中国科技核心期刊

ISSN 1007-9904 CN 37-1258/TM





国网山东省电力公司主办

**2025.4** 第52卷 2025年4月



山东电力技术

### 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 波兰 ICI Journals Master List 数据库收录期刊 美国《乌利希期刊指南》收录期刊 瑞典开放获取期刊目录(DOAJ)收录期刊

# 山东电力技术

SHANDONG DIANLI JISHU

(月刊)

1974年创刊 2025年第4期 第52卷(总第329期) 2025年4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 话: (0531) 67982997 电 电子信箱: sddljs @ sina.com 址: sddljs.cbpt.cnki.net XX 印 刷: 济南浪宇印刷有限公司 发 行:公开发行 自办征订 价: 18.00 元 / 册 定

# 《山东电力技术》编辑委员会

顾	问:	陈维	江	郑廷	华	侯保	、荣	雷清	家	王成	ĿЦ
主	任:	孙	岗								
副 主	任:	王伟	胜	吴文	で传	刘玉	田	陈志	勇	梁作	宾
		田	健								
委	员:	(按	姓氏	笔画	ī为序	;)					
		1	磊	1	勇	Ŧ	波	王廷	东	孙	波
		孙树	鲥敏	严志	国	苏	洲	吴利	休	赵艳	i雷
		姜雨	j泽	郭	锐	彭道	团	董	泽	程新	访
青年编	委主	任委	员:	姚	伟	李正	烁				
青年委	员:	(按	姓氏	笔画	i为序	;)					
青年委	员:	(按 丁	姓氏 涛	:笔画 王士	i为序 ::柏	;) 王中	ī冠	王	彬	巨云	涛
青年委	员:	<ul><li>(按</li><li>丁</li><li>牛</li></ul>		笔画 王士 刘昉	i为序 ::柏 ::明	*) 王中 许	ī冠 寅	王	彬	巨云 李知	;涛  艺
青年委	员:	<ul><li>(按</li><li>丁</li><li>牛</li><li>杨</li></ul>	.姓氏 涛 涛 越	<ol> <li>笔画</li> <li>王士</li> <li>刘 時</li> <li>沈 形</li> </ol>	i为序 ::柏 : 昭 ( ( ( ( ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) ( ) (	<sup>;</sup> ) 王中 许 陈思	冠寅捷	王 李志 郑伟	彬	巨云 李知 钟海	涛旺
青年委	员:	<ul><li>(按</li><li>丁</li><li>牛</li><li>杨</li><li>高</li></ul>	姓涛涛越 嵩氏	笔 王 刘 沈 常 響	i为 r 拍 明 床 月	;) 王中 许 陈思 薛屹	冠寅捷洵	王 李志 郑伟	彬刚	巨云 李知 钟海	涛 I艺 I旺
青年委	员:	( 丁 牛 杨 高	姓涛涛越 嵩氏	笔 王 刘 沈 常電 士 晓 劤 薯	i为 柏 昭 年 月	;) 王 许 陈 薛 屹	冠寅捷洵	王 李志 郑伟	彬 刚	巨云 李知 钟海	涛
青年委主	员:	<ol> <li>( 丁 牛 杨 高 吴文</li> </ol>	姓涛涛越嵩 传	笔 王 刘 沈 常 孟 田 北 晓 形 曜	i为 柏 明 炜 月   瑜	;) 王中 许 陈 薛 屹	冠寅捷洵	王 李志 郑伟	彬刚	巨云 李知 钟海	涛 艺 旺
青年委 主 执行主	员: 编::	(丁牛杨高 吴马文)	姓涛涛越嵩 传艳氏	笔 王 刘 沈 常 孟 一 武 於 聲	i为 柏 明 炜 月   瑜	;) 王中 许 陈 薛 屹	冠 寅 捷 洵	王 李志 郑伟	彬 刚	巨云 李知 钟海	涛 艺 旺

编 辑:郑天茹 娄婷婷 张丹丹 车永强

中国标准连续出版物号: ISSN 1007-9904

CN 37-1258/TM

期刊基本参数: CN 37-1258/TM\*1974\*m\*A4\*96\*zh\*P\* ¥18.00\*8000\*10\*2025-4\*n

# 



~告

持约专栏主编简介



**付文龙**,博士,三峡大学副教授,博导。IEEE 中国可再生能源建模技术分委会理事。主要 研究方向为新能源发电预测、发电设备状态监测与故障诊断、电力系统建模、人工智能应用等。 获中国大坝工程学会科技进步二等奖1项、IEEE PES能源发展与发电技术委员会特殊贡献奖1项、 宜昌市自然科学优秀学术论文一等奖2项。入选湖北省"楚天学者计划"楚天学子、三峡大学"三 峡学者",2022~2024 年连续三年入选斯坦福大学"全球前2%顶尖科学家"榜单。主持国家 自然科学基金、省级重点实验室开放基金等研究课题5项。已发表 SCI/EI 检索论文70余篇(含 ESI 热点论文1篇、高被引论文10篇),授权发明专利5项,申请发明专利23项,出版学术 专著1部。《水电与新能源》期刊青年编委及两个 SCI 期刊客座主编。



任岩,博士(后),华北水利水电大学智慧能源研究中心主任,教授,硕士生导师。IEEE PES 能源与发电技术委员会(中国)水力发电技术分委会常务理事,中国电力教育协会能源动 力学科教学委员会委员,中国机械工业教育协会动力机械工程专业委员会(第四届)委员。河 南省青年骨干教师,河南省教学标兵。主要研究方向为新能源发电与抽水蓄能、多能互补技术、 状态监测与故障诊断等。获大禹水利科学技术二等奖和全国高校青年教师教学竞赛(河南赛区) 一等奖等科研和教学奖励 20 余项。主持和参与国家和省部级科研项目等 30 余项,发表 SCI/EI 检索论文 20 余篇,出版专著4部,参编教材10部,授权专利10余项。《Applied Energy》《Energy Conversion and Management》《Energy》等 TOP 期刊审稿人,《Energies》期刊客座编辑。



**吴月超**,博士(后),高级工程师,中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司机电工程院 (华辰电控)智慧能源事业一部主任。主要研究方向为设备健康评估与故障诊断、综合能源集中 控制与优化调度等。先后主持省级项目或企业课题 10 余项。研究与开发成果获华东院科技成果特 等奖 1 项,中国电建科学技术奖一等奖 1 项,电力行业四优奖 1 项,其它省部级奖励 3 项,市局 级奖励 10 余项,发表论文 10 余篇,授权发明专利 5 项。

#### 特约主编寄语

随着"双碳"战略的深入推进,以光伏和风电为代表的可再生能源装机规模持续扩大,新能源 正逐步成为电力系统的重要组成部分,并加速推动能源结构的重大转型。然而,新能源发电的强间 歇性、波动性及随机性给电网的优化调度、运行控制及安全稳定性带来了严峻挑战。因此,如何有 效提升新能源发电系统的优化调控能力,构建更加智能、高效且稳定的运行机制,保障电网安全稳 定运行,已成为当前电力领域亟待解决的关键问题。这不仅是新型电力系统构建的关键环节,也对 推动能源结构向绿色低碳方向转型具有重要意义。在此背景下,《山东电力技术》设立"新能源发 电系统优化调控与智能运维"专栏,旨在推动新能源电力系统的理论创新与工程应用。本专栏重点 征集新能源发电系统在预测与优化调度、故障诊断、异常检测及智能运维等关键技术领域的研究成果, 致力于为新能源高效消纳及电网安全运行提供坚实的理论支撑与技术保障。希望通过本专栏搭建学 术交流与技术合作平台,促进相关领域专家学者的深入交流,为新能源电力系统的高效运行、智能

# 目 次

#### 新能源发电系统优化调控与智能运维

计及负荷侧惯量和故障概率的两阶段鲁棒机组组合 ……… 叶 婧,周正坤,何杰辉,郭紫昱,杨子龙(1) 基于时频交叉注意力机制和多域特征融合的风电机组齿轮箱故障诊断研究

基于差分隐私保护的智能电网分布式经济调度方案 ………… 解国庆,梁 添,周兵兵,李鸿伟,付丈龙(20)

配电网

基于双层优化柔性共享 VDAPF 的配电网谐波治理 ……… 朱岩松,谢振刚,黄志敏,叶梦豆,江友华(29) 含电热综合能源系统的直流配电网分布式优化调度 … 王 岩,李冠冠,邱蕴鹛,李慧鹛,杨 磊,刘学堃(40) 平抑负荷峰谷差的配电网协同控制技术研究 …………………………… 贾东梨,杨晓雨,叶学顺(49)

人工智能

基于改进HPO-ELM 与证据推理规则的变压器状态评估方法

基于神经网络的分布式光伏故障外特性聚合等值建模 ……… 范荣奇,李 宽,王安宁,高 帅,黄 涛(69)

输变电

不同运行年限高压电缆 XLPE 绝缘特性及温度场仿真研究 …… 段玉兵,徐庆文,罗 文,兰 锐,李国侣(81) 具身智能:变电站开关柜自主作业机器人 …………… 潘慧超,王延安,李 鑫,贾昭鑫,王海磊(89)

# SHANDONG ELECTRIC POWER

# CONTENTS

#### •Optimization Control and Intelligent Operation for Renewable Power System •

Two Stage Robust Unit Combination Considering Load Side Inertia and Fault Probability

······ YE Jing,ZHOU Zhengkun,HE Jiehui,GUO Ziyu,YANG Zilong(1)

Research on Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox Based on Time-frequency CrossAttention Mechanism and

Multi-domain Feature Fusion ...... JIA Shuwang, HUANG Hai, LYU Yang, DU Bo, FU Wenlong(11)

Distributed Economic Dispatch Scheme for Smart Grid Based on Differential Privacy Protection

..... XIE Guoqing, LIANG Tian, ZHOU Bingbing, LI Hongwei, FU Wenlong(20)

#### Distribution Network •

Harmonic Mitigation in Distribution Network Based on Dual-level Optimization Flexible Shared Voltage Detection

Distributed Optimization Scheduling of DC Distribution Network with Electric Heating Integrated Energy System

..... WANG Yan, LI Guanguan , DI Yunpeng , LI Huipeng , YANG Lei, LIU Xuekun(40)

Research on Collaborative Control Technology of Distribution Network to Reduce Load Peak-valley Difference

JIA Dongli, YANG Xiaoyu, YE Xueshun(49)

#### Artificial Intelligence

Transformer State Evaluation Method Based on Improved HPO-ELM and Evidential Reasoning Rules

...... CHEN Jiming, TAO Zhixiong, SHEN Zhibin, GAO Hui, SONG Junzhi(58)

• Power Transmission and Transformation •

······ PAN Huichao, WANG Yanan, LI Xin, JIA Zhaoxin, WANG Hailei (89)

# SHANDONG ELECTRIC POWER

(Monthly, Started in 1974)

Administration State Grid Shandong Electric Power Company Sponsor State Grid Shandong Electric Power Company Edited by Editorial Department of Shandong Electric Power Chief Editor WU Wenchuan MENG Yu Address No.2000, Wangyue Road, Jinan, China 250003 第52卷(总第329期)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.001

新能源发电系统优化调控与智能运维

# 计及负荷侧惯量和故障概率的两阶段鲁棒机组组合

叶 婧1\*,周正坤1,何杰辉2,郭紫昱3,杨子龙1

(1.三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002;2.广东电网有限责任公司肇庆供电局,广东 肇庆 526000;3.国网国际发展有限公司,北京 100000)

摘要:随着高比例新能源并网和大量电力电子设备的接入,电力系统呈现出越来越明显的低惯量特性。针对低惯量电力 系统频率安全稳定和经济性难以兼顾的问题,本文建立了计及风电、负荷功率、负荷侧惯量和故障概率不确定性的考虑 动态频率约束的机组组合模型,以此来提高系统的整体惯量水平,并在保证系统频率安全的前提下减少优化计算的保守 性,提高系统总体运行经济性。首先,建立计及负荷侧惯量的多机系统动态频率响应模型,并推导出大扰动下系统的频 率安全指标表达式。其次,建立了故障不确定性模型,并用模糊变量表征风电、负荷、负荷侧惯量的不确定性,建立含动 态频率约束的考虑故障不确定性两阶段鲁棒优化模型,并将模型中的模糊机会约束清晰等价类转换。接着,采用对偶理 论和行列生成(column-and-constraint generation,C&CG)算法对所提模型进行求解。最后,以改进的IEEE 10机 39节点系 统为算例,验证了本文所提模型和求解方法的有效性和优越性。

关键词:机组组合;频率安全;惯量;两阶段鲁棒;故障

中图分类号:TM74 文献标志码:A 文章编号:1007-9904(2025)04-0001-10

### Two Stage Robust Unit Combination Considering Load Side Inertia and Fault Probability

YE Jing<sup>1\*</sup>, ZHOU Zhengkun<sup>1</sup>, HE Jiehui<sup>2</sup>, GUO Ziyu<sup>3</sup>, YANG Zilong<sup>1</sup>

(1.Electrical and New Energy Faculty of China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2.Zhaoqing Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhaoqing 526000, China;
3.State Grid International Development Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: With the high proportion integration of renewable energy and the access of a large number of power electronic devices, the power system exhibits an increasingly obvious low-inertia characteristic. Aiming at the problem that it is difficult to balance the frequency security, stability and economy of the low-inertia power system, this study establishes a unit commitment model considering dynamic frequency constraints, taking into account the uncertainties of wind power, load power, load-side inertia and fault probability. This is to improve the overall inertia level of the system, reduce the conservatism of the optimization calculation while ensuring the system frequency security, and improve the overall operational economy of the system. First, a multi- machine system dynamic frequency response model considering load-side inertia is established, and the expression of the system's frequency safety index under large disturbances is derived. Secondly, a fault uncertainty model is established. The uncertainties of wind power, load and load-side inertia are characterized by fuzzy variables. A two-stage robust optimization model considering fault uncertainty with dynamic frequency constraints is established, and the fuzzy chance constraints in the model are clearly and equivalently transformed. Then, the dual theory and the column-and-constraint generation (C&CG) algorithm are used to solve the proposed model. Finally, taking the improved IEEE 10-machine 39-bus system as an example, the effectiveness and superiority of the proposed model and solution method are verified.

