对其线路的在线阻抗估计,对于其他线路的在线阻抗估计,可以遵循类似的方法。

首先,将第 j 个变换器的稳态运行表示为

$$v_j = v_{\text{pec}} + R_j i_j \quad (4)$$

式中: v_j 、 i_j 分别为第 j 个变换器的输出电压和电流测量值; R_j 为第 j 个变换器的输出线路阻抗; v_{pec} 为直流母线电压。

设定采样周期,那么在每个采样点 k ,将式(4)以离散时间形式改写为

$$v_j(k) = v_{\text{pec}}(k) + R_j(k) i_j(k) \quad (5)$$

系统的期望值与实际输出值之间的误差的向量 $e(k)$ 可表示为

$$e(k) = y(k) - R_{\text{est}}(k-1) \varphi(k) \quad (6)$$

式中: $y(k)$ 为变换器的输出期望向量; $R_{\text{est}}(k-1)$ 为前

一时刻的电阻估计值; $\varphi(k)$ 为变换器的输出电流向量。

基于最小均方差理论,RLS 算法的代价函数为

$$J(k) = \sum_{k=0}^K \rho^{K-k} |e(k)|^2 \quad (7)$$

$$= \sum_{k=0}^K \rho^{K-k} |y(k) - R_{\text{est}}(k) \varphi(k)|^2$$

式中: K 为采样点数量; ρ 为遗忘因子,取 0.99。

对状态变量求偏导,且设偏导值为 0,可得

$$\sum_{k=0}^K \rho^{K-k} \varphi(k) R_{\text{est}}(k) \varphi^T(k) = \sum_{k=0}^K \rho^{K-k} \varphi(k) y(k) \quad (8)$$

将式(8)左右两边进行分开处理,变换等式左边, $Z(k)$ 被描述为

$$Z(k) = \sum_{k=0}^K \rho^{K-k} \varphi(k) \varphi^T(k)$$

$$= \sum_{k=0}^{K-1} \rho^{K-k} \varphi(k) \varphi^T(k) + \varphi(k) \varphi^T(k) \quad (9)$$

$$= \rho \sum_{k=0}^{K-1} \rho^{K-k-1} \varphi(k) \varphi^T(k) + \varphi(k) \varphi^T(k)$$

$$= \rho Z(k-1) + \varphi(k) \varphi^T(k)$$

取 $P(k) = Z^{-1}(k)$,可以进一步变换为

$$P(k) = Z^{-1}(k)$$

$$= \rho^{-1} Z^{-1}(k-1) - \frac{\rho^{-2} Z^{-1}(k-1) \varphi(k) \varphi^T(k) Z^{-1}(k-1)}{1 + \rho^{-1} \varphi^T(k) Z^{-1}(k-1) \varphi(k)} \quad (10)$$

$$= \rho^{-1} [P(k-1) - L(k) \varphi^T(k) P(k-1)]$$

式中: $L(k)$ 为误差修正因子。

$$L(k) = \frac{P(k-1) \varphi(k)}{\rho + \varphi(k) P(k-1) \varphi^T(k)} \quad (11)$$

通过变换式(8)中的等式右侧,可得

$$r(k) = \sum_{k=0}^K \rho^{K-k} \varphi(k) y(k)$$

$$= \sum_{k=0}^{K-1} \rho^{K-k} \varphi(k) y(k) + \varphi(k) y(k) \quad (12)$$

$$= \rho \sum_{k=0}^{K-1} \rho^{K-k-1} \varphi(k) y(k) + \varphi(k) y(k)$$

$$= \rho r(k-1) + \varphi(k) y(k)$$

此时,便可将电阻描述为

$$R_{\text{est}}(k) = Z^{-1}(k) r(k) = P(k) r(k)$$

$$= P(k-1) r(k-1) - L(k) \varphi^T(k) P(k-1) r(k-1) + \rho^{-1} \cdot$$

$$[P(k-1) \varphi(k) - L(k) \varphi^T(k) P(k-1) \varphi(k)] y(k) \quad (13)$$

$$= R_{\text{est}}(k-1) + L(k) [\varphi(k) - \varphi^T(k) R_{\text{est}}(k-1)]$$

$$= R_{\text{est}}(k-1) + L(k) e(k)$$

式中: $R_{\text{est}}(k)$ 为当前时刻的电阻估计值。

2.2 基于MPC算法的分布式电压二次控制策略

2.2.1 电压预测一致性模型

分层控制通常被大多数直流微电网用以调节直流母线电压^[20]。为了平行移动下垂特性曲线,需要将分布式二次控制的输出在一次控制的电压基础之上进行叠加。直流母线电压的表达式为

$$\begin{cases} v_{\text{pec}}(t) = v_0^*(t) - k_i i_{\text{di}} \\ v_0^*(t) = v_{\text{ref}} + \Delta v(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $v_{\text{pec}}(t)$ 为直流母线在时刻 t 的电压; $v_0^*(t)$ 为初始状态的值; k_i 为与母线连接第 i 台DG变换器的 $V-I$ 下垂系数; i_{di} 为第 i 台DG变换器的电流输出值; v_{ref} 为设定的系统电压值; $\Delta v(t)$ 为电压二次补偿值。

图5为一次控制电压补偿原理图,其中,将补偿值 $\Delta v(t)$ 加入原先的下垂曲线 h ,以实现其向上的平移变化,变为 h^* 。这种做法既有助于维持功率分配比例的稳定性,还能有效地恢复直流母线的电压水平。

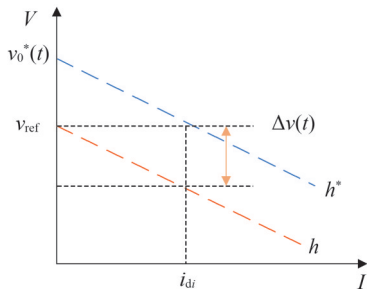


图5 一次控制电压补偿原理图

Fig.5 Schematic diagram of primary control voltage compensation

为此,本文提出了一种基于MPC算法的分布式电压二次控制策略,该策略最小化目标函数,使预测系数得到优化,可以有效降低中间变量的输出准确度对最终输出值的影响。此外,在目标函数中考虑了因线路阻抗差异引起的电压降落以及下垂控制过程中下垂系数导致的电压下降,通过这两方面的优化,进一步提升了所提控制策略的性能。

如果阻抗的参数不均匀分布,同一容量的变换器所产生的电流也将有所不同,这将导致电流分配的精确度降低,同时也会使母线电压的偏差增大^[21-22]。

电流分配误差是用来衡量直流微电网中各个分

布式电源之间电流分配是否均衡的指标。一个DG即一个节点,则电流分配误差被定义为

$$\Delta i_{ol}(t) = \sum_{m \in N, m \neq l} a_{lm} \left(\frac{i_{ol}(t)}{d_l} - \frac{i_{om}(t)}{d_m} \right) \quad (15)$$

式中: $\Delta i_{ol}(t)$ 为第 l 个DG在时刻 t 的电流分配误差; d_l 为第 l 个DG在时刻 t 的输出电流; $i_{ol}(t)$ 为第 l 个DG的电流分配比例; N 为所有DG的集合; a_{lm} 为邻接矩阵中的元素,表示第 l 个和第 m 个DG之间的连接权重,如果两个DG之间存在通信连接,则 a_{lm} 为正,如果没有连接,则 a_{lm} 为零。此公式计算的是第 m 个DG相对于其他DG的电流分配偏差。如果 $\Delta i_{ol}(t)$ 为零,那么表示电流在各个DG之间分配得十分均衡。在实际应用中,控制器的目标是使所有DG的电流分配误差趋于零,从而实现电流的准确分配。

电压二次控制的核心目标之一是最大限度地减少直流母线电压在稳态下的偏差^[23]。为此,本文定义了控制误差 g ,其表达式如式(16)所示。

$$g = g_s + g_r \quad (16)$$

$$g_s = \sum_{m \in N, m \neq l} a_{lm} \left(\frac{i_{ol}(t)}{d_l} - \frac{i_{om}(t)}{d_m} \right) \quad (17)$$

$$g_r = v_{\text{ref}} - v_{\text{pec}} \quad (18)$$

式中: g_s 为电流分配误差; g_r 为电压的控制偏差,即直流母线电压实际值 v_{pec} 与设定参考值 v_{ref} 之间的差值。

模型预测控制一般情况下通过构建预测模型、设定目标函数、实施滚动优化和进行反馈校正这4个关键步骤来得到控制器的输出^[24-25]。得益于其预测模型的灵活性和滚动优化的动态适应性,MPC算法能够有效应对各种复杂系统的控制需求。

因此,本文引入在线预测的一致性模型,其核心机制是利用控制误差 g 进行反馈校正。在该模型中引入预测系数 μ_t ,且通过最小化目标函数来持续调节其值,以实现让整个系统的动态性能达到最佳的电压二次补偿值。

$$\begin{cases} v_{\text{pec}}(t+1) = v_{\text{pec}}(t) + \Delta v(t) \\ \Delta v(t) = \mu_t \int \left[\sum_{m \in N, m \neq l} a_{lm} \left(\frac{i_{ol}(t)}{d_l} - \frac{i_{om}(t)}{d_m} \right) + v_{\text{ref}} - v_{\text{pec}}(t) \right] dt \end{cases} \quad (19)$$

电压二次控制器通过分析时刻 t 的电压状态,预测系统母线电压在时刻 $t+1$ 的变化走势。为了获得目标函数的最优解,不断优化时刻 $t+1$ 的参

数预测值和电压补偿量。该最优解接着会被反馈至预测模型中,用以获取目前的二次控制补偿量。将此补偿量动态地加入电压外环控制中,可以在线调整每步的输出,进而滚动优化直流微电网中的母线电压。

RLS的在线参数估计使MPC模型动态变化,增加了计算量,但也保证了其控制精度。

2.2.2 母线电压预测目标函数及控制框图

为提高电压的质量,需要确保微电网系统中每个DG单元的电压在不同时间点,即当前和未来时刻,都趋近于设定的电压参考值。这意味着要保证在系统运行的各个阶段,各个单元的电压都能维持在接近预定电压参考值。本文设计的目标函数为

$$F_v(t) = w_1 \left| v_{\text{pcc}}(t+1) - v_{\text{ref}} \right| + w_2 \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N a_{lm} \left| \frac{i_{ol}(t)}{d_l} - \frac{i_{om}(t)}{d_m} \right| \quad (20)$$

式中: $v_{\text{pcc}}(t+1)$ 为直流母线在时刻 $t+1$ 的电压; w_1 和 w_2 分别为第一种和第二种惩罚项的权重系数。

$$v_{\text{pcc}}(t+1) = v_{ol}(t+1) - R_{\text{est}} i_{ol}(t) = v_{\text{ref}} - k_l i_{ol}(t) - \Delta v(t) - R_{\text{est}} i_{ol}(t) \quad (21)$$

式中: k_l 为与母线连接第 l 个DG的V-I下垂系数。

结合式(20)和式(21),最终目标函数可表示为

$$F_v(t) = w_1 \left| -\Delta v(t) - (k_l + R_{\text{est}}) i_{ol}(t) \right| + w_2 \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N a_{lm} \left| \frac{i_{ol}(t)}{d_l} - \frac{i_{om}(t)}{d_m} \right| \quad (22)$$