Keywords: unit commitment; frequency security; inertia; two-stage robustness; fault

**基金项目:**国家自然科学基金项目(62233006);新型电力系统运行与控制全国重点实验室资助课题(SKLD23KM18)。 National Natural Science Foundation of China(62233006);National Key Laboratory of New Power System Operation and Control (SKLD23KM18).

#### 0 引言

为实现"双碳"目标,目前全球正处于低碳化转 型深入推进阶段<sup>[1]</sup>。随着新能源机组在系统中的占 比逐渐升高,系统惯性下降,当系统出现扰动时无法 提供相应的惯量支撑和调频能力<sup>[2]</sup>。因此,在系统 调度方案中加入动态频率安全约束的机组组合 (security constrained unit commitment, SCUC)成为当 下研究的热点<sup>[3-7]</sup>,通过合理安排机组开停机来保证 系统在扰动下能维持频率指标在安全范围内。但上 述文献仅将电源侧的惯量纳入频率动态响应模型, 忽略了负荷侧惯量的影响,导致调度结果过于保守, 经济性差。

随着新能源机组在系统中的占比逐渐升高,仅 考虑传统机组的惯量将大幅降低系统抵御安全事故 的能力,因此亟须深入挖掘负荷侧惯量。文献[8]通 过多项式近似拟合实测了频率暂态波形,由于忽略 了负荷侧惯量的影响,导致计算出的系统惯量常数 小于实际值。文献[9]提出了一种基于差值计算法 的系统分区惯量评估方法,结论指明当负荷侧存在 感应电机负荷时,其估算出的总体惯量要大于同步 机组惯量之和。文献[10]通过对历史的频率安全事 故进行分析,量化了负荷侧惯量的具体值,其结论表 明在英国电力系统中约有20%的惯量来自负荷侧, 其平均惯性时间常数为1.75 s。上述文献表明负荷 侧惯量在系统频率稳定中起到了一定作用。低惯量 电力系统中有必要计及负荷侧惯量的影响。文献 [11]提出一种基于人工神经网络的惯量预测方法, 通过相量测量单元得到的电力系统海量运行数据来 预测系统惯量。文献[12]基于人工神经网络开发了 预测电力系统惯量工具,通过广域测量管理系统量 测数据训练预测模型。文献[13]基于某电网数据, 提出一种基于主成分分析-普通最小二乘法的系统 等效惯量中长期预测模型,其预测准确率可达99% 以上。通过上述文献可知,目前已经有学者实现了 对负荷侧惯量的精准预测,因此在研究考虑频率安 全的机组组合问题中可以计及负荷侧惯量带来的影 响,以提高调度经济性和准确性。

此外,近年来偶发故障引起的大停电事故愈加 频繁,对电网安全可靠运行造成威胁,通常情况下机 组组合所制定的调度方案需要通过 N - 1 安全校核 才能实施。文献[14]提出了一种考虑 N - 1 故障的 机组组合问题,并提出了一种相关的约束削减方法, 大幅缩减了机组组合问题的规模以及求解时间,但 在该模型中未考虑不同机组的故障概率;文献[15] 提出了一种考虑 N - k 故障的两阶段鲁棒机组组合 优化模型,通过改变机组故障数量 k,将不同容量机 组的停运概率考虑到调度决策中,但未将频率安全 约束考虑进去。以往研究频率安全问题时,机组故 障均是指定以最大容量机组退出运行,且计算动态 频率时并未考虑该机组退出对频率响应的影响。在 实际研究中机组偶发故障具有不确定性,系统内运 行的机组均有退出运行的可能性,仅考虑最大容量 机组退出运行容易导致优化结果过于保守。

针对目前 SCUC 忽视负荷侧惯量且不考虑机组 故障概率,导致优化结果过于保守的问题,本文建立 了计及故障概率和负荷侧惯量的 SCUC 模型。首 先,通过含负荷侧惯量的频率响应模型推导出时域 下的频率安全指标。其次,构建了 N-1 故障不确 定集模型,在计及机组故障不确定性下进行机组故 障 N-1安全校核。在此基础上,建立了基于模糊 机会约束的两阶段鲁棒机组组合模型,将模糊机会 约束的不确定性问题采用梯形模糊参数清晰等价类 转化,并采用对偶理论将鲁棒内层问题合并为 max 问题,结合外层 min 问题,使用行列生成(columnand-constraint generation, C&CG)算法进行迭代求 解。最后,通过算例仿真对模型和方法的有效性进 行了分析,结果表明本文所提出的模型和方法能在 保证电力系统频率安全的前提下提高系统经济性。

#### 1 含负荷侧惯量的动态频率响应模型

惯性是物体保持运动状态不变的属性,在电力 系统发生扰动瞬间,发电机依靠转子惯性维持原有 转速,为系统提供功率支撑,以抑制频率快速变化。 因此电力系统的惯性水平与系统频率安全息息相 关。目前现有的研究中,往往仅考虑电源侧惯量,而 忽视了负荷侧惯量,使得模型过于保守,经济性偏 差,本文将系统等效惯量定义为电源侧惯量与负荷 侧惯量的和,在文献[16]的基础上,建立含负荷侧惯 量的动态频率响应模型,如图1所示。

2



图 1 含负荷侧惯量的频率动态响应模型 Fig.1 Dynamic frequency response model including load-side inertia

由图1可知,受扰动后系统动态频率偏差为

$$2H\frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t} = \sum_{i=1}^{N} \Delta P_{\mathrm{G}i}(t) - \Delta P_{\mathrm{L}} - D\Delta\omega \qquad (1)$$

式中:H为系统等效惯量, $H = H_{c} + H_{L}, H_{c}$ 为火电机 组惯量, $H_{L}$ 为负荷侧惯量;D为阻尼系数; $\Delta \omega$ 为系统 频率偏差; $\Delta P_{Gi}(t)$ 为第i台机组在t时刻的调频出 力; $\Delta P_{L}$ 为功率缺额;N为系统中机组总个数。

通过对上述模型的推导,可得到扰动后系统频 率最低点。

$$t_{\text{nadir}} = \frac{2H}{\sum_{i=1}^{N} C_{i}}$$
(2)

$$f_{\text{nadir}} = f_0 - f_B \frac{\Delta P_L}{2\sum_{i=1}^N C_i}$$
(3)

$$C_{i} = U_{i}K_{i}\left[1 - \frac{T_{i}}{t_{\text{nadir}}}\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{adir}}}{T_{i}}}\right)\right]$$
(4)

式中: *f*<sub>nadir</sub> 为频率最低点; *f*<sub>0</sub> 为额定频率; *f*<sub>B</sub> 为系统基 准频率; *t*<sub>nadir</sub> 为频率最低点所对应的时间; *K*<sub>i</sub> 为第*i* 台 机组的单位功率调节系数; *T*<sub>i</sub> 为第*i* 台机组的惯性响 应时间常数; *U*<sub>i</sub> 为 0-1 变量, 表示第*i* 台机组的启停 状态, 取值为 0 时表示关机, 取值为 1 时表示开机。

频率最大变化率为

$$R_{\rm max} = \frac{\mathrm{d}\Delta\omega}{\mathrm{d}t} \bigg|_{t=0^{\circ}} = \frac{\Delta P_{\rm L} f_{\rm B}}{2H}$$
(5)

#### 2 N-1故障不确定模型

近年来,由偶发故障引发的全球大停电事故愈 加频繁,因此研究机组偶发故障对系统稳定运行的 影响具有重要意义。而机组故障往往具有不确定 性,且不同机组的故障概率不一致,通常情况下,机 组容量越大越可靠,传统研究通常以最大机组退出 运行的极限预想故障为扰动进行分析,往往使得优 化调度的结果过于保守,实用参考价值差。此外,机 组故障的概率难以准确估计,不同机组故障的概率具 有不确定性,在研究机组偶发故障 N-1安全校核过 程中应计及机组故障不确定性的影响,建立 N-1故 障不确定集。该模型的引入能够降低调度方案的保 守性,为调度人员提供指导依据。在本文中,定义 N-1故障不确定模型中的 N 为火电机组数量。

参照文献[15]采用 N-1不确定集来表述机组 故障不确定因素,当默认所有机组故障概率相同时, 其不确定性集合可表示为

$$Z = \left\{ \sum_{i=1}^{N} A_{ii} \ge N - 1, A_{ii} \in \{0, 1\}, \forall t \right\}$$
(6)

式中:A<sub>u</sub>为第*i*台机组在*t*时刻是否发生故障,故障 取 0,反之取 1。

在实际电力系统中,不同容量或类型的机组发 生停运事故的概率是不同的,一般而言,容量越大,机 组运行可靠性越高,且机组故障概率难以准确估计, 往往具有不确定性。机组停运事故概率可表示为

$$P_{ii} = \frac{M_{\text{TR}i}}{M_{\text{TF}i} + M_{\text{TR}i}} \tag{7}$$

式中:P<sub>ii</sub>为第*i*台机组*t*时刻所发生故障的概率;M<sub>TFi</sub>为第*i*台机组的故障时间;M<sub>TFi</sub>为第*i*台机组发生故障后的修复时间。

由于机组故障概率中涉及的 M<sub>TRi</sub>和 M<sub>TFi</sub> 难以准确估计,因此可通过对其平均故障时间 T<sub>MTTFi</sub> 和平均修复时间 T<sub>MTTFi</sub> 进行抽样以表征其不确定性。M<sub>TRi</sub>和 M<sub>TFi</sub> 一般情况下服从指数分布,利用蒙特卡洛场景生成的方法对其进行抽样<sup>[17]</sup>。

$$M_{\rm TRi} = -T_{\rm MTTRi} \cdot \ln \gamma_{\rm MTTR} \tag{8}$$

$$M_{\rm TFi} = -T_{\rm MTTFi} \cdot \ln \gamma_{\rm MTTF} \tag{9}$$

式中: $\gamma_{\text{MTTR}}$ 和  $\gamma_{\text{MTTF}}$ 为(0,1)区间内均匀分布的随机数。

通过采用β准则,并在不确定集合中加入机组 停运突发事件的概率信息,可以降低鲁棒优化方法 的保守性。采用β准则生成的最坏情况仅包括概率 大于给定β阈值的情况,受约束的β准则可表示为

$$\prod_{i=1}^{N} P_{ii}^{(1-A_{i})} \prod_{i=1}^{N} (1-P_{ii})^{A_{i}} \ge \beta$$
(10)

式中: β为故障概率阈值, 本文设为 10-2[15]。

由于式(10)是非线性表达式,无法直接用于两 阶段鲁棒机组组合的求解,取其两边对数转化为线 性表达式。

$$\sum_{i=1}^{N} (1 - A_{ii}) \lg P_{ii} + \sum_{i=1}^{N} A_{ii} \lg (1 - P_{ii}) \ge \lg \beta \quad (11)$$

#### 3 基于模糊机会约束的两阶段鲁棒机组组 合模型

#### 3.1 模型建立

为保障风电并网后频率不发生越限和可靠经济 运行,本文建立了计及负荷侧惯量和故障概率的两 阶段鲁棒机组组合模型。在第一阶段模型中,以经 济最优为原则,制定火电机组启停状态。在第二阶 段模型中,以第一阶段所得出的机组组合结果为基 础,用模糊变量表征风电、负荷、负荷侧惯量的不确 定性,并将其清晰等价类转换为确定性约束,以机组 偶发故障不确定性带来的功率缺额扰动进行动态频 率约束 N - 1 安全校验,在机组偶发故障最恶劣场 景下寻优,优化机组偶发故障后的出力和惯量响应 能力,确定满足动态频率约束的优化调度方案。

3.1.1 目标函数

所建立的机组组合模型目标函数包括常规机组的发电成本、启停成本以及风电的弃风惩罚成本<sup>[18]</sup>。

$$\min_{U_{u}} \sum_{i=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} \begin{bmatrix} U_{i,i} (1 - U_{i,i-1}) S_{U,ii} + \\ U_{i,i-1} (1 - U_{i,i}) S_{D,ii} \end{bmatrix} + \max Q \quad (12)$$

$$Q = \min \sum_{t=1}^{T} \left( \sum_{i=1}^{N} f(P_{\text{G}i,t}) y_{i,t} + (P_{\text{w}t}^{\text{re}} - P_{\text{w}t}) q_{\text{w}} \right) \quad (13)$$

$$f(P_{Gi,t}) = a_i + b_i P_{Gi,t} + c_i P_{Gi,t}^2$$
(14)

式中: $U_{i,i}$ 为第i台机组在t时刻的启停状态,取值为 1时表示开机,取值为0时表示停机; $a_i, b_i, c_i$ 为第i台机组二次成本函数的系数; $P_{wi}$ 为风电机组在t时 刻的输出功率; $q_w$ 为弃风惩罚系数; $P_{wi}^{e}$ 为风电功率 在t时刻的预测值;T为研究的调度周期; $S_{0,a}, S_{0,a}$ 分 别为第i台机组在t时刻的启停成本; $y_{i,i}$ 为第i台机 组在t时刻的运行状态,为0-1变量,取值为1时表 示机组处于运行状态,取值为0时表示机组未运行;  $P_{Git}$ 为第i台机组在t时刻的出力。

3.1.2 第一阶段约束

1)机组启停运行状态约束。

$$y_{i,t} - y_{i,t-1} - U_{i,t} \le 0 \tag{15}$$

$$y_{i,t-1} - y_{i,t} - (1 - U_{i,t}) \le 0$$
(16)

2)最小启停时间约束。

$$(y_{i,t+1} - y_{i,t})T_i^{\text{on}} - \sum_{t+2}^{\min\{t+T_i^{-},T\}} y_{i,t} \leq \max\{1, T_i^{\text{on}} - T + t - 1\}$$
 (17)

$$\left(y_{i,t} - y_{i,t+1}\right)T_i^{\text{off}} - \sum_{t+2}^{\min\{t+T_i^{\text{off}},T\}} y_{i,t} \leq T_i^{\text{off}}$$
(18)