该目标函数由两种类型的惩罚项及其对应的权重系数组成,分别为 w_1 和 w_2 。第一项 $w_1 \left| -\Delta v(t) - (k_l + R_{\text{est}}) i_{ol}(t) \right|$ 为DG在时刻 t 的直流母线电压预测值与系统设定电压值之间跟踪误差的惩罚项;第二项 $w_2 \sum_{l=1}^N \sum_{m=1}^N a_{lm} \left| \frac{i_{ol}(t)}{d_l} - \frac{i_{om}(t)}{d_m} \right|$ 为第 l 个DG相对于其他DG的电流偏差的惩罚项。当直流母线电压发生波动时,两项会随着控制器的启动而一并进行优化。当直流母线电压将要接近参考值时,微电网内各个单元之间的功率流也逐步趋向稳定状态。

鉴于权重系数的数值与目标的优先级相对应,因此预测模型的动态性能和整个系统的优化效果并

不会受其数值的影响,所以选择权重系数时仅需要考虑目标的优先级。文中将权重系数设为鉴于权重系数的数值与目标的优先级相对应,因此预测模型的动态性能和整个系统的优化效果并不会受其数值的影响,选择权重系数时仅需考虑目标的优先级。文中将权重系数设为 $w_1 = w_2 = 0.1$ 。

图6为分布式电压二次控制中MPC算法的运行流程。系统以固定的频率获取本地的电压信息,通过预测模型以得到母线电压在时刻 $t+1$ 的预测值。对目标函数进行最小化处理,可以确定最佳的预测系数,并将其代入式(19)中,从而计算获得电压二次控制相应的补偿量,最后系统依据式(19)实现对直流母线电压参考值的跟踪。

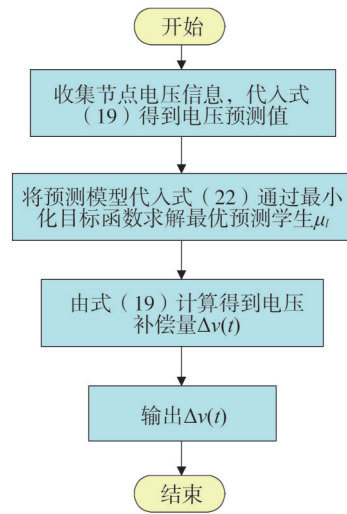


图6 模型中MPC算法的流程

Fig.6 Flowchart of the MPC algorithm in the model

DG单元采用电压电流双闭环的控制结构。其中,电流控制器的输出用于调节换流器开关管的工作状态,从而实现对直流母线电压的精确调控,图7为DG电压控制框图。

3 仿真实验

为验证本文所提基于RLS的阻抗估计方法及基于MPC算法的直流微电网分布式电压二次控制策略的有效性和性能优势,在MATLAB/Simulink平台中搭建了包含四台容量相同的DG仿真模型,仿真参数如表1所示。

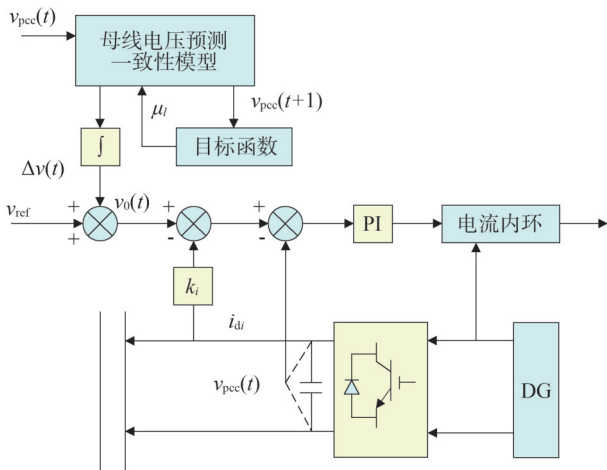


图7 DG控制框图

Fig.7 DG control block diagram

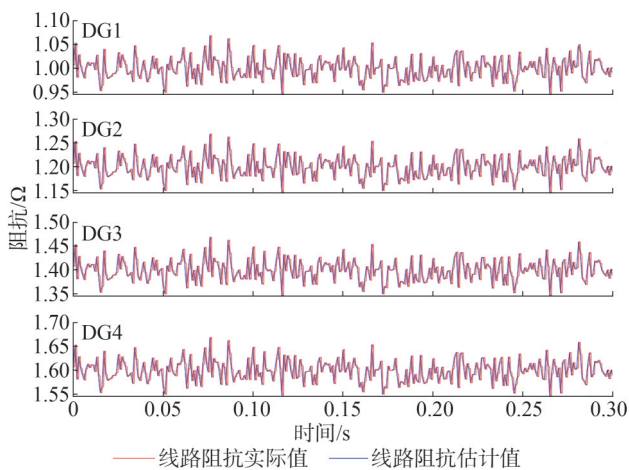
表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

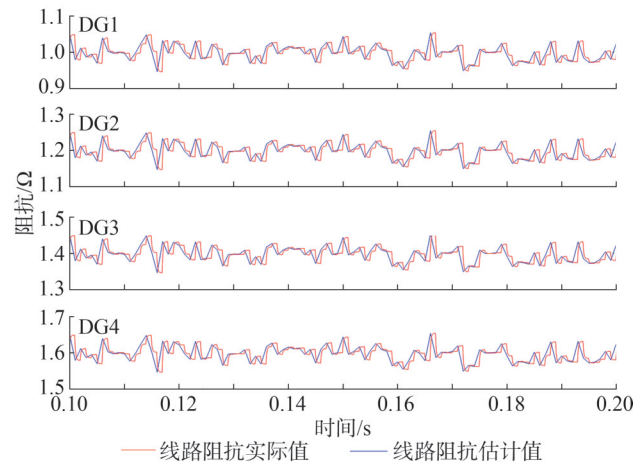
| 参数 | 数据 |
|----------------------------------|-----|
| 变换器侧电容 $C/\mu\text{F}$ | 500 |
| 直流母线电压 u_{ref}/V | 400 |
| 下垂系数 r_{d1}/Ω | 1 |
| 下垂系数 r_{d2}/Ω | 1 |
| 下垂系数 r_{d3}/Ω | 1 |
| 下垂系数 r_{d4}/Ω | 1 |

3.1 阻抗估计值的验证

分别设置 DG1、DG2、DG3 以及 DG4 的线路阻抗为 $1\ \Omega$ 、 $1.2\ \Omega$ 、 $1.4\ \Omega$ 以及 $1.6\ \Omega$ ，持续时间为 $0.3\ \text{s}$ ，测量时间间隔为 $0.005\ \text{ms}$ ，运行仿真模型，可以得到图 8。



(a)0~0.3 s 线路阻抗



(b)0.1~0.2 s 线路阻抗

图8 线路阻抗的实际值与估计值对比图

Fig.8 A graph of the actual value of the line impedance compared to the estimated value

从图 8(a)中可以看出，DG1、DG2、DG3 以及 DG4 的线路阻抗估计值分别在设定的 $1\ \Omega$ 、 $1.2\ \Omega$ 、 $1.4\ \Omega$ 以及 $1.6\ \Omega$ 上下浮动，变化较小，表明采用递归最小二乘法得到的线路阻抗估计值与线路阻抗的实际值是相符的，跟踪效果良好。

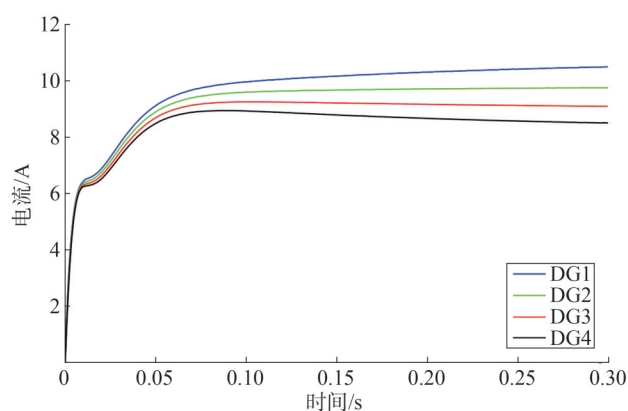
为了更为直观地观察跟踪效果，选取 $0.1\sim 0.2\ \text{s}$ 的仿真图，即图 8(b)，从中可以看出，每个时刻各个分布式电源的线路阻抗估计值和实际值是非常接近的。引入白噪声，可以模拟实际工作条件下的随机干扰和帮助评估控制策略的鲁棒性，即在不确定或随机环境下的性能表现。图 8 的跟踪效果表明采用递归最小二乘法得到线路阻抗估计值，此方法具有较强的鲁棒性，在面对不确定因素时，能保持良好的性能。

3.2 MPC 算法控制策略性能验证

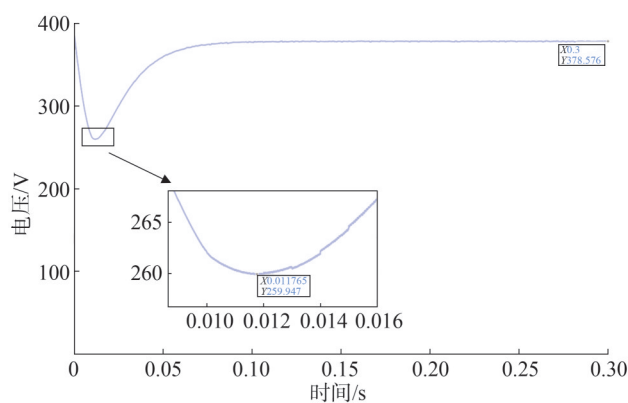
为验证本文所提 MPC 算法控制策略的有效性及其优越性，将其与传统下垂控制方法展开了对比分析，并验证了其在直流母线负荷突变下的有效性。

在传统下垂控制模式下，由于 DG 输出线路阻抗存在差异，电流分配精度受限，会出现偏差，并进一步导致直流母线电压下降。传统下垂控制的仿真结果如图 9 所示。

图 9(a)为采用传统下垂控制时，4 个分布式电源的输出电流。其中，随着负荷的不断增加，电流分



(a)DG 输出电流



(b)直流母线电压

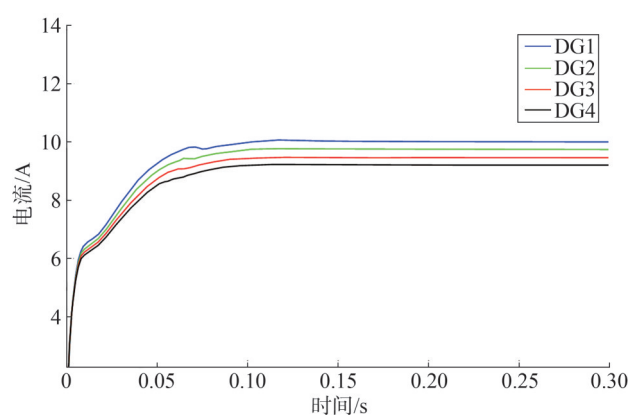
图9 传统下垂控制仿真结果

Fig.9 Simulation results of traditional droop control

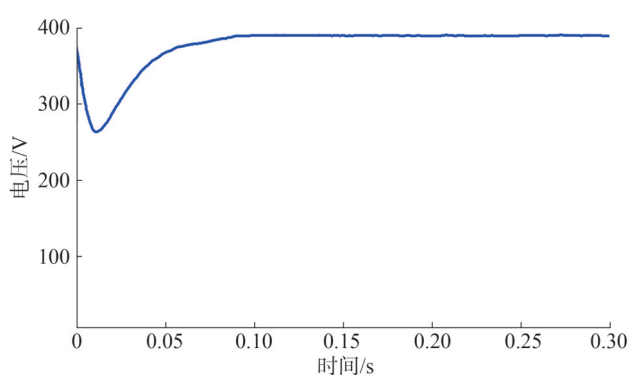
配的绝对误差在渐渐变大。图9(b)为采用传统下垂控制时,直流母线电压的仿真结果。从中可以看出,从始至终直流母线电压无法达到参考值400V,母线电压水平前期随着负荷的逐渐增大在持续降低,从最初的390V逐渐下降为最终的260V,后期虽回升至378V,但仍达不到额定值,极大地降低了系统的电能质量,所以需要加入二次控制进行电压的补偿,使其稳定在额定值。