式中: T<sub>i</sub><sup>on</sup>、T<sub>i</sub><sup>off</sup>分别为第 i 台机组的最小连续启动时间和停机时间。

3.1.3 第二阶段约束

1)功率平衡约束<sup>[19]</sup>。

$$\operatorname{Cr}\left\{\sum_{i=1}^{N} P_{Gi,i} + P_{wi} = P_{Li}\right\} \ge \alpha \tag{19}$$

式中: $\alpha$ 为置信水平;Cr{·}为事件发生概率的函数;  $P_{\mu}$ 为t时刻的负荷需求。

2)旋转备用约束。

$$\operatorname{Cr}\left\{P_{Lt} - P_{wt} - \sum_{i=1}^{N} y_{i,t} P_{Gi}^{\max} \leq 0\right\} \geq \alpha \qquad (20)$$

式中:P<sub>Gi</sub><sup>max</sup>为第i台机组的出力上限。

3)火电机组出力约束。

$$A_{i\iota} \gamma_{i,\iota} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi,\iota} \leq A_{i\iota} \gamma_{i,\iota} P_{Gi}^{\max}$$
(21)

式中:P<sub>Gi</sub> 为第i台机组的出力下限。

4)风电机组出力约束。

$$0 \le P_{wt} \le P_{wt}^{re} \tag{22}$$

5)爬坡/滑坡速率约束。

$$\begin{cases} \Delta P_{i}^{\text{up}} y_{i,t-1} + P_{G,i}^{\text{max}} (1 - y_{i,t-1}) \ge P_{G,t} - P_{G,t-1} \\ \Delta P_{i}^{\text{down}} y_{i,t} + P_{G,i}^{\text{max}} (1 - y_{i,t}) \ge P_{G,t-1} - P_{G,t} \end{cases}$$
(23)

式中: $\Delta P_i^{\text{up}}$ 为第i台机组的上爬坡限制; $\Delta P_i^{\text{down}}$ 为第i台机组的下爬坡限制。

6)故障机组功率缺额约束。

$$\Delta P_{\rm Lm} = \sum_{i=1}^{N} (1 - A_{ii}) y_{i,i} P_{Gi}^{\rm max}$$
(24)

式中:ΔP<sub>Lm</sub>为故障机组的功率缺额。

7) 动态频率约束。

各台机组的调节能力为

$$\sum_{i=1}^{N} C_{i} = \sum_{i=1}^{N} \gamma_{i,i} A_{ii} K_{i} \left[ 1 - \frac{T_{i}}{t_{\text{nadir}}} \left( 1 - e^{-\frac{t_{\text{obs}}}{T_{i}}} \right) \right]$$
(25)

当机组发生故障时退出运行,因此故障机组无 法提供调频能力和惯量支撑能力。

$$H_{\rm sys,t} = \frac{\sum_{i=1}^{N} (H_{\rm Gi} y_{i,t} S_{\rm Gi}) + H_{\rm L} S_{\rm L} - H_{\rm K} S_{\rm K}}{S_{\rm sys}}$$
(26)

式中: $H_{syst}$ 为系统在t时刻的惯性时间常数; $H_{Gi}$ 为第

*i* 台机组的惯性时间常数;*S<sub>Gi</sub>*为第*i* 台机组的额定功 率;*H<sub>L</sub>*为负荷侧惯性时间常数;*S<sub>L</sub>*为负荷侧的额定 容量;*H<sub>K</sub>*为故障机组惯性时间常数;*S<sub>K</sub>*为故障机组 的额定容量;*S<sub>sys</sub>*为系统总的额定容量。

8)频率最低点约束。

$$\operatorname{Cr}\left\{f_{\operatorname{nadir},t} \ge f_{\min}\right\} \ge \alpha$$
 (27)

式中:fmin 为频率最低点限值。

9)频率变化率约束。

$$\operatorname{Cr}\left\{\left|R_{t}\right| \leq R_{\max}\right\} \geq \alpha$$
 (28)

式中:R<sub>max</sub>为频率变化率限值。

3.2 模型求解

3.2.1 模糊机会约束清晰等价类转换

由于本文考虑了风电出力、负荷功率、负荷侧惯 量的不确定性,并采用含模糊参数的模糊机会约束进 行表示,无法直接应用于两阶段鲁棒优化模型求解。 因此本文采用清晰等价类转化方法对式(19)一式 (20)和式(27)一式(28)进行转化,具体步骤参见文 献[20]。

清晰等价类转换后的公式如下。

$$(2 - 2\alpha) \left[ P_{1i3} - P_{wi2} \right] - \sum_{i=1}^{N} P_{Gi,i} + (2\alpha - 1) \left[ P_{1i4} - P_{wi1} \right] = 0$$
(29)

$$(2 - 2\alpha) \Big[ P_{1i3} - P_{wi2} \Big] + (2\alpha - 1) \Big[ P_{1i4} - P_{wi1} \Big] - \sum_{i=1}^{N} y_{i,i} P_{Gi}^{max} \leq 0$$
(30)

$$(2 - 2\alpha) \left[ -H_{L2} \right] + (2\alpha - 1) \left[ -H_{L1} \right] - H_{G} + \frac{1}{4} f_{B} \cdot \frac{\Delta P_{L}}{f_{0} - f_{\min}} t_{nadir} \leq 0$$
(31)

$$(2 - 2\alpha) \left[ -H_{L2} \right] + (2\alpha - 1) \left[ -H_{L1} \right] - H_{G} + \frac{1}{2} f_{B} \cdot \frac{\Delta P_{L}}{R_{max}} \leq 0$$

$$(32)$$

式中:P<sub>w1</sub>、P<sub>w2</sub>为风电功率的隶属度参数;P<sub>L3</sub>、P<sub>L4</sub>为 负荷功率的隶属度参数;H<sub>L1</sub>、H<sub>12</sub>为负荷侧惯量的隶 属度参数。

3.2.2 两阶段鲁棒优化模型求解

两阶段鲁棒机组组合模型[21]可以表示为:

A

$$\min c^{\mathrm{T}} y + Q(x,z)$$
(33)

$$Q(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \max\{\min \mathbf{b}^{\mathrm{T}}\mathbf{x}\}$$
(34)

$$f_{\mathbf{y}} \ge \boldsymbol{d} \tag{35}$$

$$F(\mathbf{y}, \mathbf{u}) = \left\{ A_2 \mathbf{x} : \mathbf{x} \ge \mathbf{h} - A_3 \mathbf{y} - A_4 \mathbf{u} \right\}$$
(36)

式中:y 为第一阶段决策变量构成的矩阵;Q(x,z) 为 第二阶段目标函数;x 为第二阶段决策变量构成的矩 阵;F(y,u) 为第二阶段参数u 的线性函数矩阵; $A_1$ 、 b、c 和d 为第一阶段约束对应的常系数矩阵; $A_2$ 、 $A_3$ 、  $A_4$  和h 为第二阶段约束对应的常系数矩阵。式(35) 对应第一阶段式(15)—式(18);式(36)对应第二阶 段式(21)—式(23)和式(29)—式(30)。

上述建立的两阶段模型为非线性模型,其结构 为 min-max-min,无法直接求解,需要将原问题分解 为主问题和子问题,并采用对偶理论转化处理子问 题<sup>[22]</sup>,处理后的子问题为:

$$Q(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \max\left\{\max\left(\mathbf{h} - \mathbf{A}_{3}\mathbf{y} - \mathbf{A}_{4}\mathbf{u}\right)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda}\right\}$$
(37)

s.t. 
$$\begin{cases} A_2^{\mathsf{T}}\lambda \leq b\\ \lambda \geq 0 \end{cases}$$
(38)

式中: λ 为对偶变量。

经过上述的对偶变换后,可将原两阶段鲁棒模型 min-max-min 结构形式最终转化为 min-max 模型。转换后的模型可以借助行列生成(column-and-constraint generation, C&CG)算法对其进行求解<sup>[23]</sup>。

针对求解后的模型,将输出的机组开停机策略 作为已知量进行频率安全校验,若不满足式(31)— 式(32),即说明系统频率安全指标超出限值,表明系 统惯量支撑能力不足。本文采用系统*t*时刻的单位 调节功率*K*,表征系统调频能力。

$$K_{i} = \sum_{i=1}^{N} U_{i,i} K_{i}$$
(39)

为避免各时刻的动态频率指标越限,生成以约 束条件形式的割集,反馈至主问题中。

$$K_{\iota} - K_{\iota}^* \ge 0 \tag{40}$$

式中:K<sup>\*</sup>,为不满足式(37)一式(38)动态频率约束相 对应的单位调节功率。

当频率安全指标不满足要求且 $\sum_{i=1}^{N} U_{i,i} < N$ 时,生成如式(40)所示的优化割集,并返回主问题重新计算结果,使调度策略朝着增大 $K_i$ 的方向优化。

#### 4 算例分析

#### 4.1 参数设置

采用改进的 IEEE 10 机 39 节点系统验证所提模型和求解策略的优越性。本文仅考虑火电机组参与调频,设定频率变化率不高于 0.5 Hz/s,频率最低点不低于 49.5 Hz。算例中不同容量机组的平均故障

时间和平均修复时间参考文献[15],火电机组系统 参数参考文献[24],梯形模糊参数参考文献[25],典 型日 24 h风电功率和负荷预测曲线如图 2 所示,弃 风惩罚成本为 100 美元/MW,置信水平设为 0.95。



图2 风电与负荷功率预测曲线

Fig.2 Wind power and load forecasting curves

#### 4.2 模糊机会约束对优化调度的影响

为验证模型中加入模糊机会约束处理源--荷两侧 不确定性的有效性,采取2种调度模型进行仿真对比。

模型1:考虑动态频率约束的限制,不考虑风电和负荷的不确定性,系统旋转备用设置为负荷预测的10%和风电出力的20%。

模型 2:考虑动态频率约束的限制,采用模糊机 会约束模型处理源-荷两侧不确定性。

不考虑机组偶发故障的影响,以N = 1极限预 想故障设置扰动为 $0.1\Delta P_L$ 为例,通过仿真分析得出 2种模型的调度结果,如表1所示。

表1 优化调度方案对比 Table 1 Comparison of optimal scheduling schemes

模型	运行成	弃风成	总成本/	备用容	风电消
	平/夫兀	平/夫兀	夫兀	重/MW	纲率/%
1	375 649	64 000	439 649	4 879	95.05
2	344 067	13 426	357 493	3 072	98.96

由表1可知,本文所提出的模型2相比于模型 1,运行成本、弃风成本以及总成本分别降低了 8.41%、79.02%、18.69%。相较于模型1,模型2由于 采用了模糊机会约束,各机组在调度过程中输出功率 已经预留了备用容量,以应对风电出力和负荷预测 功率不确定性,不需要额外设置旋转备用容量,使得调度模型总备用容量下降37.04%,能更好地消纳风电,风电消纳率提高了3.91个百分点,弃风现象得到明显改善,减少了大量弃风惩罚,增加了系统的经济性。

4.3 负荷侧惯量不确定性对优化调度的影响

为研究负荷侧惯量不确定性对优化调度的影响,将 N - 1 极限预想故障设置扰动为  $0.1\Delta P_{\rm L}$ ,建立以下 3 种方案进行对比分析。

方案1:不考虑动态频率约束时的传统优化调度 方案。

方案 2: 仅考虑电源侧惯量的含动态频率约束的 优化调度方案。

方案 3:同时考虑电源侧和负荷侧惯量的含动态 频率约束的优化调度方案。

3种方案下的频率指标如图3和图4所示。



图3 不同调度方案的频率最低点分布

Fig.3 Frequency distribution of the lowest points under

different dispatching schemes





Fig.4 Distribution of frequency change rates under different scheduling schemes

通过分析图 3 和图 4 可知,方案 1 未考虑动态频 率约束,当系统发生功率扰动时,频率最低点仅在 04:00-05:00 和 22:00-23:00 满足频率安全范 围,其余时刻均出现频率越限,而频率变化率也在 00:00-01:00 超出频率安全范围。此种方案下频率 稳定性较差,频率安全无法得到保障。方案 2 和方 案 3 在传统模型中加入了频率安全约束,使得频率 安全指标在各时刻都满足要求,保障了系统的频率 安全,且方案 3 在方案 2 的基础上进一步考虑了负 荷侧惯量,导致其频率变化率在各个时刻都小于方 案 2,在大部分时刻的频率最低点也高于方案 2。由 此可知,从安全性角度出发,在计算频率安全指标时 考虑负荷侧惯量的影响,能有效挖掘系统深层惯性 响应能力,降低调度方案保守性。

3种方案下的优化调度结果如表2所示,其机组 启停结果如图5一图7所示。











图7 刀采3机组合序状态

Fig.7 Start-stop state of unit in scheme 3

#### 表2 不同方案机组组合结果对比

Table 2 Comparison of unit combination results for different plans

			-		
$\rightarrow dz$	发电成本/	启停成	弃风成本/	总成本/	风电消
刀杀	美元	本/美元	美元	美元	纳率/%
1	296 387	9 300	4 163	309 850	99.68
2	324 847	19 220	13 426	357 493	98.96
3	311 549	13 650	9 745	334 944	99.25

由表2可知,对比其他两种方案,方案1各方面 成本均是最低,主要是因为方案1未计及动态频率 约束,仅从功率平衡角度满足调度决策,不需要考虑 频率越限风险。由图5可知,方案1火电机组的开 机数量最少,虽然经济性最好,但无法保证大扰动下 的频率安全稳定。而方案2在方案1的基础上加入 了动态频率约束,由图6可知,其增加了系统火电机 组的开机数量,使得系统总体惯量水平上升,抵御风 险能力增加,但成本也有所升高。而方案3由于考 虑了负荷侧惯量的影响,深入挖掘了系统中被忽视 的惯量,使得系统计及的惯量更多,具有充足的惯性 响应能力,由图7可知,其在方案2的基础上减少了 火电机组的开机数量,缓解了火电机组的调频压力, 兼顾了系统频率安全与经济性。

#### 4.4 N-1机组故障不确定性结果分析

为验证本文所建 N-1故障不确定性集模型的 有效性,以机组故障带来的功率缺额为扰动量,设立 2种对比场景进行仿真分析。

场景1:以传统极限预想故障扰动设置为例,设

置额定功率缺额为最大机组退出运行。

d:f

场景 2:考虑机组故障不确定性,以满足故障概 率阈值下的 N - 1 机组故障不确定集中的最大概率 机组故障功率缺额为扰动量。

2种场景下的调度结果如表3所示。

表3 不同场景下的优化调度结果对比

Table 3 Comparison of optimal scheduling results under

unerent schemes							
お日	发电成本/	启停成	弃风成	总成本/	风电消		
切京	美元	本/美元	本/美元	美元	纳率/%		
1	362 081	22 300	25 766	410 147	98.01		
2	327 050	16 920	12 199	356 169	99.06		

分析表 3 可知,相较于场景 2,场景 1 的发电成本、启停成本以及总成本分别增加了 10.71%、 31.80%、15.16%,其主要原因是场景 1 中最大容量机组退出运行,调度结果过于保守,造成了严重的功率扰动,由于该机组惯性响应能力和一次调频能力较强,当其退出运行后,使系统惯量大幅下降,需要启动更多的机组来保证频率安全,故而导致经济性较差。

分析图 8-图 10 可知,当机组退出后造成大功 率扰动时,场景 1 大部分时刻的系统惯性时间常数 和频率最低点均比场景 2 小。而频率变化率仅与功 率扰动和惯量有关,场景 1 功率缺额远大于场景 2,









图 9 不同场景下的频率最低点

Fig.9 The lowest frequency point under different schemes





导致其波动更大,故而系统整体频率响应能力下降, 使得系统弃风运行,增加了弃风成本。

实际运行中,不同机组故障概率不一致,最大容量机组运行可靠性高,发生故障概率低,显然场景1中最大机组退出运行,调度方案过于保守。而场景2由于考虑了机组故障概率不确定性,能够在故障概率阈值限制下,基于不同机组故障概率信息分布,从不确定性集最恶劣场景中寻优,确定可能故障的机组,降低直接以最大容量机组退出运行为方案的保守性。

同时由于故障概率阈值的存在,生成的情况只 包括概率大于给定β阈值的情况,因此不同的故障 概率阈值可能对应着不同的调度结果,以场景2为 例,图11给出了不同的故障概率阈值与系统总成本 之间的关系。



Fig.11 Total system cost under different thresholds

由图 11 可知,随着故障概率阈值的增大,系统 总运行成本存在下降趋势。这是因为当阈值逐渐 增大时,一些极端场景会被不确定集排除在外,使 得系统的保守性降低。在电力系统实际运行中, 应当根据机组参数、机组数量和历史运行经验等 数据来选取最优的故障概率阈值,从而在保证系 统频率安全的情况下尽可能地降低系统运行 成本。

#### 5 结论

针对偶发故障功率缺额不确定性引发的系统频 率安全问题,探讨了负荷侧惯量对机组组合的影响, 同时计及机组故障概率不确定性的影响,提出基于 *N*-1机组故障和多重不确定性的机组组合模型。 通过仿真验证得出以下结论:

1)基于模糊机会约束处理风电、负荷和负荷侧 惯量的不确定性,能够在保障系统频率安全的前提 下,提高风电消纳量,并在此基础上计及了负荷侧惯 量的影响,使得系统惯量水平更接近于真实值,有效 提高了调度方案的稳定性和经济性,能更好为调度 人员提供指导。

2)与传统最大容量机组退出运行方案相比,本 文考虑了机组故障概率不确定性,能够在故障概率 阈值限制下,基于不同机组故障概率信息分布,从不 确定性集最恶劣场景中寻优,确定可能故障的机组, 降低了传统方案以最大机组退出运行进行优化调度 的保守性,更符合实际应用场景。

#### 参考文献

- [1] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等.双碳目标下的新型电力系统规划 新问题及关键技术[J].高电压技术,2021,47(9):3036-3046.
  HAN Xiaoqing,LI Tingjun,ZHANG Dongxia, et al.New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J].High Voltage Engineering, 2021,47(9):3036-3046.
- [2] 叶林,王凯丰,赖业宁,等.低惯量下电力系统频率特性分析及
   电池储能调频控制策略综述[J].电网技术,2023,47(2):
   446-464.

YE Lin, WANG Kaifeng, LAI Yening, et al. Review of frequency characteristics analysis and battery energy storage frequency regulation control strategies in power system under low inertia level [J].Power System Technology, 2023, 47(2):446–464.

- [3] 方仍存,桑子夏,刘知行,等.基于改进协同量子粒子群算法的 多微网负荷频率控制[J].电力建设,2023,44(7):87-97.
   FANG Rengcun, SANG Zixia, LIU Zhixing, et al. Load-frequency control of multi-microgrid systems based on improved cooperative quantum-behaved particle swarm optimization [J]. Electric Power Construction, 2023,44(7): 87-97.
- [4] CHAKRABORTY P, DHOPLE S, CHEN C Y, et al. Dynamicsaware continuous-time economic dispatch and optimal automatic generation control[C]//2020 American Control Conference (ACC). IEEE,2020;1292-1298.
- [5] 张礼浩,刘翔宇,顾雪平,等.新型电力系统频率安全稳定研究 综述及展望[J].浙江电力,2024,43(10):12-26. ZHANG Lihao, LIU Xiangyu, GU Xueping, et al. Review and prospects of frequency security and stability research in new-type power systems[J].Zhejiang Electric Power,2024,43(10):12-26.
- [6] 李书勇,蔡海青,沈娜,等.不同类型新能源接入对微电网频率的影响[J].分布式能源,2024,9(2):8-18.
  LI Shuyong, CAI Haiqing, SHEN Na etc. Impact of different types of new energy access on microgrid frequency [J]. Distributed Energy Resources, 2024,9(2): 8-18.
- [7] FAN L, ZHAO C Y, ZHANG G Y, et al. Flexibility management in economic dispatch with dynamic automatic generation control [J].
   IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2):876–886.
- [8] INOUE T, TANIGUCHI H, IKEGUCHI Y, et al. Estimation of power system inertia constant and capacity of spinning-reserve support generators using measured frequency transients [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1):136-143.
- [9] 刘方蕾,胥国毅,王凡,等.基于差值计算法的系统分区惯量评 估方法[J].电力系统自动化,2020,44(20):46-53.
   LIU Fanglei, XU Guoyi, WANG Fan, et al. Assessment method of system partition inertia based on differential calculation method
   [J].Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20):46-53.
- [10] BIAN Y K, WYMAN-PAIN H, LI F R, et al. Demand side

contributions for system inertia in the GB power system [J].IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4):3521-3530.

- [11] TUTTELBERG K, KILTER J, WILSON D, et al. Estimation of power system inertia from ambient wide area measurements [C] // 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2019; 1.
- [12] PAIDI E S N R, MARZOOGHI H, YU J, et al. Development and validation of artificial neural network-based tools for forecasting of power system inertia with wind farms penetration[J].IEEE Systems Journal, 2020, 14(4):4978-4989.
- [13] 于琳琳,蒋小亮,巴文岚,等.基于PCA-OLS模型的系统等效惯 量中长期预测[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(6): 101-109.

YU Linlin, JIANG Xiaoliang, BA Wenlan, et al.Medium-and longterm forecasting of system equivalent inertia based on PCA-OLS model[J].Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(6):101-109.

- [14] 王砚平,鲍威,李赢,等.考虑N-1故障的安全约束机组组合模型及约束削减方法[J].电力自动化设备,2021,41(7):167-175.
  WANG Yanping, BAO Wei, LI Ying, et al. Model and constraint-reduction method for security constrained unit commitment considering N 1 contingency [J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):167-175.
- [15] ZHANG Z, CHEN Y B, LIU X Y, et al. Two-stage robust securityconstrained unit commitment model considering time autocorrelation of wind / load prediction error and outage contingency probability of units[J].IEEE Access, 2019, 7:25398-25408.
- [16] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M.A low-order system frequency response model [J].IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5 (3):720-729.
- [17] 裴佑楠.考虑灵活性的电力系统动态经济调度理论研究[D].济 南:山东大学,2023.
- [18] 唐晓,袁飞,代勇,等.计及阶梯式碳交易机制及负荷响应的综合能源系统优化调度模型[J].山东电力技术,2024,51(11): 74-84.

TANG Xiao, YUAN Fei, DAI Yong, et al. Optimal scheduling of comprehensive energy systems considering tiered carbon trading mechanism and load response [J].Shandong Electric Power, 2024, 51(11):74-84.

- [19] 刘一欣,郭力,王成山.微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法
  [J].中国电机工程学报,2018,38(14):4013-4022,.
  LIU Yixin, GUO Li, WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization [J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(14):4013-4022,.
- [20] 叶婧,何杰辉,张磊,等.考虑动态频率约束和多重不确定性的 风电装机容量优化[J/OL].上海交通大学学报:1-25[2024-12-05].https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.474.

YE Jing, HE Jiehui, ZHANG Lei, et al. Optimization of wind power installed capacity considering dynamic frequency constraints and multiple uncertainties [J / OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-25[2024-12-05].https://doi.org/10.16183/j.cnki. jsjtu.2023.474.

[21] 江一航,赵书强,韦子瑜,等.考虑区域间频率动态差异及频率 响应全过程的分布鲁棒机组组合[J/OL].中国电机工程学报: 1-16[2024-12-05].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107. tm.20240124.1802.009.html.

JIANG Yihang, ZHAO Shuqiang, WEI Ziyu, et al. Distributed robust unit commitment considering the dynamic difference of regional frequency and the whole process of frequency response [J/OL].Proceedings of the CSEE: 1-16[2024-12-05].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20240124.1802.009.html.

- [22] LI J H, YU Z B, MU G, et al. An assessment methodology for the flexibility capacity of new power system based on two-stage robust optimization[J].Applied Energy, 2024, 376:124291.
- [23] ZHOU Q, ZHANG J M, GAO P F, et al. Two-stage robust optimization for prosumers considering uncertainties from sustainable energy of wind power generation and load demand based on nested C&CG algorithm[J].Sustainability,2023,15(12): 9769.
- [24] 叶婧,林宇琦,张磊,等.考虑负荷侧惯量不确定性的机组组合
  [J].电力系统及其自动化学报,2024,36(7):11-21.
  YE Jing, LIN Yuqi, ZHANG Lei, et al. Unit commitment considering load-side inertia uncertainty [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2024,36(7):11-21.
- [25] 仲悟之,黄思宇,崔杨,等.考虑源荷不确定性的风电-光热-碳 捕集虚拟电厂协调优化调度[J].电网技术,2020,44(9):3424-3432.

ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, et al. W-S-C capture coordination in virtual power plant considering source -load uncertainty [J]. Power System Technology, 2020, 44 (9) : 3424-3432.

收稿日期:2024-12-19 修回日期:2025-02-18

叶 婧(1986),通信作者(yejing2000310@163.com),女,博士,讲师,主要研究方向为大规模新能源接入后电力系统优化运行与控制;

周正坤(1999),男,硕士在读,主要研究方向为电力系统优化 调度;

何杰辉(1999),男,硕士,主要研究方向为电力系统运行与控制; 郭紫昱(1989),男,博士,主要研究方向为直流输电和电能质量; 杨子龙(2000),男,硕士在读,主要研究方向为电力系统优化 调度。

(责任编辑 车永强)

作者简介:

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.002

# 基于时频交叉注意力机制和多域特征融合的风电机组 齿轮箱故障诊断研究

贾树旺1,黄 海2,吕 洋3,杜 波1,付文龙4\*

(1.国能锦界能源有限责任公司,陕西 榆林 719319;2.国电电力发展股份有限公司,北京 100101;
 3.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122;4.三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:齿轮箱作为风电机组的关键部件,对其进行准确的故障诊断有助于保障风电机组安全可靠运行。为此,文中提出 了一种基于时频交叉注意力机制和多域特征融合的风电机组齿轮箱故障诊断方法。首先,利用快速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT)和连续小波变换(continuous wavelet transform,CWT)将时域振动信号转化为频域信号和时频图。 其次,将时域信号和频域信号输入构建的时频交叉注意力机制网络中以得到时域和频域的交叉互补特征,同时,将时频 图输入引入完全注意力机制的二维残差卷积神经网络中以提取时频域特征。最后,将时域和频域的交叉互补特征与时 频域深层特征进行融合以获得多域特征,再经过展平层和线性层,并用 softmax 函数分类,得到最终的故障诊断结果。通 过对 20 Hz、25 Hz 和 30 Hz 工况下采集的数据进行试验,诊断准确率均达到了 100%。同时,采用六种相关方法进行对比, 所提方法的诊断精度均高于对比方法,证明了所提方法的有效性。

# Research on Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox Based on Time-frequency Cross Attention Mechanism and Multi-domain Feature Fusion

JIA Shuwang<sup>1</sup>, HUANG Hai<sup>2</sup>, LYU Yang<sup>3</sup>, DU Bo<sup>1</sup>, FU Wenlong<sup>4\*</sup>

(1.Guoneng Jinjie Energy Co., Ltd., Yulin 719319, China;

2.GD Power Development Co., Ltd., Beijing 100101, China;

3. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;

4.College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: As the critical component of wind turbine, achieving the accurate fault diagnosis of gearbox is of great significance to ensure the safe and reliable operation. Thus, this paper proposes a novel wind turbine gearbox fault diagnosis method based on time-frequency cross attention mechanism and multi-domain feature fusion. Firstly, this method integrates raw time-domain signals with frequency-domain signals and time-frequency maps obtained through fast Fourier transform and continuous wavelet transform. Subsequently, the time-domain signals and frequency-domain signals are input into a time-frequency cross attention mechanism network to obtain complementary features from both domains. Meanwhile, the time-frequency maps are input into a two-dimensional residual convolutional neural network with introduced full attention mechanisms to extract time-frequency domain features. Finally, the cross-complementary features are fused with the time-frequency domain features to obtain multi-domain features, then these features are passed through flattening and linear layers, after which the softmax function is used for classification to yield the final fault diagnosis results. Through the experiments on the data collected at 20Hz, 25Hz and 30Hz, the diagnostic accuracy has reached 100%. At the same time, six related methods were compared, and the diagnostic accuracy of the proposed method was higher than that of the comparison method, which proved the effectiveness of the proposed method.