文献[13]表明下垂系数的动态调整会对功率分配的精度和系统稳定性产生一定影响,其仿真结果如图10所示。从图10中可以看出,电流分配的绝对误差较传统下垂控制仿真结果有所减小,但仍无法实现准确分配;相较于传统下垂控制仿真结果,直流母线电压有所提升,但仍达不到额定值。

本文将二次控制加入传统的下垂控制,所提控制策略仿真结果如图11所示。



(a)DG 输出电流

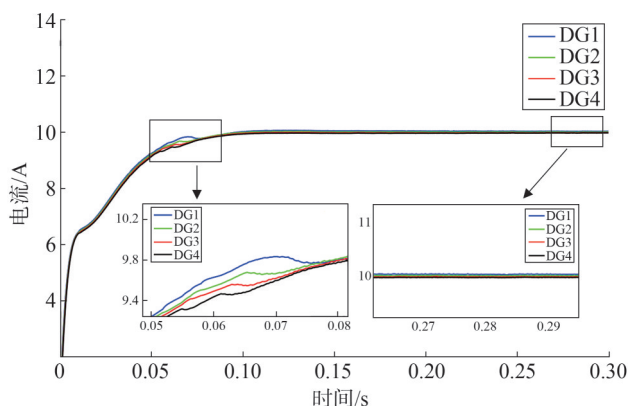


(b)直流母线电压

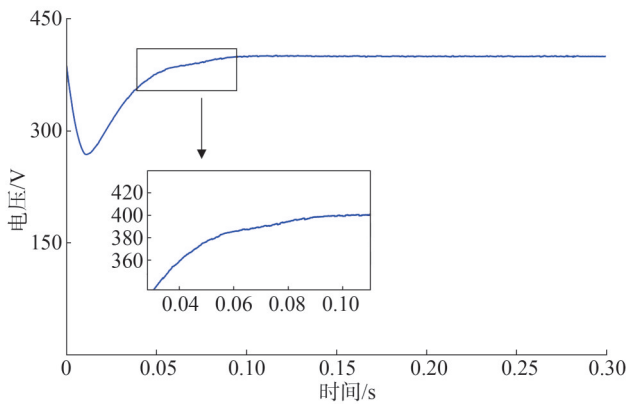
图10 文献[13]所提控制策略仿真结果

Fig.10 Simulation results of the control strategy proposed in Ref.[13]

从图11(a)中可以看出,0~0.5s随着时间的推移,电流分配误差逐渐增大,这种误差的累积不仅会严重降低DG的运行效率,还会缩短设备的使用寿命。加入二次控制后,电流得到了补偿,0.1s时便实现了准确分配,且在后续的稳定运行过程中,电流分配精度始终保持在理想的额定值。



(a)DG 输出电流



(b)直流母线电压

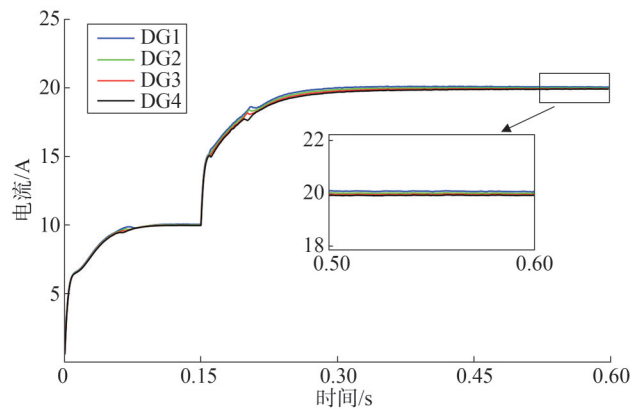
图 11 加入 MPC 算法控制策略后的仿真结果

Fig.11 Simulation results after adding MPC algorithm

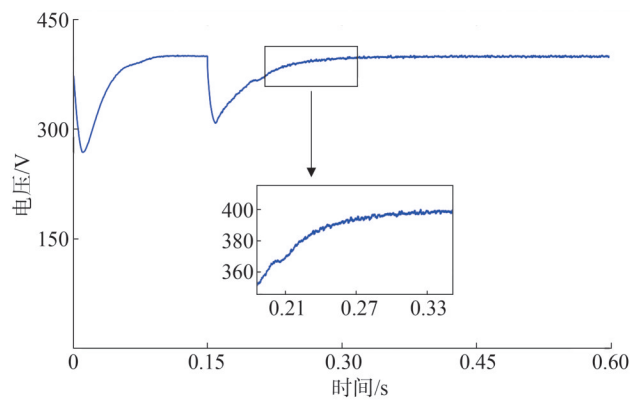
control strategy

图 11(b)中,由于线路阻抗不匹配的影响,前期母线电压跌落较为明显,0.05 s 加入二次控制后,这种状况得到改善。二次控制不仅有效补偿了线路阻抗造成的电压损耗,还解决了下垂控制中由下垂系数引起的电压降落问题,直流母线电压恢复到了设定值 400 V,并在后续运行中保持稳定,始终维持在额定电压水平。

为验证所提策略的有效性,对负荷突变的情形进行仿真。在 0.15 s 时,改变负荷,使其由 10 kW 变为 20 kW。图 12 为负荷突变时的仿真结果。从图 12(a)中可以看出,由于增大了负荷功率,各 DG 单元的输出电流都会有所增加。在分布式电压二次控制策略的作用下,在 0.15 s 前已实现了电流的准确分配,但由于在 0.15 s 改变了负荷,各 DG 单元会再一次进行电流的分配,在 0.3 s 时已经基本实现了电流的准确分配,且在后续稳态时电流依然能够实现准确分配。从图 12(b)中可以看出,在分布式电压二次控制策略的作用下,在 0.15 s 前已实现了电压的无偏差控制,但由于在 0.15 s 时改变了负荷,直流母线电压会短暂地发生跌落,同时会启动新一轮的电压二次控制,在 0.3 s 时已经基本实现了电压的无偏差控制,且在后续稳态时电压依然能够实现无偏差控制。由此可见,当负荷突然发生变化时,采用本文所提 MPC 算法控制策略仍然可以维持直流母线电压稳定在额定值,同时保持电流的准确分配。



(a)DG 输出电流



(b)直流母线电压

图 12 负荷突变时的仿真结果

Fig.12 Simulation results in the event of a sudden change in load

综上所述,所提控制策略具备精确的电流分配能力,同时可实现对直流母线电压的精准调控。

4 结论

在传统下垂控制中,变换器输出线路阻抗的不同可能导致 DG 输出电流的不均匀分配,以及直流母线电压与其参考值的偏移。为了解决这一问题,提出了基于 MPC 算法的分布式电压二次控制策略,并通过仿真得出以下结论:

1)采用 RLS 算法对馈线电阻进行估计,可以获得较高精度的阻抗估计值,且此方法具有较强的鲁棒性,在系统负荷突变时,依然能保持良好的性能。

2)通过最小化目标函数来求解预测系数,获得最优电压二次控制补偿量,并将其加入一次控制中。同时,在目标函数中设置了两个惩罚项,即综合考虑由线路阻抗引起的电压下降和下垂系数在下垂控制

中产生的电压降落,这样的设定从两个方面提高了所提 MPC 控制策略的性能,从而准确地分配电流并恢复母线电压水平。

参考文献

- [1] 樊晓伟,王瑞妙,杨海峰,等.计及源荷不确定的综合能源微电网集群优化运行[J].电力建设,2024,45(8):128-139.
FAN Xiaowei, WANG Ruimiao, YANG Haifeng, et al. Optimization operation of integrated energy microgrid cluster considering source-load uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8):128-139.
- [2] 吴涵,柴利,田玉楚.快速平均一致与多采样率下储能系统精准功率分配[J].控制理论与应用,2023,40(9):1611-1619.
WU Han, CHAI Li, TIAN Yuchu. Precise power allocation with fast average consensus and multi-rate sampling for energy storage systems[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(9):1611-1619.
- [3] 李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1):2-17.
- [4] 施凯,唐楚雄,徐培凤,等.基于滑模变结构的混合微电网接口变换器双向下垂控制[J].分布式能源,2024,9(4):23-32.
SHI Kai, TANG Chuxiong, XU Peifeng, et al. Bidirectional droop control of hybrid microgrid interface converter based on sliding mode control[J]. Distributed Energy, 2024, 9(4):23-32.
- [5] 朱珊珊,汪飞,郭慧,等.直流微电网下垂控制技术综述[J].中国电机工程学报,2018,38(1):72-84.
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1):72-84.
- [6] 吕振宇,苏晨,吴在军,等.孤岛型微电网分布式二次调节策略及通信拓扑优化[J].电工技术学报,2017,32(6):209-219.
LÜ Zhenyu, SU Chen, WU Zaijun, et al. Distributed secondary control strategy and its communication topology optimization for islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6):209-219.
- [7] YUAN Q F, WANG Y W, LIU X K, et al. Distributed fixed-time secondary control for DC microgrid via dynamic average consensus[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4):2008-2018.
- [8] LU X N, GUERRERO J M, SUN K, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4):1800-1812.
- [9] WANG P B, LU X N, YANG X, et al. An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9):6658-6673.
- [10] 苏晨,吴在军,吕振宇,等.孤立微电网分布式二级功率优化控制[J].电网技术,2016,40(9):2689-2697.
SU Chen, WU Zaijun, LÜ Zhenyu, et al. Distributed secondary power optimization control for islanded microgrid[J]. Power System Technology, 2016, 40(9):2689-2697.
- [11] SHAFIEE Q, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Distributed secondary control for islanded microgrids—a novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2):1018-1031.
- [12] 周晓倩,艾芊.基于自适应经济下垂控制的微电网分布式经济控制[J].电力自动化设备,2019,39(4):50-55.
ZHOU Xiaoqian, AI Qian. Distributed economic control of microgrid based on adaptive economic droop control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4):50-55.
- [13] LI G Y, DU Z C, SHEN C, et al. Coordinated design of droop control in MTDC grid based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3):2816-2828.
- [14] 张勤进,庄绪州,刘彦呈,等.基于线路阻抗补偿的直流微源并联均流控制策略[J].电网技术,2021,45(5):1912-1921.
ZHANG Qinjin, ZHUANG Xuzhou, LIU Yancheng, et al. Current sharing control strategy of parallel DC micro-sources based on line impedance compensation[J]. Power System Technology, 2021, 45(5):1912-1921.
- [15] 刘琛,赵晋斌,王闪闪,等.基于单脉冲注入的直流微电网线路阻抗检测[J].电工技术学报,2018,33(11):2584-2591.
LIU Chen, ZHAO Jinbin, WANG Shanshan, et al. A line impedance identification based on single pulse injection in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11):2584-2591.
- [16] 刘子文,苗世洪,范志华,等.基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J].电工技术学报,2019,34(4):795-806.
LIU Ziwen, MIAO Shihong, FAN Zhihua, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4):795-806.
- [17] RADHAKRISHNAN N, SCHNEIDER K P, TUFFNER F K, et al. Learning-based load control to support resilient networked microgrid operations[J]. IET Smart Grid, 2020, 3(5):697-704.
- [18] SMITH E, ROBINSON D, AGALGAONKAR A. Cooperative control of microgrids: a review of theoretical frameworks, applications and recent developments[J]. Energies, 2021, 14(23):8026.
- [19] HOFFMANN N, FUCHS F W. Minimal invasive equivalent grid

- impedance estimation in inductive-resistive power networks using extended Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 631-641.
- [20] 郭慧,汪飞,顾永文,等.基于电压分层控制的直流微电网及其储能扩容单元功率协调控制策略[J].电工技术学报,2022,37(12):3117-3131.
- GUO Hui, WANG Fei, GU Yongwen, et al. Coordinated power control strategy for DC microgrid and storage expansion unit based on voltage hierarchical control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3117-3131.
- [21] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H, et al. Automatic droop control for a low voltage DC microgrid [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(1): 41-47.
- [22] 蒋伟明,赵晋斌,高明明,等.具有电压自恢复特性的独立直流微电网控制策略研究[J].电网技术,2020,44(9):3547-3555.
- JIANG Weiming, ZHAO Jinbin, GAO Mingming, et al. Control strategy with voltage self-recovery characteristic for autonomous DC microgrid [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3547-3555.
- [23] DAI X R, LIU G P, HU W S, et al. Distributed secondary control for DC microgrids with time-varying communication delays: a networked predictive control scheme [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 4459-4472.
- [24] XIAO Q, CHEN L L, JIA H J, et al. Model predictive control for dual active bridge in naval DC microgrids supplying pulsed power loads featuring fast transition and online transformer current minimization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 5197-5203.
- [25] TATARI F R, BANEJAD M, KALAT A A. A move blocking based direct voltage model predictive control to enhance the dynamic performance of DC microgrids containing constant power loads [J]. IET Renewable Power Generation, 2023, 17(13): 3340-3354.

收稿日期:2025-02-16

修回日期:2025-04-30

作者简介:

蔡紫璇(2000),通信作者(1006069755@qq.com),女,硕士在读,主要研究方向为电力电子与新能源发电;

刘毅力(1974),男,硕士,副教授,主要研究方向为电力系统自动化、智能电网在线监测理论与技术;

仇继扬(1979),男,高级工程师,主要从事配电网线损管理工作;

张艳丽(1975),女,高级工程师,主要从事配电网线损管理工作;

兰丹阳(1992),女,工程师,主要从事配电网线损管理工作。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250003

基于梯形积分的储能型模块化多电平变流器等值建模

汪志强¹, 刘邦金¹, 吴斌¹, 张敏¹, 张乃文^{2*}

(1. 南方电网调峰调频(佛山)储能科技有限公司, 广东 佛山 528225;

2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 储能系统在新型电力系统里有着广阔的市场前景, 它能在很大程度上提升电网电能质量、稳定性以及供电的可靠性。变流器(power conversion system, PCS)是储能系统中重要组成部分, 目前模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)在储能电站被广泛使用。储能型MMC含有大量的开关元件, 给电磁仿真带来很大的负担, 储能型MMC的引入导致电气节点数量增多, 因此, 如何对储能型MMC进行等效处理以提高系统计算效率, 已成为亟待解决的关键问题。针对该问题, 提出一种基于梯形积分与戴维南等值的储能型MMC等值方案, 首先介绍储能型MMC拓扑结构, 其次考虑储能系统通过DC/DC变换器接入子模块, 具体给出储能型MMC等值方法, 最后在PSCAD/EMTDC平台搭建储能型MMC等值模型, 验证其可行性与准确性。与现有方法相比, 本文所提出的方案在考虑储能型MMC实际应用的同时不会改变仿真的速度与准确性。

关键词: 储能; 模块化多电平变流器; 梯形积分法; 等值模型; PSCAD/EMTDC仿真

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2026)01-0109-12

Equivalence for Modular Multilevel Converter With Energy Storage System Submodules Based on Trapezoidal Integrals

WANG Zhiqiang¹, LIU Bangjin¹, WU Bin¹, ZHANG Min¹, ZHANG Naiwen^{2*}

(1. CSG Power Generation (Foshan) Energy Storage Technology Co., Ltd., Foshan 528225, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Energy storage systems have a huge market prospect in the new power system, which can greatly improve the power quality and stability of the grid, and the reliability of the power supply. In recent years, energy storage converters, integral to energy storage systems, have undergone rapid development. Among these, the modular multilevel converter with energy storage systems (MMC-ESS) has emerged as a prominent choice for energy storage power stations. MMC-ESS contain a large number of switching elements, which puts a great burden on electromagnetic simulation, and the utilization of MMC-ESS increases the number of electrical nodes, so how to equate MMC-ESS to improve the system computation speed is an urgent problem that needs to be solved nowadays. Addressing this pressing issue, this study proposes an innovative MMC-ESS submodule equivalence scheme based on trapezoidal integration and Thevenin equivalence methods. This article proceeds by initially outlining the topology of MMC-ESS. Secondly, considering that the energy storage system is connected to the sub-module through the DC/DC converter, MMC-ESS equivalent method is given in detail. Finally, the MMC-ESS equivalent model is built on the PSCAD/EMTDC platform to verify its feasibility and accuracy. Compared with the existing methods, the proposed scheme retains the simulation speed and accuracy while considering the practical application of MMC-ESS.

Keywords: energy storage system; modular multilevel converter (MMC); trapezoidal integration; equivalence model; PSCAD/EMTDC simulation

基金项目: 国家自然科学基金(U23B20126); 南瑞集团计划外项目“储能变流器多机并联谐振分析及抑制研究”(4500627224)。

National Natural Science Foundation of China (U23B20126); The unplanned technology project of NARI Group “Analysis and Research on Multi-machine Parallel Resonance of Energy Storage Converter and Its Suppression”(4500627224).

0 引言

随着新型电力系统的发展, 储能技术在电力系统中占比逐步提高, 是未来能源结构转型的关键技

术^[1]。储能技术的应用,在一定程度上对传统电力系统难以大量储存电能的不足有所弥补,储能设备能够迅速地吸纳、释放功率,在新能源输出出现波动时减轻对电网的冲击,承担电力系统接纳新能源的重任^[2-4]。

在储能系统并网结构中,功率变换器是其中的重要组成部分,通过调整控制策略等方式控制系统运行状态^[5]。传统的两电平变换器器件开关耐压能力差,输出电平低,低频时电能质量明显变差^[6]。近年来储能变流器(power conversion system, PCS)发展迅速,从传统的单极式双电平 PCS 逐渐演变为双极式 PCS、三电平 PCS 以及更为复杂的级联型 PCS 与储能型模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)^[7-9]。

MMC 最早由 R.Marquart 和 A.Lesnicar 教授研发的电压源型换流器新拓扑^[10]。随着 MMC 电平数的增加,非线性电力电子器件模型的导纳矩阵阶数也随之增大,导致在电磁仿真中计算高阶矩阵的逆矩阵难度增大,从而使得高电平 MMC 的仿真速度变慢,无法满足科研需求^[10-13]。储能型 MMC 结构基本与传统 MMC 结构相似,主要区别在于储能型 MMC 通过将储能电池分散接入子模块,控制 MMC 变换器实现对电池组的充放电^[11]。因此,在对开关器件等值时,可以参照传统 MMC 的等值方案。文献[11]提出将 MMC 中的电力电子器件替换为一二值可变电阻,其中关断电阻为实际值,并采用梯形积分法离散子模块电容,进一步得到每个桥臂的戴维南等效电路,实现了矩阵维数降阶,为高精度与高速度并行的等值研究提供了新的方向。文献[12]则将开关器件的关断电阻设为无穷大,继续使用梯形积分法离散电容,从而加快仿真速度,但精度有所下降。

目前,储能型 MMC 等值分析主要集中在理论研究阶段^[14-21]。其中文献[15]提出使用传感器测量子模块的电池电压和电流,结合卡尔曼滤波算法电池模型参数,对开关器件组则使用开关函数代替,进而得到戴维南等效电路。该方法由于传感器使用较多且算法在仿真软件中难以实现,因此在实际工程中应用存在困难。文献[16-18]提出通过电容离散化和开关二值电阻得到子模块的等效电路拓扑,并使用嵌套算法快速求解子模块等效电路,提出使用戴维南定理以及快速嵌套法代替已有的平均值模型,

但未明确指定离散化方法。文献[19]使用开关组等值法与后退欧拉算法提升了仿真精度,但由于仿真速度较慢,仍不适用于实际工程应用,文献[20]储能电池通过 MMC 并网的拓扑结构及控制策略进行了详细研究,对储能电池进行等值建模,但并未对储能型 MMC 所含电力电子器件进行等值建模,系统导纳矩阵维数并未降低,仿真速度较慢。文献[21]针对储能系统直接与子模块电容并联以及将子模块电容替换为储能系统,给出了等值方案,但由于实际储能型系统在考虑电池组功率变换过快时,常将储能系统通过 DC/DC 变换器接入子模块,上述方法难以应用于实际工程。

为解决上述问题,在考虑储能系统通过 DC/DC 变换器接入子模块拓扑基础上,提出一种基于梯形积分的储能型 MMC 桥臂等值建模方案,通过梯形积分法离散储能型 MMC 电容,根据开关二值电阻建立储能型 MMC 子模块等效电路,基于戴维南等值、叠加原理等电路基本原理对等效电路进行快速求解,并建立了储能型 MMC 电磁暂态仿真模型,在 PSCAD/EMTDC 进行仿真验证。

1 PCS 拓扑结构

介绍不同 PCS 拓扑结构,重点介绍储能型 MMC 拓扑结构。此外比较储能型 MMC 与其他变流器,得到储能型 MMC 的优势。

1.1 两电平 PCS

PCS 最简单的拓扑结构是单级式两电平结构,储能模块通过 DC/AC 变换器直接与电网侧相连接,如图 1 所示。该拓扑结构简单,电能转换效率较高,是最早应用于电力系统的 PCS。

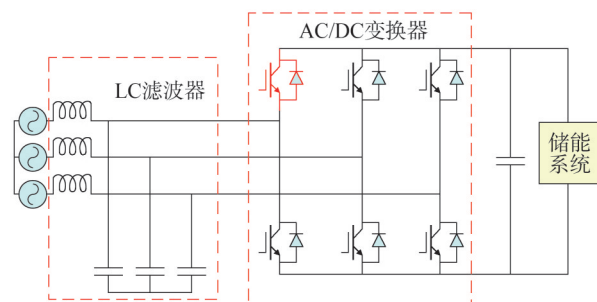


图1 单级式PCS

Fig.1 The single-stage PCS

单级式两电平变流器容量小,器件耐压能力有限,直流侧储能模块电压变化范围较小。为了解决以上问题,在单级式变流器直流侧再加一级 DC/DC 变换器,构成了双极式变流器,如图 2 所示,使储能模块容量配置更加灵活。