Keywords: wind turbine gearbox; fault diagnosis; time-frequency cross attention mechanism network; full attention mechanism; multi-domain feature fusion

基金项目:国家自然科学基金项目(51741907)。 National Natural Science Foundation of China(51741907).

#### 0 引言

风能作为一种清洁的可再生能源,可通过风电 机组将其转化为电能,为电力系统供电<sup>[1-2]</sup>。齿轮箱 是风电机组的重要组成部分,由于在波动负载条件 下长时间运行,可能导致故障率高、故障停机时间 长<sup>[3]</sup>。同时,风电机组齿轮箱一旦发生故障,可能会 影响电力系统的正常稳定运行,甚至引发严重事故, 造成经济损失和人员伤亡<sup>[4-5]</sup>。因此,齿轮箱故障诊 断是风电机组维护和运行的重点工作<sup>[6]</sup>。

目前,风电机组齿轮箱故障诊断方法可分为传 统故障诊断方法<sup>[7]</sup>和智能故障诊断方法<sup>[8]</sup>。前者主 要通过人工神经网络[9]、灰色模型[10]和支持向量 机<sup>111</sup>等算法或者结合信号处理的方法来实现故障诊 断,在少量的训练样本数据下就可以得到期望的结 果。但是这种方法需要高度依赖专家经验,并且自 适应能力不强,诊断精度不高。因此,基于传统故障 诊断方法的诊断和泛化能力在工程中受到限制。随 着深度学习的发展,深度学习模型如深度置信网络 (deep belief network, DBN)、卷 积 神 经 网 络 (convolutional neural network, CNN)、堆叠自动编码 器[12]和长短时记忆网络[13]等成为智能故障诊断主流 研究方向之一。这些深度学习模型可以利用大量的 数据来训练模型,抑制过拟合,弥补了传统机器学习 的不足。同时,利用深度学习的端到端特性,避免了 复杂的特征提取和手动筛选特征的过程。基于深度 学习的上述优势,许多学者利用其来研究故障诊断。 如刘鹏等<sup>[14]</sup>利用 DBN 的高维非线性处理能力,从滚 动轴承的时域振动信号中提取有效特征,并通过结 果证明了深度置信网络的优越性。张鑫宇等[15]利用 连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)和 CNN 对离心泵进行故障诊断,解决了在传统故障诊 断特征提取过程中依赖先验知识的问题。宋春生 等<sup>[16]</sup>提出了基于模拟退火变分模态分解和 CNN 的 轴承故障诊断方法,在原始诊断信号的基础上进行 最优分解重构,从而提高了诊断的精度。

虽然上述研究为故障诊断提供了广阔的视角, 然而这些研究都是基于单个一维 CNN 或二维 CNN 来实现的。同时,这些研究都是单一地从原始信号 时域、频域或时频域的角度出发进行故障诊断,忽略 了时域、频域和时频域之间的互补关系。如果仅将 原始信号转换为二维图像输入 CNN,则会丢失时间 相关性信息,仅将原始振动信号输入深度学习模型 则忽略了信号频域或者时频特性,导致特征提取不 完整,影响了故障诊断准确率。

为进一步提高风电机组齿轮箱故障诊断精度, 保障其安全可靠运行,文中从信号的时域、频域和时 频域特征出发,结合一维和二维卷积的优越性,并考 虑各个域之间特征的互补融合,提出了一种基于时 频交叉注意力机制和多域特征融合的风电机组齿轮 箱故障诊断方法。该方法先将原始诊断信号经过快 速傅里叶变换(fast Fourier transform,FFT)和CWT分 别得到频域和时频图,再将时域和频域信号输入时 频交叉注意力机制网络,获得时域和频域信号输入时 频交叉注意力机制网络,获得时域和频域的交互互 补特征,同时将时频图经过引入完全注意力机制的 二维残差 CNN 提取时频域特征,最后将多域特征进 行融合,实现故障分类。通过试验对比分析,证明所 提方法的有效性。

#### 1 理论基础

#### 1.1 CWT

CWT 是一种信号处理工具,用于分析信号的局部特征,尤其适合处理非平稳信号。CWT 通过引入 一个母小波,将其在时间上进行平移和缩放,生成一 系列子小波,并与原信号进行卷积运算,从而获得不 同时间段的频率变化,来检测信号在不同频率下的 特征。此外,CWT 可以在大范围内显示全局低频信 息,在小范围内显示局部高频特征,从而提供更全 面、更详细的信号信息。风电机组的工作环境复杂, 其振动信号往往具有较强的非平稳特性。由于 CWT 在时间尺度和频率尺度上具有较好的信息提 取能力,因此被广泛应用于风电机组齿轮箱故障诊 断<sup>[17]</sup>。CWT 的计算表达式为

$$C_{WT, x}(a, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi_{a, \tau}(t) dt$$
  
= 
$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi(\frac{t-\tau}{a}) dt$$
 (1)

式中: $C_{WT,x}(a,\tau)$ 为连续小波变换后的时频特征值; x(t)为随时间t变化的振动信号; $\tau$ 为平移参数;a为 尺度因子; $\varphi_{a,\tau}(t)$ 为可进行平移和尺度变换,且与时 间 t 相关的母小波函数;  $\varphi(\frac{t-\tau}{a})$  为经过平移  $\tau$  和 缩放 a 后的母小波函数。

#### 1.2 自注意力机制

自注意力是一种通过计算序列中不同元素之间 的相关性来提取信息的注意力机制<sup>[18]</sup>。深度学习中 的注意力机制可以在网络模型训练过程中自动学习 每个深度特征的重要权重系数。因此,自注意力机 制可以根据权重系数来自适应增强对任务有用的特 征,并抑制冗余特征以增强模型处理信息的能力。 首先,将原始信号的特征向量  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_N]$ 输入 卷积网络中,计算每个输入数据特征向量的隐藏状 态,其中, $y_1, y_2, \dots, y_N$ 为原始信号的第1个到第N个 特征。隐藏状态的结果被变换到特征空间f,g和h。

$$f(Y) = W_f(Y) \tag{2}$$

$$g(Y) = W_g(Y) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{Y}) = \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{Y}) \tag{4}$$

式中: $W_{f}$ 、 $W_{g}$ 和 $W_{h}$ 分别为特征空间f、g和h所对应的线性映射的参数矩阵;f(Y)、g(Y)和h(Y)分别为输入特征 Y 经过三个不同的特征空间f、g和h变换后的特征矩阵。

将 softmax 函数应用于 f(Y)<sup>T</sup>和 g(Y) 相乘结果的每 一行,生成注意力矩阵,即输入信号中关注的特征向量。

$$s_{ij} = f(\boldsymbol{Y}_i)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{g}(\boldsymbol{Y}_j)$$
(5)

$$\gamma_{ij} = \frac{\exp(s_{ij})}{\sum_{i=1}^{N} \exp(s_{ij})}$$
(6)

$$\boldsymbol{\theta}_{\text{out}} = \sum_{i=1}^{N} \gamma_{ij} \boldsymbol{h}(\boldsymbol{Y}_i)$$
(7)

式中: $Y_i$ 和 $Y_j$ 分别为输入特征图的第i个和第j个像 素特征; $s_{ij}$ 为未经归一化的注意力分布; $\gamma_{ij}$ 为最终得 到的注意力分布; $\theta_{out}$ 为 $\gamma_{ij}$ 乘以对应的隐藏状态  $h(Y_i)$ 并进行加权求和后所得到的注意力特征。

#### 2 研究方法

#### 2.1 完全注意力机制

为更好地捕捉输入特征的全局和局部特征,设 计的完全注意力机制由两个部分组成。如图1所 示,上面的路径采用传统卷积的输入特征映射。下 面是一个类似于自注意力机制的模块,但与之不同 的是,它将传统的1×1的卷积核滤波扩展到了*n×n*。 通过这样设计的两条路径能够同时执行特征提取和 注意力权重分布任务。为有效地将两个部分提取的 特征进行融合,选择直接加权的方式来自适应分配 两部分的权重,直接加权的公式为

$$m(R_o, E_o) = \alpha R_o + (1 - \alpha) E_o$$
(8)

式中: $m(\cdot)$ 为完全注意力机制中传统特征映射和自 注意力机制的特征加权函数;o为特征的索引; $E_o$ 为 第o个索引值的传统卷积映射输出特征值; $R_o$ 为第o个索引值的自注意力机制输出特征值; $\alpha$ 为可训练 的参数,且 $\alpha \in (0,1)$ ,两部分特征的权重大小分别为  $1 - \alpha \pi \alpha_o$ 





#### 2.2 时频交叉注意力机制

为获得时域和频域的交叉互补特征,在提取时 域特征和频域特征的 CNN 之间引入时频交叉注意 力机制。时频交叉注意力机制的结构如图 2 所示。 时频交叉注意力机制的目的是利用 Transformer 模型 的自注意力机制来交互式捕捉时域特征和经 FFT 后 的频域特征,以实现有效的特征提取与融合,从而提 高故障分类效果。

对于给定的由原始信号 d 得到的时域特征  $T_d$ 和 频域特征  $F_d$ ,时频交叉注意力机制首先使用具有线 性映射的特征嵌入模块来获得  $T_o$ 、 $T_k$ 、 $T_v$ 和  $F_o$ 、  $F_k$ 、 $F_{v^o}$ 

$$\begin{cases} T_{q} = T_{d} \odot H_{q}, T_{\kappa} = T_{d} \odot H_{\kappa}, T_{\nu} = T_{d} \odot H_{\nu} \\ F_{0} = F_{d} \odot P_{0}, F_{\kappa} = F_{d} \odot P_{\kappa}, F_{\nu} = F_{d} \odot P_{\nu} \end{cases}$$
(9)

式中: $T_Q$ 、 $T_K$ 、 $T_V$ 分别为时频交叉注意力机制中 Transformer 模型的自注意力机制的查询向量 Q、键 向量 K、值向量 V在时域信号中提取的特征; $F_Q$ 、 $F_K$ 、  $F_v$ 为在频域信号中提取的特征;  $H \approx P$ 为可学习的 线性权重;  $H_o$ 、 $H_k$ 、 $H_v$ 为在提取时域特征时形成的线 性映射的参数矩阵;  $P_o$ 、 $P_k$ 、 $P_v$ 为在提取频域特征时 形成的线性映射的参数矩阵; ①为逐元素乘法运算。



Fig.2 Time-frequency cross attention mechanism architecture

得到  $T_{q}$ 、 $T_{\kappa}$ 、 $T_{v}$ 和  $F_{q}$ 、 $F_{\kappa}$ 、 $F_{v}$ 后,通过时频交叉注 意力机制分别计算时域注意力矩阵  $C_{1}$ 和频域注意 力矩阵  $C_{2}$ 。

$$\begin{cases} C_1 = \operatorname{softmax}\left(\frac{F_Q \otimes T_K}{\sqrt{D_{T_K}}}\right) \odot T_V \\ C_2 = \operatorname{softmax}\left(\frac{T_Q \otimes F_K}{\sqrt{D_{F_K}}}\right) \odot F_V \end{cases}$$
(10)

式中: $D_{r_k}$ 为 $T_k$ 的维度; $D_{r_k}$ 为 $F_k$ 的维度; $\otimes$ 为矩阵乘 法运算。应用 softmax 函数得到区间[0,1]内的归一 化权重。

使用非线性变换块来计算输出特征 **T**<sub>out</sub> 和 **F**<sub>out</sub>, 非线性变换块由两个线性层、一个归一化层和一个 非线性激活函数组成。

$$\begin{cases} \boldsymbol{T}_{out} = u(\boldsymbol{C}_1) + \boldsymbol{C}_1 \\ \boldsymbol{F}_{out} = u(\boldsymbol{C}_2) + \boldsymbol{C}_2 \end{cases}$$
(11)

式中:u(·)为非线性变换的函数。

非线性激活函数使用高斯误差线性单元 (Gaussian error linear unit, GELU)。

$$G(z) = \frac{z}{2} \left[ 1 + \operatorname{erf}(z/\sqrt{2}) \right]$$
(12)

式中:z为输入;G(z)为输入z经过GELU的输出值; erf为高斯误差函数, erf(z) =  $\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{z} e^{-t^{2}} dt_{o}$ 

将得到的注意力特征 Tout 和 Fout 分别添加到相

应分支的第二个卷积块的输出中,再通过后面两个 卷积块,得到时域特征和频域特征。

# 2.3 基于时频交叉注意力机制和多域特征融合的 风电机组齿轮箱故障诊断方法

为将时域、频域和时频域的多域特征有效融合 以提高故障诊断精度和模型的鲁棒性,本文提出了 一种基于时频交叉注意力机制和多域特征融合的风 电机组齿轮箱故障诊断方法,其结构如图3所示。 首先,分别将原始振动时域信号经过 FFT 和 CWT 得 到频域信号和时频图。然后,将时域信号和频域信号 输入时频交叉注意力机制网络中,时频交叉注意力机 制网络由两分支的一维 CNN 和时频交叉注意力机制 组成。先引入宽卷积神经网络<sup>[19]</sup>(deep convolution neural networks with wide first-layer kernels, WDCNN) 的思想,将一维时域信号和频域信号在扩大的卷积核 感受野下提取有效特征,再通过三个卷积块提取时域 和频域特征。时频交叉注意力机制被添加到第二个 卷积层来得到时域和频域信号的交互特征。对于二 维时频图,构建四层残差块,并在第二层残差块中引 入完全注意力机制,获得时频域特征。