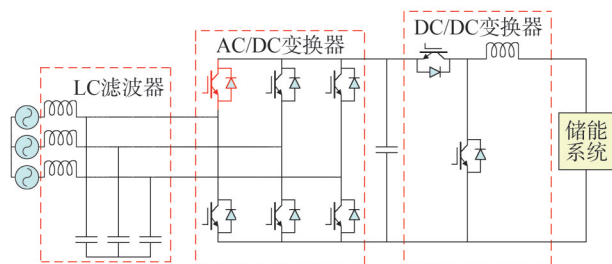


图2 双极式 PCS
Fig.2 The bipolar PCS

1.2 三电平 PCS

两电平变流器常用于低压领域,为了解决变流器容量问题,有学者提出中点钳位三电平变流器,常见的三电平变流器包括 I 型三电平变流器、T 型三电平变流器以及有源箝位型三电平变流器,如图 3 所示。三电平变流器输出电平多,输出电压电流质量提高,降低了单个器件开关损耗。

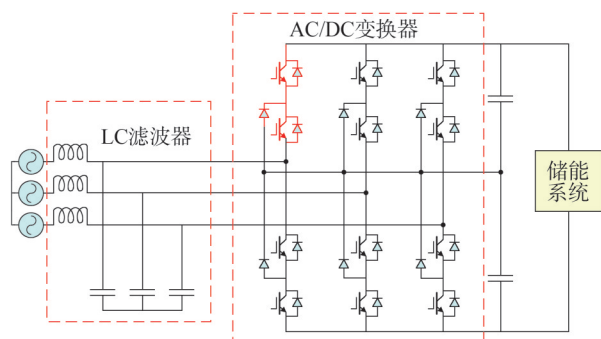


图3 三电平 PCS
Fig.3 The three-level PCS

1.3 级联型 PCS 拓扑

级联型 PCS 由功率转化模块与电池管理模块组成。储能单元在每个 H 桥的直流侧,桥臂均采用星型连接,经电感与电网相连,如图 4 所示。模块化的设计便于储能单元的功率控制,同时避免了大规模储能电池的串联,电压等级通过串联 H 桥个数来提高。

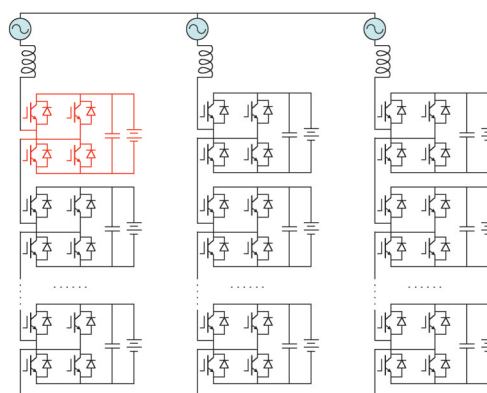


图4 级联型 PCS
Fig.4 The cascaded PCS

1.4 储能型 MMC

1.4.1 储能型 MMC 拓扑结构

典型的储能型 MMC 桥臂拓扑结构由多个功率变化子模块、2 个桥臂电阻、2 个桥臂电感组成,如图 5 所示,图中,SM 表示子模块。拓扑结构共有三相,上下桥臂可各含有 N 个子模块,三相之间通过公共母线连接,减小谐波含量,增强系统稳定性^[22]。与传统少电平的换流器相比,储能型 MMC 电压等级更高,能灵活控制储能单元电压范围,提高变流器工作效率。储能型 MMC 子模块分为全桥型与半桥型,其中半桥型子模块应用最为广泛,如图 6 所示,其中包括 3 种工作模式,如表 1 所示。通过控制开关组的运行状态,进而改变子模块的输出电压使子模块运行于不同工作状态。

半桥型储能 MMC 子模块的具体拓扑如图 6 所示,主要与电力电子变换相关的器件包括两组反并联的 IGBT 和二二极管,电容 C 则负责储能。 K_1 是一个快速旁路开关,其作用是在子模块发生故障时,能够迅速地隔离故障。 K_2 是一个压接式封装晶闸管,在 MMC 闭锁状态下,负责保护与其并联的续流二极管 D_2 ^[23]。由于 K_1 和 K_2 与子模块并联,现有的高效 MMC 仿真模型通常不考虑这两个元件。 R 为电容的并联电阻,用于电容 C 的均压和在闭锁后的缓慢放电,由于其阻值较大,对电容 C 的稳态特性影响极小,通常在仿真中不体现^[24]。

1.4.2 储能型 MMC 半桥子模块数学模型

由表 1 可知储能型 MMC 半桥子模块有多种工作模式,对不同工作模式下的子模块建立数学模型。

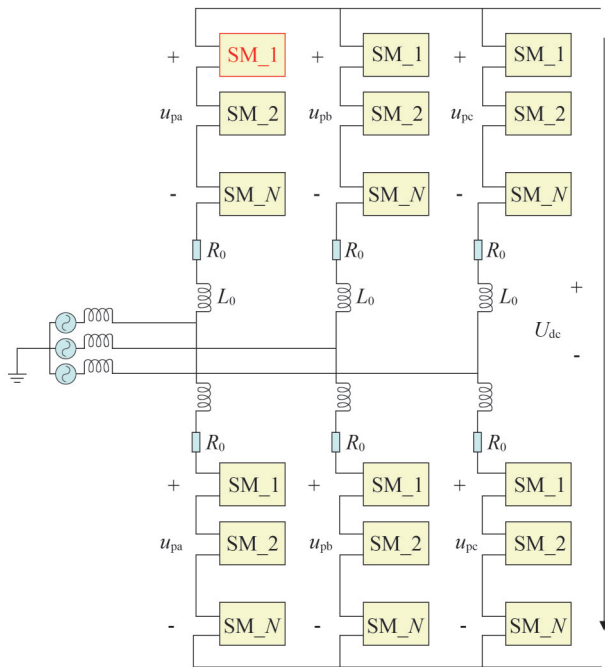


图5 储能型MMC

Fig.5 The MMC with energy storage system

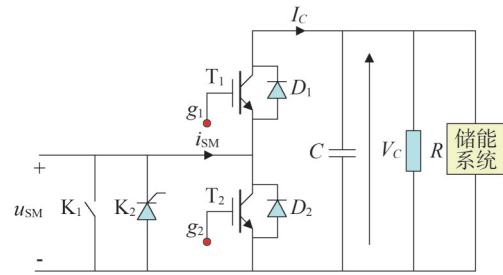


图6 半桥子模块

Fig.6 The half-bridge submodule

解闭锁状态(投入与切除): S 为子模块的投切信号,当 $S=1$ 时,子模块被投入, T_1 导通, T_2 关断,电流经过 T_1 ($i_{SM}<0$,放电)或 D_1 ($i_{SM}>0$,充电),输出电压 V_0 为 V_C ;当 $S=0$ 时,子模块被切除, T_1 关断, T_2 导通,电流经过 T_2 ($i_{SM}>0$)或 D_2 ($i_{SM}<0$),输出电压 V_0 为 0 。其数学模型如式(1)和式(2)所示。

$$V_0 = S \times V_C \quad (1)$$

表1 子模块工作模式

Table 1 Different working modes in MMC with energy storage system

| 工作模式 | 开关状态 | $i_{SM}>0$ | $i_{SM}<0$ | 电容 |
|------|----------------------|------------|----------------------|--------------------------------------|
| 投入 | T_1 导通 T_2 关断 | | | 充电($i_{SM}>0$) 放电($i_{SM}<0$) |
| | | 切除 | T_2 导通 T_1 关断 | |
| 闭锁 | T_1 关断 T_2 关断 | | | |

$$C \frac{dV_C}{dt} = S \times i_{SM} \quad (2)$$

式中: V_C 为电容电压; i_{SM} 为子模块电流。

闭锁状态: 子模块中的 IGBT 触发信号均为 0, $S_1=0, S_2=0, i_{SM}>0$ 时, 电流通过 D_1 给电容充电, 输出电压为 V_C ; $i_{SM}<0$ 时, 电流流过 D_2 , 子模块被切除, 输出电压为 0。其数学模型如式(3)和式(4)所示。

$$V_0 = \begin{cases} V_C, i_{SM} > 0 \\ 0, i_{SM} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$C \frac{dV_C}{dt} = \begin{cases} i_{SM}, i_{SM} > 0 \\ 0, i_{SM} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

2 基于梯形积分法的储能型 MMC 子模块等值模型

2.1 梯形积分法基本原理

电力系统电磁暂态仿真过程包括求解系统元件的数学模型及其相应的数值算法。数学模型经常用代数表达式表示, 数值算法应用于不同仿真步长下对微分方程的求解。常常使用隐式梯形积分法对微分方程求解, 其递推格式为

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{2}h [f(x_n, y_n) + f(x_{n+1}, y_{n+1})] \quad (5)$$

式中: y_n 与 y_{n+1} 分别为前一时段与后一时段曲线与 x 轴围成的面积; x_n 与 x_{n+1} 分别为前一时段与后一时段 x 轴的坐标; $h=x_{n+1}-x_n$ 。

图 7 展示了式(5)的几何意义, 当仿真步长较小时, 灰色部分面积可以近似替代 $ABCD$ 所围成的面积。

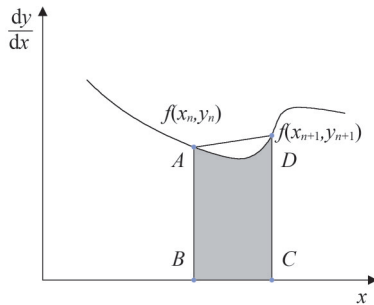


图 7 梯形积分几何解释

Fig.7 Geometric interpretation of the trapezoidal rule

局部截断误差采用泰勒展开方式分析如式(6)所示。

$$y_{n+1} = y_n + hy'_n + \frac{h^2}{2}y''_n + O(h^3) \quad (6)$$

式中: y'_n 与 y''_n 分别为 y_n 的一阶导数与二阶导数; $O(h^3)$ 为局部截断误差。

隐式梯形积分法的局部截断误差为 $O(h^3)$, 则 P 值为 2, 因此具有 2 阶精度。

隐式梯形积分的稳定域为 $\{\mu \in \mathbb{C} \mid |\frac{1+2\mu}{1-2\mu}| < 1\}$,

具备 A 稳定性。隐式梯形积分法能够确保在任意仿真步长下截断误差逐步衰减, 它是 A 稳定方法中误差常数最小的数值方法^[25-26]。因此在电力系统电磁暂态仿真中得到了广泛应用。

2.2 电容、电抗元件时域等效模型

通过梯形积分这一数值方法, 可以对电容和电感时域模型进行等效处理, 将含有微分分项的电容时域方程以及电感时域方程差分化处理, 转化为对数值微分项求和, 进而转化为电源加电阻的戴维南(诺顿)等效电路。电容的时域戴维南等效模型如图 8 所示。

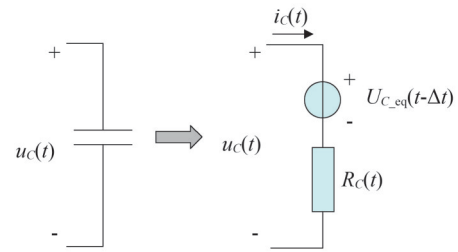


图 8 电容戴维南等效电路

Fig.8 The capacitive Thevenin equivalent circuit

电容器的电压积分公式为

$$u_c(t) = u_c(t - \Delta t) + \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i_c(t) dt \quad (7)$$

式中: Δt 为仿真步长; $u_c(t)$ 为电容电压关于时间 t 的函数, 表示 t 时刻电容电压大小; $i_c(t)$ 为电容电流关于时间 t 的函数, 表示 t 时刻电容电流大小。

将电容的电压方程利用梯形积分法转化为数值差分形式, 由梯形积分公式可得

$$u_c(t) = u_c(t - \Delta t) + \frac{1}{C} \cdot \frac{i_c(t) + i_c(t - \Delta t)}{2} \cdot \Delta t \quad (8)$$

$$= \frac{\Delta t}{2C} \cdot i_c(t) + \left[\frac{\Delta t}{2C} \cdot i_c(t - \Delta t) + u_c(t - \Delta t) \right]$$

根据梯形积分法等效电阻 R_c 的计算公式为

$$R_c = \frac{\Delta t}{2C} \quad (9)$$

等效电压源 U_{c-eq} 的计算如式(10)所示。

$$U_{c-eq}(t - \Delta t) = \frac{\Delta t}{2C} \cdot i_c(t - \Delta t) + u_c(t - \Delta t) \quad (10)$$

根据式(8)、式(9)与式(10),得到电容电压的 u_c 的计算公式为

$$u_c(t) = R_c \cdot i_c(t) + U_{c-eq}(t - \Delta t) \quad (11)$$

故电容器的戴维南等效电路如图8所示。

对于另一个非线性元件电感来说,梯形积分也可用于离散电感的电流,电感元件的诺顿等效结果如图9所示。

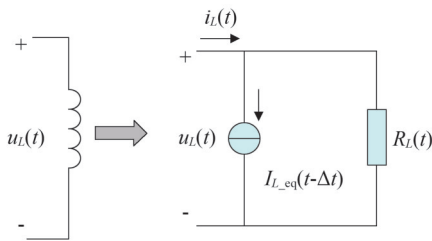


图9 电感诺顿等效电路

Fig.9 The inductive Norton equivalent circuit

电感器的电流积分如式(12)所示。

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t u_L(t) dt + i_L(t - \Delta t) \quad (12)$$

式中: $u_L(t)$ 为电感电压关于时间 t 的函数,表示 t 时刻电感电压大小; $i_L(t)$ 为 t 时刻电感电流大小。

式(13)为诺顿等效电路中,使用梯形积分法离散电感后等效电阻 R_L 的计算公式。

$$\frac{1}{R_L(t)} = \frac{\Delta t}{2L} \quad (13)$$

对电感电流进行诺顿等效,等效电流源 I_{L-eq} 的计算如式(14)所示。

$$I_{L-eq}(t - \Delta t) = \frac{\Delta t}{2L} \cdot u_L(t - \Delta t) + i_L(t - \Delta t) \quad (14)$$

根据式(12)、式(13)与式(14),得到电感电流 i_L 的计算公式为

$$i_L(t) = \frac{1}{R_L(t)} \cdot u_L(t) + I_{L-eq}(t - \Delta t) \quad (15)$$

2.3 储能型 MMC 等值具体步骤

通过梯形积分法对半桥型子模块电容进行离散化处理,根据 IGBT 的触发信号不同,对不同工作状态下的储能型 MMC 进行戴维南等值,等值原理图如图10所示^[27]。

首先,结合开关器件导通关断特性,当 IGBT 使能信号为 1 时,电阻取极小值,当 IGBT 使能信号为 0 时,电阻取极大值。根据开关二值函数,将图10中的 IGBT 与反并联二极管的等效电阻使用 R_1 和 R_2 代替。

其次,针对半桥子模块的电容,根据本文 2.2 节所述,将其转化为电阻串联电压源的戴维南等效,结合开关组等效方案,将电力电子器件部分与非线性元件部分转化为 3 个可变电阻。由于半桥子模块电容电压为正值,所以在半桥子模块等效时,通过强制赋零环节保证电容电压输出为正值。

根据戴维南等值原理与电路分压原理,计算储能型 MMC 等值电阻以及等值电压源。储能型 MMC 子模块等值具体流程如图11所示。

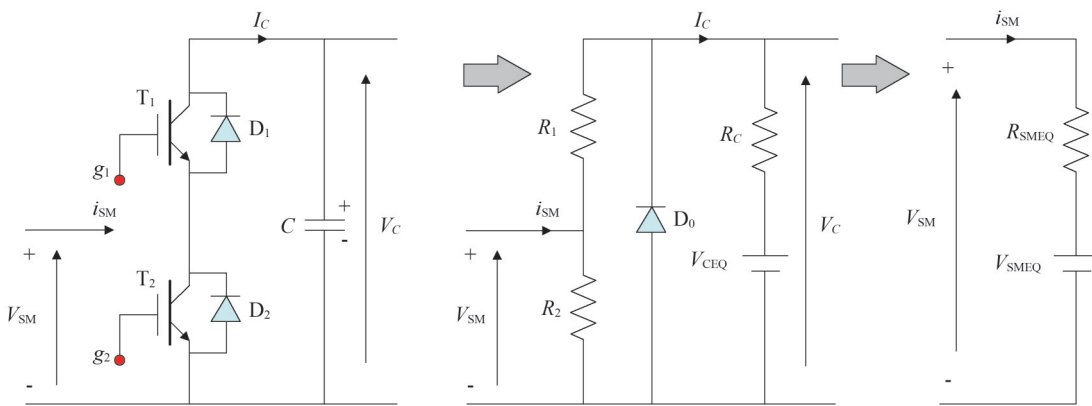


图10 储能型 MMC 等值过程图

Fig.10 The equivalent process diagram of the MMC with energy storage system

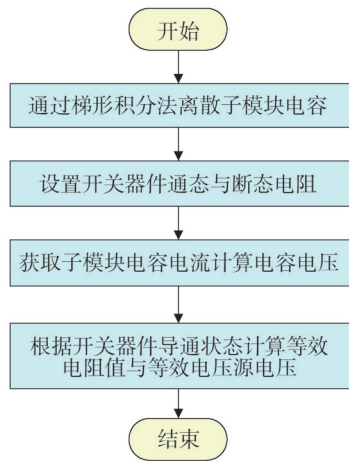


图 11 储能型 MMC 等值流程图

Fig.11 The flowchart of the MMC with energy storage system submodule equivalence

基于叠加定理,在计算子模块电容电压时,将每个仿真步长下电容电压的增量单独计算,使用梯形积分法根据仿真步长对子模块进行离散化处理,子模块电容的等效电阻如式(16)所示。

$$R_C^{\Delta t} = \frac{\Delta t}{2C} \quad (16)$$

式中:假定单个桥臂中所有子模块电容值 C 大小相同; $R_C^{\Delta t}$ 为每个仿真步长下电容的等效电阻。

为方便子模块电容电压的叠加,等值工作的第一步是将开关器件组以及子模块电容电压进行初始化,将开关器件组的等效电阻均设置为一极大值,仿真软件中 IGBT 的关断电阻大约为兆欧级别,本文根据关断电阻定义一个通态电阻,此通态电阻大约为毫欧级别;将子模块电容初始电压置零。如式(17)和式(18)所示。

$$R_1 = R_2 = R_{\text{off}} + R_{\text{on}} \quad (17)$$

$$U_{\text{EQ}} = 0 \quad (18)$$

式中: U_{EQ} 为等效电压源初始电压; R_{off} 与 R_{on} 分别为上述仿真软件中定义的电力电子器件关断电阻与通态电阻。

根据基尔霍夫电流定律, R_2 流过电流值为桥臂电流与子模块电容电流之差,计算每个仿真步长下流经电容的电流如式(19)所示。

$$I_C(t) = \frac{I_{\text{ARM}}(t) \cdot R_2 - V_{\text{CEQ}}(t - \Delta t)}{R_1 + R_2 + R_C^{\Delta t}} \quad (19)$$

式中: $I_{\text{ARM}}(t)$ 为 t 时刻流经该子模块的桥臂电流; $V_{\text{CEQ}}(t - \Delta t)$ 为 $t - \Delta t$ 时刻电容等效电压值。

在具体计算 R_1 、 R_2 的阻值时,巧妙应用器件的控

制信号,根据半桥型子模块运行模式,正常投入与切除状态下,上下 IGBT 交替导通,当控制信号为 1 时,子模块电容处于充电或放电状态,上 IGBT 导通,当控制信号为 0 时,子模块处于切除状态,下 IGBT 导通;当使能信号为 0 时子模块处于闭锁状态,此时设置上下 IGBT 均关断,为了满足上述需求,根据式(20)与式(21)更新上下开关组的状态。

$$R_1 = R_{\text{on}} + R_{\text{off}} - R_{\text{off}} \times G_1 \quad (20)$$

$$R_2 = R_{\text{on}} + R_{\text{off}} \times G_1 \quad (21)$$

式中: G_1 为控制信号。

电容电流在仿真软件中为已知量,电容的等效电压需通过电流反解并进行叠加,计算如式(22)所示

$$V_{\text{CEQ}}(t - \Delta t) = V_C(t - \Delta t) + R_C^{\Delta t} I_C(t - \Delta t) \quad (22)$$

式中: $V_C(t - \Delta t)$ 与 $I_C(t - \Delta t)$ 分别为 $t - \Delta t$ 时刻子模块电容电压与电流。

根据戴维南等效原理,与子模块电路的等效拓扑结构,由图 10 可得子模块等效电阻 R_{SMEQ} 与子模块等效电压源电压 V_{SMEQ} ,如式(23)与式(24)所示。

$$R_{\text{SMEQ}}(t) = R_2 \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_C^{\Delta t}} \right) \quad (23)$$

$$V_{\text{SMEQ}}(t - \Delta t) = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_C^{\Delta t}} \right) \cdot V_{\text{CEQ}}(t - \Delta t) \quad (24)$$

基于梯形积分法离散储能型 MMC 子模块电容,结合戴维南等效原理,将由电力电子器件与电容组成的子模块等效为由电阻与电压源组成的戴维南电路,如图 12 所示。

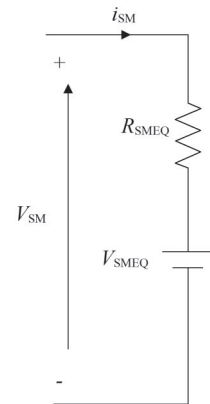


图 12 储能型 MMC 半桥子模块戴维南等效电路

Fig.12 The Thevenin equivalent circuit of the MMC-ESS half-bridge submodule

在考虑储能型 MMC 应用于工程实际时,常将储

能系统通过 DC/DC 变换器接入子模块,故对 DC/DC 变换器中的电力电子器件按照上述开关二值电阻的等值方法进行等值。等值原理图如图 13 所示。

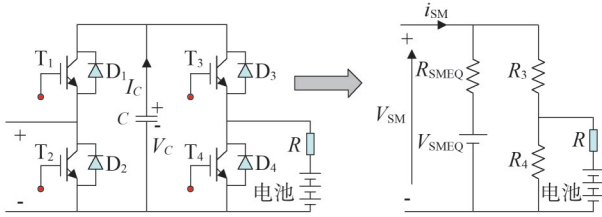


图 13 储能型 MMC 考虑电池接入方式等值电路
Fig.13 The MMC-ESS equivalent circuit considering battery access mode

通过对整个储能型 MMC 的每个桥臂进行戴维南等效,桥臂的所有子模块都可以等效为电阻串联电压源的形式,桥臂中所有子模块均为串联形式,故对每个投入的子模块等效电阻与等效电压源电压进行加和即为桥臂等效电阻阻值与桥臂等效电压源电压,如图 14 所示。

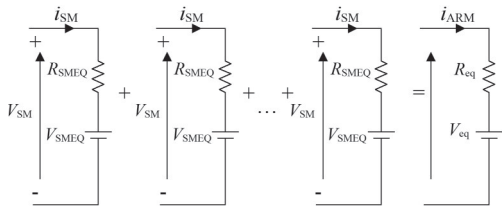


图 14 储能型 MMC 半桥桥臂戴维南等效电路
Fig.14 The Thevenin equivalent circuit of MMC-ESS half-bridge bridge arms