最后,将时域特征、频域特征和时频域特征进行 拼接展平,再通过线性层和 softmax 激活函数进行故 障分类。

所提出的基于时频交叉注意力机制和多域特征 融合的风电机组齿轮箱故障诊断方法,诊断流程图 如图4所示,主要步骤如下。

步骤1:对时域信号进行预处理并划分数据集为 训练集、验证集和测试集。

步骤 2:将时域信号进行 FFT 和 CWT 得到频域 和时频图。

步骤 3:将训练集和验证集输入多域特征融合的 故障诊断模型中,利用时频交叉注意力机制网络得 到时域和频域的交叉互补特征,同时利用引入完全 注意力机制的残差二维 CNN 提取时频域特征。

步骤 4:将交叉互补特征和时频域特征进行融合 得到风电机组齿轮箱的多域特征,并用 softmax 函数 进行故障分类。

步骤5:保存故障诊断精度最高的模型参数。

步骤 6:将测试集输入保存好的模型中进行测 试,得到最终的故障诊断结果。



图3 基于时频交叉注意力机制和多域特征融合的故障诊断方法结构图

Fig.3 Structure of fault diagnosis method based on time-frequency cross attention mechanism and multi-domain feature fusion



图4 所提诊断方法流程图

Fig.4 Flowchart of the proposed fault diagnosis method

#### 3 试验验证

#### 3.1 数据描述和数据预处理

利用北京交通大学风力涡轮机传动系统试验台 的行星齿轮箱收集的数据进行试验<sup>[20]</sup>。试验平台如 图 5 所示,主要由电机、行星齿轮箱、固定轴齿轮箱 和负载设备构成。齿轮箱存在五种健康状态:断齿、 健康、缺齿、根部裂纹、磨损。每种健康状态同时采 集了 x 轴和 y 轴方向的振动信号和行星齿轮箱输入 轴的编码器数据。所有通道的采样频率均为 48 kHz, 对每种健康状态采集了 20 Hz、25 Hz、30 Hz、35 Hz、



图 5 试验平台 Fig.5 Experimental platform

40 Hz、45 Hz、50 Hz 和 55 Hz 八种不同速度条件的数据。

为验证不同工况下,所提方法的有效性,以及模型对不同工况数据的泛化能力,本文分别选择了在20 Hz、25 Hz、30 Hz 工况下 x 轴方向的振动信号作为试验数据,每个健康状态以 1024 的信号长度划分为一个样本。选择每类 500 个样本作为总的数据集,训练集、验证集和测试集按照 7:2:1 的比例进行划分。试验信息如表 1 所示。

试验环境为 python 3.6 torch 1.13.1,学习率为 0.004,优化器为 Adam, epochs 为 30,批量大小为 64。

3.2 试验结果分析

将训练集输入所提模型中进行训练,同时利用 验证集验证模型性能。为更直观地展示所提方法的 分类效果,利用t-分布领域嵌入(t-distributed stochastic neighbor embedding,t-SNE)对测试集的原 始样本和分类结果分别进行可视化。此处以25 Hz 工况下的故障诊断试验为例,绘制的原始样本分布 可视化如图 6(a)所示。由图 6(a)可知,五种健康类 别的原始样本呈杂乱分布,不能很好地区分开来。 利用经过训练的所提模型分别对 20 Hz、25 Hz 和 30 Hz 工况下的测试集进行分类,分类结果的 t-SNE 可视化如图 6(b)一图 6(d)所示。三种工况下,每个 类别都可以很好地区分开,并且没有错误分类。

表1 试验数据信息 Table 1 Experimental dataset information

神声业大		+ /*		
健康扒忩	训练集	验证集	测试集	怀金
断齿	350	100	50	0
健康	350	100	50	1
缺齿	350	100	50	2
根部裂纹	350	100	50	3
磨损	350	100	50	4



Fig.6 Visualization of fault diagnosis results

为进一步验证所提方法的有效性,利用三个不

同工况下划分的训练集和验证集对模型进行训练和 评估,然后利用测试集进行测试,测试集的诊断结果 利用混淆矩阵进行可视化,结果如图7所示,可以看 出所提方法对风电机组齿轮箱故障诊断具有较好的 诊断精度。



Fig.7 Confusion matrix of fault diagnosis results

#### 3.3 对比分析

为验证所提方法的优越性,将其与相关方法进行对比。方法一为一维 CNN 和原始振动信号的故障诊断方法,方法二为一维 CNN 和原始振动信号经FFT 得到的频域信号的故障诊断方法,方法三为WDCNN 和原始振动信号的故障诊断方法,方法四为时频交叉注意力机制网络与原始振动信号和经FFT

的频域信号的故障诊断方法,方法五为二维 CNN 和 原始振动信号经 CWT 得到的时频图的故障诊断方 法,方法六为引入完全注意力机制的二维 CNN 与经 CWT 得到的时频图的故障诊断方法,方法七为本文 所提方法。所有方法的优化器、学习率、批量大小均 保持一致。对三个不同的工况条件分别进行试验, 所有方法训练 5 次,计算平均测试精度,对比试验结 果如表 2 所示。

表2	对比试验结果
able 2 Comparie	son of experimental result

<del></del> >+-	不同负	负载下的平均测试	精度/%
刀伝	20 Hz	25 Hz	30 Hz
<u> </u>	81.68	83.20	81.64
	97.12	96.16	96.08
Ē	78.64	80.16	80.72
四	97.60	96.64	97.28
五	96.96	98.00	97.20
六	97.84	98.40	98.72
七	100.00	100.00	100.00

由表2所知,本文所提方法实现了最高的诊断 精度。相比于单独使用一维 CNN 的方法,一维卷积 和二维卷积相结合的故障诊断方法能够提高故障诊 断精度,例如在20Hz的速度条件下,所提方法比方 法一和方法二的诊断精度分别高出 18.32 个百分点 和 2.88 个百分点。同时,相比于单独使用二维 CNN 的方法,所提方法比方法五和方法六的诊断精度分 别高出 3.04 个百分点和 2.16 个百分点。在 25 Hz 的 速度条件下,所提方法比方法一和方法二的诊断精 度分别高出 16.80 个百分点和 3.84 个百分点,比方 法五和方法六的诊断精度分别高出 2.00 个百分点和 1.60个百分点。在 30 Hz 的速度条件下,所提方法比 方法一和方法二的诊断精度分别高出 18.36 个百分 点和 3.92 个百分点,比方法五和方法六的诊断精度 分别高出 2.80个百分点和 1.28个百分点。此外,将 时域、频域、时频域相结合的方法相比于单独利用时 域、频域和时频域的故障诊断方法具有更高的故障 诊断精度,如所提方法比方法一、方法二和方法五的 诊断精度高。同时,在不同的工况下,本文所提方法 的故障诊断精度都能达到100%,这也反映出所提模型具有较好的泛化能力。

为进一步验证所提方法的鲁棒性和泛化能力, 利用 20 Hz 和 25 Hz 的训练集训练 7 种方法的模型, 将 20 Hz 和 30 Hz 的测试集输入训练好的模型进行 测试,绘制测试结果的柱状图如图 8 所示。由图 8 可以看出,尽管在变工况条件下,所提方法相比于对 比方法也能实现更高的诊断精度。由于测试集中存 在训练集中未出现的工况,数据特征分布不同,因此 导致诊断精度相对于单一工况的情景略低。



varying operating conditions

#### 4 结论

为实现高精度的风电机组齿轮箱故障诊断,文 中提出了一种基于时频交叉注意力机制和多域特征 融合的风电机组齿轮箱故障诊断方法。首先,将原 始振动信号经 FFT 和 CWT 转换为频域信号和时频 图。然后,将原始振动信号和频域信号和时频 图。然后,将原始振动信号和频域信号输入两分支 的时频交叉注意力机制网络中以提取时域和频域的 互补特征,同时,利用引入完全注意力机制的二维 CNN 对时频图进行特征提取。最后,将提取的时域 和频域互补特征与时频域特征进行有效融合,实现 高精度的故障分类。主要工作和结论如下:

1)为得到时域和频域的互补特征,建立了时频 交叉注意力机制网络,由两分支的一维 CNN 和时频 交叉注意力机制组成,并通过试验验证了该模型的 有效性。 2)结合了一维 CNN 和二维 CNN 的特征提取优势,利用一维 CNN 提取时域和频域特征,同时利用引入完全注意力机制的二维 CNN 提取时频域特征, 再将提取的时域、频域和时频域特征有效地融合,以 提高风电机组齿轮箱的故障诊断精度。通过对多个 对比试验的结果进行分析,验证了所提方法的有效 性,具有一定的工程应用价值。

3)虽然所提方法在风电机组齿轮箱单工况情景 下表现出较好的性能,但在不同数据分布的变工况 情景和极限小样本情景中,精度有待进一步提高。 针对训练样本和测试样本数据分布不一致的问题, 目前主流方法是利用迁移学习实现高精度的故障诊 断,而对于极限小样本问题主要是利用生成对抗网 络对样本进行扩充以提高故障诊断精度。未来将会 针对上述存在的问题开展相关研究。

#### 参考文献

- [1] 王印松,刘佳微,贾思宇,等.基于改进 PSO-LSTM 算法的风电机组状态监测方法研究[J].山东电力技术,2024,51(5):30-37.
   WANG Yinsong, LIU Jiawei, JIA Siyu, et al. Research on wind turbine status monitoring methods based on improved PSO-LSTM algorithm[J].Shandong Electric Power,2024,51(5):30-37.
- [2] 周涛,向永建,杜可可,等.风机与储能参与电网调频协调控制 技术综述[J].浙江电力,2024,43(7):45-55.
   ZHOU Tao, XIANG Yongjian, DU Keke, et al. An overview of a coordinated control technique for wind turbines and energy storage participating grid frequency regulation[J].Zhejiang Electric Power, 2024,43(7):45-55.
- [3] 吴岚,柳亦兵,吴仕明,等.基于VMD倒频变换的风电机组齿轮 箱复合故障诊断[J].振动与冲击,2023,42(24):221-227.
  WU Lan,LIU Yibing,WU Shiming,et al.Composite fault diagnosis of wind turbine gearboxes based on VMD cepstral transform [J]. Journal of Vibration and Shock,2023,42(24):221-227.
- [4] 王璞,孙洁,张怡.基于LSTM-SVM的风电机组齿轮箱故障诊断
  [J].机床与液压,2023,51(16):211-214.
  WANG Pu, SUN Jie, ZHANG Yi. Fault diagnosis of wind turbine gearbox based on LSTM-SVM [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023,51(16):211-214.
- [5] 陈阳,刘永前,韩爽,等.基于多模态时频图融合的风电机组齿 轮箱故障诊断方法[J].分布式能源,2023,8(3):17-23.
   CHAN Yang, LIU Yongqian, HAN Shuang, et al. Fault diagnosis method of wind turbine gearbox based on multi - mode time frequency image fusion[J].Distributed Energy,2023,8(3):17-23.
- [6] 蔡昌春,何捷,承敏钢,等.基于改进VMD-MCKD和深度残差网 络的风机齿轮箱故障诊断[J].山东电力技术,2024,51(2):

67-78.

CAI Changchun, HE Jie, CHENG Mingang, et al. Fault diagnosis of fan gearbox based on improved VMD-MCKD and deep residual network[J].Shandong Electric Power, 2024, 51(2):67-78.

- [7] 张涛,杨旭,李玉梅,等.基于EEMD-IGWO-SVM的电机轴承故 障诊断[J].机床与液压,2024,52(10):174-181.
  ZHANG Tao, YANG Xu, LI Yumei, et al. Motor bearing fault diagnosis based on EEMD-IGWO-SVM [J]. Machine Tool & Hydraulics,2024,52(10):174-181.
- [8] FU W L, YANG K, WEN B, et al. Rotating machinery fault diagnosis with limited multisensor fusion samples by fused attention – guided Wasserstein GAN [J]. Symmetry, 2024, 16 (3):285.
- [9] 刘朝玺,叶志锋,王彬,等.基于人工神经网络的离心泵空化故 障诊断[J].机械制造与自动化,2024,53(4):151-153.
  LIU Chaoxi, YE Zhifeng, WANG Bin, et al. Centrifugal pump cavitation fault diagnosis based on artificial neural network [J].
  Machine Building & Automation,2024,53(4):151-153.
- [10] 胡延伟,何文飞,任龙飞,等.基于灰色模型的电极锅炉设备故障检测分析[J].机械制造与自动化,2023,52(6):229-232.
  HU Yanwei, HE Wenfei, REN Longfei, et al. Analysis of fault detection of electrode boiler equipment based on grey model [J].
  Machine Building & Automation,2023,52(6):229-232.
- [11] 李俊逸, 尧远, 刘明浩. 基于振动信号最优特征提取算法的风力
   机齿轮箱 SVM 故障诊断[J]. 太阳能学报, 2024, 45 (7):
   626-633.

LI Junyi, YAO Yuan, LIU Minghao.SVM fault diagnosis of wind turbine's gearbox based on optimal feature extraction algorithm of vibration signal [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45 (7): 626–633.

[12] 马芸婷,张超,王宇晨.PCA-SAE的齿轮箱故障诊断方法研究 [J].机械设计与制造,2022(3):144-147.

MA Yunting, ZHANG Chao, WANG Yuchen. Research on gearbox fault diagnosis method of PSO – SAE [J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(3):144–147.

- [13] 荆东星,陈杨晖,全哲.基于1D-CNN和SWLSTM的风电轴承故 障诊断方法[J].机械强度,2023,45(6):1309-1317.
  JING Dongxing, CHEN Yanghui, QUAN Zhe. Wind turbine rolling bearing fault diagnosis method based on 1D-CNN and SWLSTM
  [J].Journal of Mechanical Strength,2023,45(6):1309-1317.
- [14] 刘鹏,皮骏,胡超.基于DBN 网络的滚动轴承故障诊断[J].组合 机床与自动化加工技术,2024(1):140-144.
   LIU Peng, PI Jun, HU Chao. Fault diagnosis of rolling bearing

based on DBN network [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2024(1):140-144.