桥臂所有投入子模块的等效外电路电压为

$$u_{ARM}(t) = \left(\sum_{j=1}^{n_{SM}} R_{SMEQj}(t) i_{ARM}(t) + \sum_{j=1}^{n_{SM}} V_{SMEQj}(t - \Delta t) \right) \quad (25)$$

式中: $u_{ARM}(t)$ 为 t 时刻整个桥臂等效电压; n_{SM} 为 MMC 桥臂的串联子模块数; $R_{SMEQj}(t)$ 为 t 时刻第 j 个子模块的戴维南等效电阻值; $i_{ARM}(t)$ 为 t 时刻流经半桥子模块的外部电流即流经半桥桥臂的电流; $V_{SMEQj}(t - \Delta t)$ 为 $t - \Delta t$ 时刻第 j 个子模块的戴维南等效电压源的电压值。

式(25)可进一步拆分为:

$$u_{ARM}(t) = R_{eq}(t) i_{ARM}(t) + V_{eq}(t - \Delta t) \quad (26)$$

$$R_{eq}(t) = \sum_{j=1}^{n_{SM}} R_{SMEQj}(t) \quad (27)$$

$$V_{eq}(t - \Delta t) = \sum_{j=1}^{n_{SM}} V_{SMEQj}(t - \Delta t) \quad (28)$$

上述方法即为半桥子模块桥臂模型的主要等效方法,只需获得储能型 MMC 桥臂中子模块的输入数,即可得到整个桥臂的等效电阻以及等效电压源电压。利用这种方法,整个储能型 MMC 桥臂可等效为简单的戴维南等效电路,便于在仿真软件中建立模型,并显著提高仿真速度。

3 仿真模型验证

3.1 储能型 MMC 仿真特点

从上述建模过程可以看出,应用戴维南等效定理将 2.3 节中的储能型 MMC 子模块详细器件模型做降阶等效处理,使电力电子器件等值为可变电阻,使子模块电容的电压积分方程变为简单的求和,通过数学方法计算出子模块的电容输出电压。基于梯形积分法与戴维南等值的储能型 MMC 模型,将整个桥臂按照二端口网络等值为电阻与电压源串联的形式,减少了电气节点的数量,使系统导纳矩阵维数降低,可以极大地降低计算量,提高求解速度,结合先进的均压算法可以应用于超大规模储能型 MMC 工程实际。

3.2 储能型 MMC 等值效果验证

为验证所提出的等值方案的准确性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建储能型 MMC 半桥子模块器件仿真模型如图 15 所示。三相储能型 MMC 系统参数如表 2 所示。

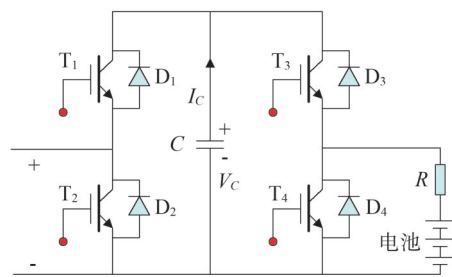


图 15 储能型 MMC 半桥子模块器件模型
Fig.15 The device model of the MMC-ESS half-bridge submodule

在 PSCAD/EMTDC 中使用自定义元件以及程序编码段,在 Fortran 程序中调用 PSCAD/EMTDC 中有关 Power Electronic Switch 的函数来访问 PSCAD/EMTDC 内置的 IGBT 和二极管数学模型。通过调用 PSCAD/EMTDC 中有关 Variable RLC 的函数访问电阻模型,以便后续引入针对电容的插值算法。构建

储能型 MMC 等值模型如图 16 所示。

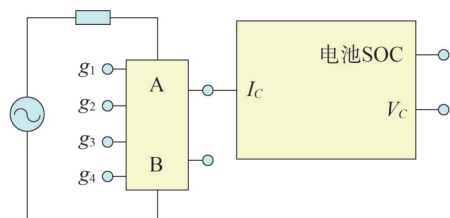


图 16 储能型 MMC 半桥子模块等值模型

Fig.16 The MMC-ESS submodule equivalence circuit in PSCAD/EMTDC

表 2 储能型 MMC 系统参数

Table 2 Parameters of the MMC-ESS

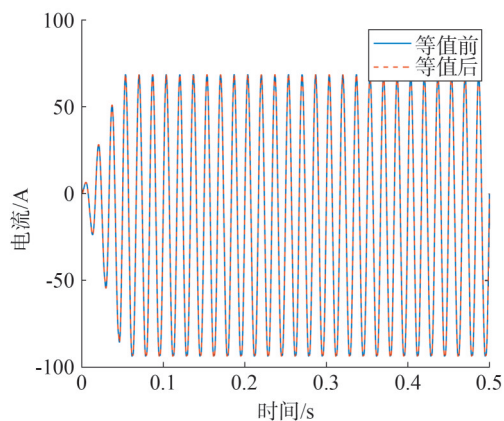
| 技术参数 | 数值 |
|-----------------------|-----------|
| 额定功率/MW | 5 |
| 网侧线电压/kV | 35 |
| 开关频率/Hz | 400 |
| 有功功率控制比例系数 | 0.1 |
| 有功功率控制积分系数 | 0.000 5 |
| 有功功率控制限幅系数 | ± 1.1 |
| 无功功率控制比例系数 | 0.5 |
| 无功功率控制积分系数 | 0.000 1 |
| 无功功率控制限幅系数 | ± 1.0 |
| 电流内环控制比例系数 | 6 |
| 电流内环控制积分系数 | 0.001 |
| 电流内环控制限幅系数 | ± 1.1 |
| 锁相环比例系数 | 0.01 |
| 锁相环积分系数 | 0.000 4 |
| 锁相环限幅系数 | ± 0.1 |
| 子模块个数 | 20 |
| 子模块电容值/ μF | 6 300 |
| 储能系统电池串联个数 | 10 |
| 储能系统电池串联电阻值/ Ω | 0.2 |

模型有 2 个电气端子 A、B,用于连接变流器交流侧与直流侧的主电路。模型有 2 个输入端子 g_1 、 g_2 ,用于控制半桥子模块 2 个 IGBT 的通断,进而控制整个子模块的闭锁与解闭锁。 g_3 、 g_4 为 DC/DC 变流器 IGBT 控制信号, I_c 为流经子模块电容的电流。

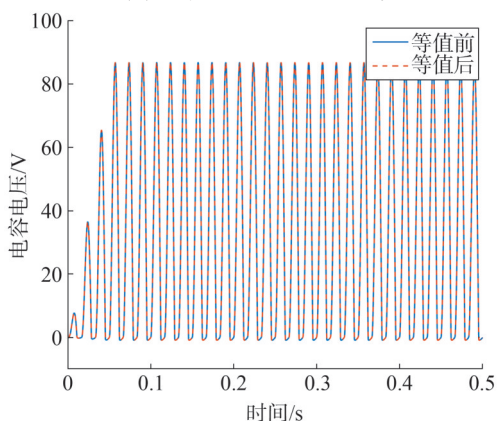
根据子模块开关组不同的导通状态,仿真储能型 MMC 不同工况下的电气特性。

仿真 1:针对储能型 MMC 充电与放电状态进行仿真,分别测量等值前与等值后流经子模块的电流

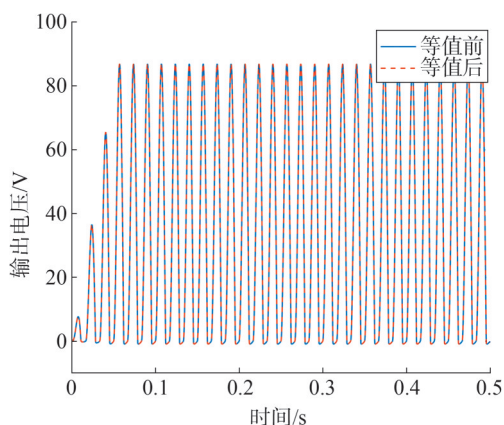
I_c 与跨子模块电容的电压 V_c 以及端电压。仿真结果如图 17 所示。



(a) 子模块投入电流波形



(b) 子模块投入电容电压波形



(c)子模块投入输出电压波形

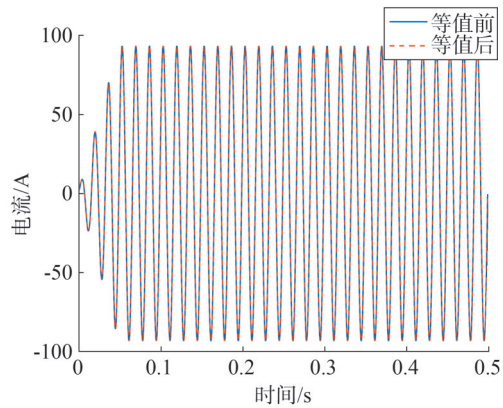
图 17 储能型 MMC 半桥子模块投入状态

Fig.17 The insertion states of the MMC-ESS half-bridge submodule

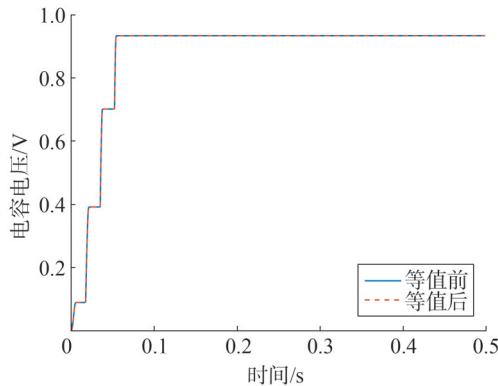
由图 17 可以看出,储能型 MMC 在充放电工作状态下,即上 IGBT 的触发信号为 1、下 IGBT 的触发信号为 0 时。子模块电容电压与子模块输出电压波

形一致,两者均为正值,且总是先增大后减小符合电容充放电特性,与理论分析相符,同时等值前后电气特性高度相似。可以证明本文等值方案的正确性与精确性。

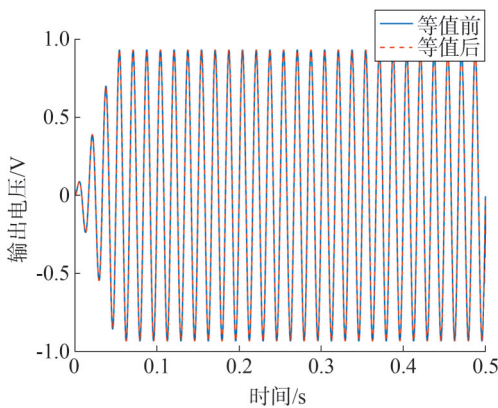
仿真2:针对储能型MMC切除状态进行仿真,分别测量等值前与等值后流经子模块的电流 I_c 与跨子模块电容的电压 V_c 以及端电压。仿真结果如图18所示。