- [15] 张鑫宇,付强,黄倩,等.基于 CWT-CNN 的离心泵轴承故障识 别方法[J].机床与液压,2024,52(12):202-207.
  ZHANG Xinyu, FU Qiang, HUANG Qian, et al. Fault identification method of centrifugal pump bearing based on CWT -CNN [J].
  Machine Tool & Hydraulics,2024,52(12):202-207.
- [16] 宋春生,梁亚茹,鲁妮芳,等.基于SAVMD与CNN结合的轴承 故障诊断方法[J].机械强度,2024,46(3):509-517.
  SONG Chunsheng, LIANG Yaru, LU Nifang, et al. Bearing fault diagnosis method based on SAVMD and CNN [J]. Journal of Mechanical Strength,2024,46(3):509-517.
- [17] 周舟,陈捷,吴明明.基于 CWT 和优化 Swin Transformer 的风电 齿轮箱故障诊断方法[J].振动与冲击,2024,43(15):200-208.
  ZHOU Zhou, CHEN Jie, WU Mingming. Fault diagnosis method for wind power gearbox based on wavelet transform and optimized Swin Transformer [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43 (15):200-208.
- [18] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need [J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017, 30:6000-6010.
- [19] ZHANG W, PENG G, LI C, et al. A new deep learning model for fault diagnosis with good anti-noise and domain adaptation ability on raw vibration signals [J]. Sensors: Basel, Switzerland, 2017, 17 (2):E425.
- [20] LIU D D, CUI L L, CHENG W D. A review on deep learning in planetary gearbox health state recognition: methods, applications, and dataset publication [J].Measurement Science and Technology, 2024,35(1):012002.

#### 收稿日期:2024-09-25

修回日期:2024-11-21

作者简介:

贾树旺(1978),男,工程师,主要研究方向为新能源发电系统运 行维护与管理;

黄 海(1987),男,工程师,主要研究方向为新能源发电系统运 行维护与管理;

吕 洋(1995),男,硕士,工程师,主要研究方向为新能源发电系 统运行维护与管理;

杜 波(1992),男,工程师,主要研究方向为新能源发电系统运 行维护与管理;

付文龙(1988),通信作者(ctgu\_fuwenlong@126.com),男,博士, 副教授,主要研究方向为发电设备健康管理、人工智能应用等。

(责任编辑 车永强)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.003

# 基于差分隐私保护的智能电网分布式经济调度方案

解国庆1,梁 添1,周兵兵2,李鸿伟1,付文龙3\*

(1.国能锦界能源有限责任公司,陕西 榆林 719319;2.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122;3.三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443002)

摘要:为有效应对分布式智能电网和相关负荷在经济调度中面临的隐私披露的挑战,提出了一种基于差分隐私保护的经 济调度方案。首先构建一个基于需求响应的框架,包括需求响应服务器、数据管理器和一组本地控制器。在此基础上, 设计服从正态分布的高斯噪声,用以模糊智能电网和负荷隐私变量在通信线路传输的状态信息,同时确保不影响调度结 果的收敛性和最优性。此外,还使用Kullback-Leibler(KL)法量化了该方案的隐私保护程度。通过在IEEE 39节点系统 上的仿真实验表明,该方案能够有效保护分布式智能电网和相关负荷的隐私,且在计算复杂度和最优性方面均优于基于 Paillier加密的经济调度算法。

关键词:智能电网;分布式经济调度;需求响应框架;差分隐私 中图分类号:TM734 文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)04-0020-09

### Distributed Economic Dispatch Scheme for Smart Grid Based on Differential Privacy Protection

XIE Guoqing<sup>1</sup>, LIANG Tian<sup>1</sup>, ZHOU Bingbing<sup>2</sup>, LI Hongwei<sup>1</sup>, FU Wenlong<sup>3\*</sup>

(1.Guoneng Jinjie Energy Co., Ltd., Yulin 719319, China;

2. Power China Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;

3.College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: To effectively address the privacy disclosure challenges faced by distributed smart grids and associated loads in economic dispatch, a differential privacy-based economic dispatch scheme is proposed. Initially, a demand response framework is constructed, which includes a demand response server, a data manager, and a set of local controllers. Based on this framework, Gaussian noise following a normal distribution is designed to obscure the state information of smart grids and load privacy variables during transmission over communication lines, while ensuring that the convergence and optimality of the dispatch results are not affected. Additionally, the Kullback-Leibler method is employed to quantify the degree of privacy protection offered by the scheme.Simulation experiments conducted on the IEEE 39-bus system demonstrate that the proposed scheme effectively protects the privacy of distributed smart grids and associated loads and that it outperforms the privacy protection scheme based on the Paillier encryption algorithm in terms of both computational complexity and optimality. Keywords:smart grid; distributed economic dispatch; demand response framework; differential privacy

#### 0 引言

随着全球能源危机和环境污染的加剧,建设一 个更清洁、更低碳的能源体系是人类不可避免的选 择。智能电网是一种有效组织多个发电机以及风 力、光伏等可再生能源的形式,在提高电力供应的可 靠性和灵活性方面发挥着日益重要的作用。经济调 度问题作为智能电网中一个基本的能源管理问 题<sup>[1-3]</sup>,在过去的几十年里得到了广泛研究。该问题 旨在满足若干约束条件下,以最低运行成本对多个 发电机进行短期资源分配,以满足负荷需求。例如, 当发电机数量很少时,可以使用基于最优潮流的方 法来调度它们。然而,对于一个具有众多和地理上

基金项目:梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室开放基金 (2024KJX04)。

Open Fund of Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station (2024KJX04).

分散的发电机的网络,这种集中调度的实现成本高, 由此产生的系统也不会是可靠的或是高效的,因为 单个通信通道的故障可能影响整个系统。较为理想 的解决方案是采用分布式调度,即各机组从其邻近 发电机获得信息纳入自身更新迭代的过程中,该过 程只需本地通信网络即可进行。这种调度形式符合 未来分布式微电网中网络元件之间通信的概念,可 以使得各机组独立运行,避免集中式调度通信成本 高、可伸缩性受限、隐私性差等缺点。随着共识理论 被应用于解决智能电网中的经济调度问题[4-6],基于 增量成本共识的算法已经成为解决经济调度问题的 热点方法[7-10],可以在一定的约束条件下成功地实现 社会福利的最大化,其中应用了多智能体系统中的 共识理论[11-14]。然而,在目标函数最大化的过程中, 由于机组间需要频繁地与相邻节点交换真实的状态 信息,电力活动中的隐私披露也就经常会出现,这可 能给智能电网带来严重的破坏,并给个人带来巨大 的经济损失[15-16]。

近年来,有关智能电网中的隐私保护方案研究 较少。文献[17]提出了基于隐私保护增量成本共识 的经济调度算法,在最大化目标函数的同时,仅仅只 保证了供给侧的隐私(不考虑需求侧)。文献[18]和 文献[19]的目标函数模型只单方面考虑发电机的成 本函数,而不包括负荷的效用函数。文献[20]提出 了一种基于 Paillier 加密的隐私保护经济调度算法。 然而,由于该算法需要对每个状态量进行加密和解 密操作,对于非整数的状态量还须进行量化处理,这 导致了算法的计算复杂度较高,并且难以避免地引 入了误差。因此,研究一种既能保护供需双方隐私, 又具备低计算复杂度且实现零误差的方案,对供需 双方而言尤为重要。

为应对智能电网中隐私泄露的风险以及负荷数 据隐私保护的挑战,本文提出了一种基于差分隐私 保护的经济调度方案。该方案的主要贡献如下。

1)需求响应框架:构建了一个全新的需求响应 框架,该框架由需求响应服务器、数据管理器和一组 本地控制器组成。需求响应服务器通过动态调整内 部价格来影响用户的能源消耗行为,而数据管理器 则负责收集用户的需求信息,并据此指导本地控制 器制定调度计划。这种结构不仅提高了系统的灵活 性,还增强了对用户需求的响应能力。

2)噪声添加机制:在通信过程中,设计了服从正态分布 N(0,(σ<sub>i</sub>(k)<sup>2</sup>)的高斯噪声,以模糊智能电网和负荷隐私变量的状态信息,同时确保不影响调度结果的收敛性和最优性。这一设计在保证用户隐私的同时,保持了调度决策的准确性和优化性能。

3)Kullback-Leibler(KL)隐私评估方法:使用了 KL散度作为衡量指标,有效地评估了所添加噪声对 原始数据分布的影响,从而为隐私保护提供了一个 定量的评价标准,更精确地控制和评估了隐私保护 的效果。

#### 1 研究方法

#### 1.1 图论

图 G = (V, E) 为 一 个 二 元 组 ,其 中 V ={1,2,…,n}是非空的有限节点集,  $E \subseteq V \times V$  为边的 集合。边(l,m)  $\in E$  代表节点l 与节点m 互成通路, 边由节点l 指向节点m。对于图中所有的边中 (l,m)  $\in E$ 都有(m,l)  $\in E$ ,则称这样的图为无向图,如 果不能满足,则为有向图。图中每个节点的邻居节 点可以定义为 $N_l$ ,如果无向图中任选两个节点,它们 之间都存在一条路径,则称该图为连通的;对于有向 图中,任意两个节点之间都存在一条路径,则称该有 向图为强连通。

在智能电网中,假设多个负荷可以连接到一个 发电机,并且不存在由任何两个发电机提供的共同 负荷。考虑一个包含n个节点的通信网络,每个发 电机提供多个负荷的能量供应。有向连通图G = (V,E,A)表示网络的通信拓扑结构。 $V = \{V_c, V_0\}$ 为 n个机组和相关负荷的通信节点集合,其中 $V_c$  =  $\{1,2,...,n_i\}$ 为发电机组集合, $V_p = \{1,2,...,n_2\}$ 为负 荷集合; $E \subseteq V \times V$ 为边的集合, $(m,l) \in E$ 表示节点m可以从节点l接收到信息,即节点l是节点m的内 邻; $A = (a_{lm})_{n \times n}$ 为图G的通信权重矩阵。

#### 1.2 隐私性的度量方法

KL方法是一种能够量化隐私保护方案所提供的隐私保护程度(privacy protection degree, PPD)的有效工具。它是从差分隐私(differential privacy, DP)理论演变而来,并在隐私保护领域得到了广泛应用。KL隐私通过衡量扰动数据与原始数据分布之间的

相似性来量化隐私泄露的风险。这种方法能够有效 评估在数据处理过程中,个人数据被随机化处理后 的隐私泄露程度。

通过利用扰动数据的分布相似性,KL 隐私实现 PPD 测量,其具体定义为存在两个向量  $x_1, x_2 \in R^N$ ,  $R^N \to N$  维实数向量空间,若  $l_0 \in n$ ,满足

$$|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2| \leq \begin{cases} \sigma, l = l_0 \\ 0, l \neq l_0 \end{cases}$$
(1)

式中: $\sigma$ 为一个非负的参数,用于量化两个向量在特定维度上的最大允许差异。若 $x_1, x_2$ 满足式(1),则称 $x_1, x_2$ 为 $\sigma$ 的邻接向量。

随机函数如果满足条件式(2),则表示 $x_1$ 和 $x_2$ 可以实现 $\varepsilon$ -KL隐私。

$$\frac{D_{\mathrm{KL}}[P_{M(x_{i})}||P_{M(x_{2})}] + D_{\mathrm{KL}}[P_{M(x_{2})}||P_{M(x_{i})}]}{2} \leq \varepsilon$$
(2)

式中: $D_{KL}[P_{M(x_1)}||P_{M(x_2)}]$ 为 $P_{M(x_1)}$ 相对 $P_{M(x_2)}$ 的 KL 散度;  $P_{M(x_1)}$ 和 $P_{M(x_2)}$ 分别为模型M下,分别给定输入 $x_1$ 和 $x_2$ 时的输出概率分布; $\varepsilon$ 为误差阈值。

#### 1.3 Paillier加密算法

Paillier加密系统因其同态加密特性而适用于开放和动态的网络环境,且不需要第三方介入来管理密钥。该系统由一个私钥和一个可公开分享的公钥组成。任何拥有公钥的用户都能够加密信息,但唯有掌握私钥的用户才能解密这些信息。Paillier加密的核心优势在于,即使数据被加密,某些数学运算的结果依然可以保持一致。这一特点使其在云计算、隐私保护及电力交易等多个领域中得到了广泛应用。

#### 2 问题描述

#### 2.1 需求响应框架

所构建的基于需求响应的框架如图1所示。在 智能电网中,假设多个负荷只能连接到一个发电机, 并且不存在由任何两个不同的发电机提供的共同负 荷。数据管理器从供需双方收集实时信息。实时信 息包括负荷的用电量和发电机的发电功率。数据管 理器根据收集的信息向需求响应提供相应的需求响 应服务器。需求响应服务器确定内部价格,然后与 本地控制器共享价格。此外,需求响应服务器还向 本地控制器传递需求响应通知。每个发电机都有自 己的本地控制器。本地控制器根据接收到的信息, 通过发电机之间的通信交互来确定并执行相应的调 度计划。

在整个电力需求响应过程中,内部价格的设定由 需求响应服务器主导,直接影响用户的负荷用电量。 例如,当价格较低时,用户往往会增加电力消耗,导致 负荷的显著提升。同时,电力消耗的变化会促使发电 机的发电量调整,这一过程由数据管理器负责执行, 以确保及时满足需求波动。因此,本文将关注并保护 以下几类状态信息:负荷的用电量、发电机的发电量、 用户对电价变化的敏感性。为此,基于所提出的架 构,设计了一套全面的隐私保护方案。在数据管理器 的信息收集阶段,采用差分隐私方法,确保用电量需 求数据的隐私性,防止潜在的数据泄露。当本地控制 器通过发电机之间的通信交互来确定和执行调度计 划时,运用基于差分隐私保护的经济调度算法,以分



Fig.1 Schematic diagram of the information-physical system framework of smart grids

别实现发电量和用电量对电价敏感度的隐私保护。 这一策略不仅提高了系统的安全性,同时也确保了用 户的用电需求在满足的情况下不会被泄露,从而增强 了用户对智能电网系统的信任。