(a)子模块切除电流波形



(b)子模块切除电容电压波形



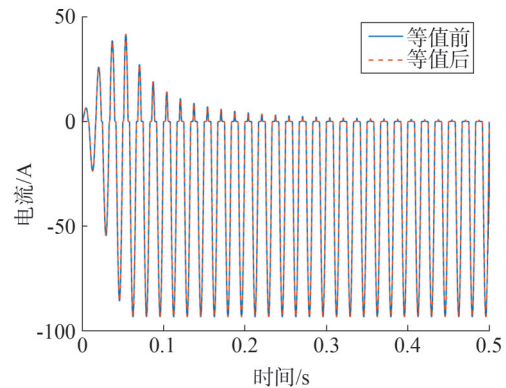
(c)子模块切除输出电压波形

图18 储能型MMC半桥子模块切除状态

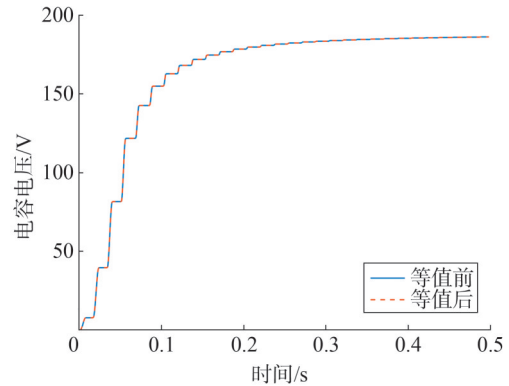
Fig.18 The disconnected states of the MMC-ESS half-bridge submodule

由图18可以看出当上IGBT的触发信号为0、下IGBT的触发信号为1时,子模块电容电压近乎为0,子模块输出电压也近乎为0,子模块电流为标准正弦波,与理论分析相符,同时等值前后电气特性高度相似。可以证明本文等值方案的正确性与精确性。

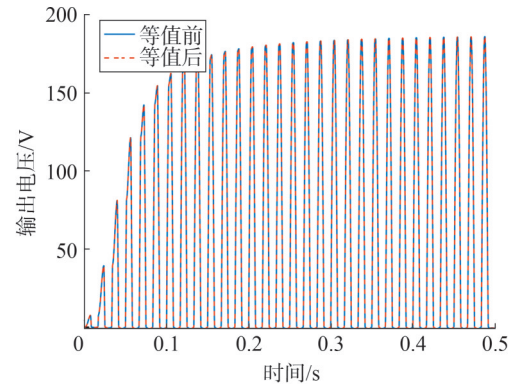
仿真3:针对储能型MMC闭锁(旁路)状态进行仿真,分别测量等值前与等值后流经子模块的电流 I_c 与跨子模块电容的电压 V_c 以及端电压。仿真结果如图19所示。



(a)子模块闭锁电流波形



(b)子模块闭锁电容电压波形



(c)子模块闭锁输出电压波形

图19 储能型MMC半桥子模块闭锁状态

Fig.19 The blocking states of the MMC-ESS half-bridge submodule

由图 19 看出当 IGBT 的触发信号为 0 时,当交流电流流过时,在电流为正下 D_1 导通使电容充电电容电压经过一段时间升为固定值,子模块电流为正时输出电压为电容电压,子模块电流为负时输出电压为 0,与理论分析相符,同时等值前后电气特性高度相似。可以证明本文等值方案的正确性与精确性。

根据本文 2.3 节提出,考虑储能系统通过 DC/DC 变换器接入子模块的储能型 MMC 等值方法,在仿真验证时将其与储能系统直接与子模块电容并联、未经等值的储能型 MMC 这 3 种状态下储能型 MMC 的求解速度进行了比较,如表 3 所示,可以看出所提出的等值方案与传统方案仿真速度相当,且远远快于未经等值的储能型 MMC。

表 3 仿真时长对比

Table 3 Comparisons of simulation time 单位:ms

| 等值方案 | 仿真时长 |
|------------|------------|
| 未进行等值 | 21 184 203 |
| 使用传统方法等值 | 116 250 |
| 使用本文所提方法等值 | 144 547 |

综上,根据本文 2.3 节搭建的储能型 MMC 电磁暂态仿真等效模型与详细器件模型在多种电气特性上具有高度相似性,足以验证本文所提等值方案的正确性,同时在仿真速度与传统等值方法相当,比未经等值的储能型 MMC 速度快,更符合工程实际的同时不会降低仿真速度。

4 结束语

通过深入研究储能型 MMC 子模块等值方法及储能系统接入子模块方式,最终通过梯形积分离散子模块电容,根据开关组不同的导通情况,计算戴维南等值电路的等效电源电压与等效电阻阻值,具有较强的实用性和创新性。

通过仿真,验证了基于梯形积分法与戴维南等值的储能型 MMC 子模块模型具备仿真真实储能型 MMC 子模块的能力,将原本具有非线性复杂度的储能型 MMC 等效为具有线性复杂度的等值模型,大大减少了仿真计算量,便于工程实际应用。

参考文献

- [1] 和萍,刘鑫,宫智杰,等.高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J].电力系统保护与控制,2024,52(18):112-122.
HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [2] 郑圣,谭书平,张清周,等.基于负荷场景多层聚类的储能精细化规划研究[J].浙江电力,2024,43(2):79-87.
ZHENG Sheng, TAN Shuping, ZHANG Qingzhou, et al. Research on refined energy storage planning based on multi-layer clustering of load scenarios [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 79-87.
- [3] 张志一,窦震海,于润泽,等.考虑电-热等效虚拟储能的综合能源系统低碳经济调度[J].电力建设,2024,45(3):16-26.
ZHANG Zhiyi, DOU Zhenhai, YU Runze, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering electric-thermal equivalent virtual energy storage [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3): 16-26.
- [4] 李建林,康靖悦,辛迪熙.新型电力系统储能技术应用研究[J].分布式能源,2024,9(6):1-8.
LI Jianlin, KANG Jingyue, XIN Dixi. Application research of new power system energy storage technology [J]. Distributed Energy, 2024, 9(6): 1-8.
- [5] 陈亚爱,林演康,周京华.用于微电网的储能变流器控制策略综述[J].电气传动,2021,51(21):3-13.
CHEN Yaai, LIN Yankang, ZHOU Jinghua. Review of power conversion system control strategies for microgrid [J]. Electric Drive, 2021, 51(21): 3-13.
- [6] 杨贺雅.模块化多电平换流器拓扑构造及控制方法研究[D].浙江大学,2020.
- [7] 闫昊.构网型储能变流器控制策略研究[D].北京:北方工业大学,2023.
- [8] 李建林,丁子洋,刘海涛,等.构网型储能变流器及控制策略研究[J].发电技术,2022,43(5):679-686.
LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies [J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [9] 周京华,李津.构网型储能变流器国内外技术标准对比与分析[J/OL].电力系统自动化,2024:1-22 [2025-01-02].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20240927.0922.002.html.
ZHOU Jinghua, LI Jin. Comparison and analysis of domestic and international technical standards for grid-forming energy storage conversion system [J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2024: 1-22 [2025-01-02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.tp.20240927.0922.002.html.
- [10] Debdeep S, Tanmoy B. A reliable scheme for full-range of reduced

- DC-Link voltage operation of hybrid MMC with zero voltage ride through[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2025, 40(1), 558-569.
- [11] STEFAN M, MIN L, DRAŽN D. Virtual capacitor concept for computationally efficient and flexible real-time MMC model[J]. IEEE Access, 2021 9, 144211-144226.
- [12] 李亚楼,孙谦浩,孟经纬,等.多样性子模块混合型MMC统一外特性高效电磁暂态模型[J].电力系统自动化, 2020, 44(5): 138-145.
- LI Yalou, SUN Qianhao, MENG Jingwei, et al. Unified terminal and highly efficient electromagnetic transient model of hybrid modular multilevel converter with various sub-modules[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 138-145.
- [13] 陈国平,李明节,董昱,等.构建新型电力系统仿真体系研究[J].中国电机工程学报, 2023, 43(17):6535-6550.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, DONG Yu, et al. Research on the simulation technology architecture for the new-type power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6535-6550.
- [14] 李楠.储能型模块化多电平变换器控制方法研究[D].济南:山东大学, 2018.
- [15] 国网福建省电力有限公司. MMC型电池储能精细化等效建模方法: CN202211404258.9[P]. 2023-05-02.
- [16] 华北电力大学, 南方电网科学研究院有限责任公司. 一种超级电容储能型MMC的多工况电磁暂态等效建模方法: CN2023 11206650.7[P]. 2023-12-12.
- [17] SHANG B R, LIN N, DINAHAHI V. Detailed nonlinear modeling and high-fidelity parallel simulation of MMC with embedded energy storage for wind farm grid integration [J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2024, 11: 196-206.
- [18] 张泽,赵西贝,赵成勇. 储能变流器主导构网的大规模光伏经LCC送出方案[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-14 [2025-01-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.241512>.
- ZHANG Ze, ZHAO Xibei, ZHAO Chengyong. Scheme of large-scale photovoltaic transmission via LCC dominated by grid-forming power conversion system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-14 [2025-01-02]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.241512>.
- [19] 付乐融,冯谟可,许建中. 超级电容储能型MMC多工况电磁暂态等值建模方法[J/OL]. 电力系统自动化, 2024: 1-13 [2025-01-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240607.1039.008.html>.
- FU Lerong, FENG Moke, XU Jianzhong. Electromagnetic transient equivalent modeling method for modular multilevel converter with supercapacitor energy storage system under multiple operation conditions [J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2024: 1-13 [2025-01-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240607.1039.008.html>.
- [20] ZHOU Z P, DAI N Y. Enhancing simulation precision of modular multilevel converters through hardware-informed digital twin [C]// 2024 CPSS & IEEE International Symposium on Energy Storage and Conversion (ISESC). IEEE, 2024: 1120-1124.
- [21] CHAVHAN S, MOHALE V, KUMBHAR M. A review of recent advancements and challenges in battery energy storage system (BESS) [C]// 2024 1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and Smart Systems (ISTEMS). IEEE, 2024: 1-6.
- [22] 杨继鑫,王久和,王勉,等. 基于无源控制的光储直流微网虚拟惯性控制策略研究[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 576-584.
- YANG Jixin, WANG Jiuhe, WANG Mian, et al. Research on virtual inertial control strategy of DC microgrid with photovoltaic and storage system based on passivity-based control [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 576-584.
- [23] SHILIN G, YING C, YANKAN S, et al. An efficient half-bridge MMC model for EMT-type simulation based on hybrid numerical integration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1), 1162-1177.
- [24] 连攀杰,刘文焯,杨泽栋,等. 混合型MMC全状态高效电磁暂态仿真方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8520-8530.
- LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, YANG Zedong, et al. Research on hybrid MMC full-state efficient electromagnetic transient simulation method [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8520-8530.
- [25] 徐绪海,朱方生. 刚性微分方程的数值方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997.
- [26] 杨明,张永明,张子骞,等. 电力系统电磁暂态仿真算法研究综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(8): 10-19.
- YANG Ming, ZHANG Yongming, ZHANG Ziqian, et al. Review on electromagnetic transient simulation algorithm of power system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8): 10-19.
- [27] 南方电网调峰调频(佛山)储能科技有限公司, 南方电网调峰调频(广东)储能科技有限公司. 基于梯形积分与戴维南等效的储能型变流器等值方法: CN202410963595.4[P]. 2024-09-10.

收稿日期: 2025-01-02

修回日期: 2025-03-17

作者简介:

汪志强(1969),男,教授级高级工程师,从事电化学储能工作;

刘邦金(1987),男,高级工程师,从事电化学储能工作;

吴 斌(1992),男,工程师,从事电化学储能工作;

张 敏(1995),男,工程师,从事电化学储能工作。

张乃文(2003),通信作者(1052556087@qq.com),男,主要研究方向为新能源并网稳定性分析及控制。

(责任编辑 姜婷婷)



《山东电力技术》编辑部全体人员恭祝广大读者

新年快乐 万事如意 阖家幸福



关注《山东电力技术》