#### 2.2 目标函数

考虑发电机和负荷,建立协同经济调度的数学 模型。对于负荷而言,一个负荷等同于一个节点, 电力市场中的每个负荷在一天中不同时间的电量 消耗都有自己的偏好。为每个负荷引入效用函数  $U_i(P_i(k)), i \in V_p$ 来表示其效用,包括其满意度、舒 适度、福利、偏好等。所使用的实用函数满足特性

$$\begin{cases} \frac{\partial U_{i}(P_{i}(k))}{\partial P_{i}(k)} \geq 0, \\ \frac{\partial^{2} U_{i}(P_{i}(k))}{\partial (P_{i}(k))^{2}} \leq 0, \end{cases} \quad i \in V_{D}$$

$$(3)$$

式中: $P_i(k)$ 为负荷 *i* 在第 *k* 次迭代的功率需求:  $\frac{\partial U_i(P_i(k))}{\partial P_i(k)}$ 为负荷的边际收益。

式(3)中的第二个不等式表示边际收益为一 个非递增函数。由于边际收益通常会随着负荷使 用更多的供能而减少,因此第二个不等式仍然 存在。

基于这些特性,本文使用了负荷典型效用函数  $U_i(P_i(k)) =$ 

$$\begin{cases} u_i P_i(k) - d_i(P_i^2(k)) &, P_i(k) \le (0.5u_i/d_i) \\ u_i^2/4d_i, P_i(k) > (0.5u_i/d_i) \end{cases}$$
(4)

式中: u, 和 d, 为效用函数的系数。

此外,负荷需要为每千瓦时支付ξ元,即为  $P_i(k)$ 支付 $\xi P_i(k)$ 元。因此,负荷的总效用被确定为

> $S_{i}^{\text{Load}}(k) = U_{i}(P_{i}(k)) - \xi P_{i}(k), i \in V_{\text{D}}$ (5)

对发电机组,一个发电机等同于一个节点,考虑 其典型成本函数

 $C_i(G_i(k)) = \alpha_i(G_i(k))^2 + \beta_i G_i(k) + \gamma_i, j \in V_G(6)$ 式中: $\alpha_i, \beta_i$ 和 $\gamma_i$ 为成本函数的系数; $G_i(k)$ 为发电机j 的功率输出。

式(4)和式(6)分别为严格凹函数和凸函数。

发电机可以通过以每千瓦时 ξ 元的价格出售电 能来获利,所以发电机的总收入为

$$S_{j}^{\text{DG}}(k) = \xi G_{j}(k) - C_{j}(G_{j}(k)), j \in V_{\text{G}}$$

$$P_{i}(k), i \in V_{\text{D}} \text{ bisc(CST)}$$

$$(7)$$

$$P_{i}(k) = \begin{cases} (u_{i} - \lambda_{i}^{\text{Load}}(k+1)) / (2d_{i}), 0 < P_{i}(k) < P_{i,\text{max}} \\ P_{i,\text{max}}, & P_{i}(k) \ge P_{i,\text{max}} \end{cases} (8)$$

式中: $\lambda_i^{\text{Load}}(k+1)$ 为负荷 *i* 在第 *k*+1 次迭代时的增量 成本;Pima 为每个负荷的最大功率需求。

 $G_i(k), j \in V_G$ 的迭代公式为  $G_{j}(k) = \begin{cases} (\lambda_{j}^{DG}(k+1) - b_{j}) / (2a_{j}), 0 < G_{j}(k) < G_{j,max} \\ G_{j,max}, & G_{j}(k) \geq G_{j,max} \end{cases}$ (9)

式中: $\lambda_i^{DG}(k+1)$ 为发电机;在第 k+1 次迭代时发电 机的增量成本;Gimax 为每个发电机的最大功率容量。

此外,目标函数也受到每个发电机的最大功率 容量和每个负荷的最大功率需求约束。约束条件为

$$\sum_{j \in V_c} G_j(k) = \sum_{i \in V_0} P_i(k)$$

$$0 < G_j(k) \le G_{j,\max}, 0 < P_i(k) \le P_{i,\max}$$
(10)

式(10)为仿射函数,则优化问题可以建立为

$$\min\left(\sum_{j \in V_{c}} C_{j}(G_{j}(k)) - \sum_{i \in V_{u}} U_{i}(P_{i}(k))\right)$$
  
s.t. 
$$\sum_{j \in V_{c}} G_{j}(k) = \sum_{i \in V_{u}} P_{i}(k)$$
 (11)

各机组的最优运行点即为式(11)的最优解。

#### 3 方案的实施与分析

#### 3.1 基于增量成本共识的经济调度算法

求解式(11)的分布式算法步骤如下。 1) 增量成本更新。

$$\lambda_i^{\text{Load}}(k+1) = \sum_{s \in N_i} a_{is} \lambda_s(k+1) + \eta \Delta P_i(k) \quad (12)$$

$$\lambda_{j}^{\text{DG}}(k+1) = \sum_{s \in N_{j}} a_{js} \lambda_{s}(k+1) + \eta \Delta G_{j}(k) \qquad (13)$$

式中: $\lambda_{s}(k+1)$ 为负荷 *i* 或发电机 *j* 的邻居节点 *s* 在 第k+1次迭代时的增量成本: $\eta$ 为收敛系数。

2) 按式(8) 和式(9) 更新输出功率。

3)局部失配功率更新。

$$\Delta P_i(k+1) = \sum_{s \in N_i} a_{is} \Delta P_s(k) + P_i(k+1) - P_i(k) \quad (14)$$

$$\Delta G_{j}(k+1) = \sum_{s \in N_{j}} a_{js} \Delta P_{s}(k) + G_{j}(k) - G_{j}(k+1) \quad (15)$$

式中: $\Delta P_i(k+1)$ 为负荷 i 在第 k+1 次迭代时的局部 失配功率: $\Delta G_i(k+1)$ 为发电机*i*在第*k*+1次迭代时 的局部失配功率: $\Delta P_{i}(k)$ 为负荷 i 的邻居节点 s 在第 k+1次迭代时的局部失配功率; $\Delta G_i(k+1)$ 为发电机 i的邻居节点 s 在第 k+1 次迭代时的局部失配功率。

虽然功率  $P_i(k)$  和  $G_j(k)$  没有被传递, 但它通 过迭代规则式(12)—式(15)与传递的增量成本和 局部失配功率密切相关。因此, 如果攻击者知道迭 代规则并能够访问所传递的信息, 则可以推断出负 荷的用电量。如果攻击者知道所有的真实信息, 通 过分析数据序列 { $\lambda_i^{\text{load}}(0), \lambda_i^{\text{load}}(1), \dots, \lambda_i^{\text{load}}(k)$ }, { $\lambda_j^{\text{DC}}(0), \lambda_j^{\text{DC}}(1) \dots, \lambda_j^{\text{DC}}(k)$ }{{ $\lambda_j^{\text{DC}}(0), \Delta G_j(1), \dots, \Delta G_j(k)$ }, 即可揭示发电量和 用电量对电价的敏感性, 因此制定隐私保护方案具 有重要的现实意义。

#### 3.2 基于差分隐私保护的经济调度方案

在分布式算法下,每个节点 $i,i \in V_{\rm D}$ 和 $j,j \in V_{\rm G}$ 在 每次迭代中都须传递增量成本和局部失配功率给它 的邻居节点 $s,s \in V$ 。由于传递信息是私有的,所以 保护隐私的最简单方法是让节点向其邻居节点传递 噪声信息。假设节点在第k次迭代时向邻居节点传递 递的有噪声的信息用 $\theta(k)$ 表示。在数据管理器的 信息收集阶段,通过向消费者的私人数据中添加高 斯噪声来保证其消费隐私,这个噪声扰动过程可以 看作是一个随机化函数。每个节点通过式(16)更新 增量成本和局部失配功率。

$$\begin{cases} l_{i}^{\text{Load}}(k+1) = \sum_{s \in N_{i}} a_{is} l_{s}(k+1) + \eta \Delta P_{i}(k) + \theta_{1}(k) \\ l_{j}^{\text{DG}}(k+1) = \sum_{s \in N_{j}} a_{js} l_{s}(k+1) + \eta \Delta G_{j}(k) + \theta_{1}(k) \\ \Delta P_{i}(k+1) = \sum_{s \in N_{i}} a_{is} \Delta P_{s}(k) + P_{i}(k+1) - P_{i}(k) + \theta_{2}(k) \\ \Delta G_{j}(k+1) = \sum_{s \in N_{j}} a_{js} \Delta P_{s}(k) + G_{j}(k) - G_{j}(k+1) + \theta_{2}(k) \end{cases}$$
(16)

式中: $\theta_1(k)$ 和 $\theta_2(k)$ 为随机产生的不同噪声信号,须满足式(17)。

$$\sum_{k=1}^{\infty} |\theta_1(k)| \le H, \sum_{k=1}^{\infty} |\theta_2(k)| \le H$$
(17)

式中:H为足够小的实数,且满足H≥0。

以负荷的增量成本和局部失配功率加入噪声信 号为例, $\theta_1(k) \sim N(0,(\sigma_i(k)^2), \theta_2(k) \sim N(0,(\sigma_i(k)^2),$ 即 $\theta_1(k)$ 和 $\theta_2(k)$ 均值为0,协方差为 $\sigma_i(k)^2$ ,可知高 斯函数的概率密度函数为

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_i(k)} e^{-z^2/2(\sigma_i(k))^2}$$
(18)

式中:z为高斯分布中的随机变量。

 $\theta_1(k)$ 和 $\theta_2(k)$ 的概率密度为:

$$f_{\theta_{i}(k)}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \,\sigma_{i}(k)} e^{-(z-\theta_{i}(k))^{2}/2(\sigma_{i}(k))^{2}} \quad (19)$$

$$f_{\theta_{z}(k)}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{i}(k)} e^{-(z-\theta_{z}(k))^{2}/2(\sigma_{i}(k))^{2}}$$
(20)

 $\theta_1(k)$ 相对于 $\theta_2(k)$ 的KL散度  $D_{\text{KL}}[\theta_1(k)||\theta_2(k)]$ 为

$$D_{\mathrm{KL}}[\theta_{1}(k)||\theta_{2}(k)] = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{\theta_{1}(k)}(z) \ln \frac{f_{\theta_{1}}(z)}{f_{\theta_{2}}(z)} \mathrm{d}z \leq \frac{o_{i}^{2}(k)}{2(\sigma_{i}(k))^{2}} = \varepsilon_{i}(k)$$

$$(21)$$

式中: $o_i^{2}(k)$ 为加噪前后第k次迭代负荷功率需求之差; $\varepsilon_i(k)$ 为 $\varepsilon$ -KL隐私的误差阈值。

类 似 地,  $\theta_2(k)$  相 对 于  $\theta_1(k)$  的 KL 散 度  $D_{\text{KL}}[\theta_2(k)||\theta_1(k)]$ 为

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f_{\theta_{2}(k)}(z) \ln \frac{f_{\theta_{2}(k)}(z)}{f_{\theta_{i}(k)}(z)} dz \leq \frac{o_{i}^{2}(k)}{2(\sigma_{i}(k))^{2}} = \varepsilon_{i}(k)$$

$$(22)$$

则  $\theta_1(k)$  和  $\theta_2(k)$  对  $\lambda_i^{\text{Load}}$  和  $\Delta P_i$  可以实现不同 的收敛性,与此同时  $\lambda_i^{\text{Load}}(k)$  和  $\Delta P_i(k)$ 也实现了  $\varepsilon$ -KL 隐私。对于发电机的增量成本及局部失配功率 同理可实现  $\varepsilon$ -KL 隐私,且在该收敛规则下可以收敛 到系统最优运行点。

$$\lim_{k \to \infty} \lambda_i^{\text{Load}}(k) = \lim_{k \to \infty} \lambda_j^{\text{DG}}(k) = \lambda^*$$
(23)

$$\lim_{k \to \infty} \Delta P_i(k) = 0, \lim_{k \to \infty} \Delta G_j(k) = 0$$
(24)

式中: λ\* 为系统增量成本的最优运行点。

此时,除节点自身外,其他的邻居获取到的信息都是经过加噪后的非真实数据,以负荷的局部失配功率为例,如果每个节点i设置 $\Delta P_i(0) = -P_i(0) \neq 0$ ,则确切的 $P_i(0)$ 将不会透露给攻击者。此外,由于每个节点都利用真实的局部状态进行状态更新,而攻击者只知道噪声状态,因此推断私有信息的难度更大,意味着隐私程度可能更高。因此,通过基于差分隐私的经济调度方案式(16)可以实现终值的收敛性和最优性,同时保护负荷隐私和电力消耗对电价敏感度隐私。

#### 4 仿真分析案例

为验证所提出的基于差分隐私保护的经济调度 方案在智能电网中的有效性,采用 MATLAB 对 IEEE 39 节点系统进行了详细的数值仿真。该系统 的通信拓扑结构设计为强连通,以确保各节点之间 的信息流畅传递,并且连接矩阵满足行随机特性,从 而增强系统的稳定性和可靠性,具体结构如图2所 示。为更清晰地展示仿真结果,选择 IEEE 39节点 系统中的4台发电机组和4个负载进行深入分析。 各机组的参数设置详见表1和表2,这些参数的合理 配置为经济调度方案的有效性提供了必要的基础。 在仿真过程中,设定收敛系数 η=7×10<sup>-4</sup>,此参数的选 择旨在平衡算法的收敛与精度,以确保在满足隐私 保护的前提下,实现高效调度决策。



Fig.2 IEEE 39 node communication topology diagram

表1 智能电网各发电机参数 Table 1 Generator parameters in smart grid

参数	DG1	DG2	DG3	DG4
容量/kW	[30,300]	[20,175]	[43,171]	[24,132]
α/(美元/kW <sup>2</sup> h)	0.020 0	0.010 0	0.022 0	0.031 0
$\beta/(美元/kWh)$	7.88	7.85	7.82	7.80
γ/(美元/h)	460	510	130	310

	表2	智能电网各负荷参数
Table	e 2 Loa	ad parameters in smart grid

			-	
参数	Load1	Load2	Load3	Load4
容量/kW	[50,100]	[40,160]	[40,180]	[30,200]
d/(美元/kW <sup>2</sup> h)	0.020 0	0.080 0	0.052 2	0.031 0
u/(美元/kWh)	17.88	27.85	17.82	17.80

表 1 和表 2 中  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别为二次发电成本参数、一次发电成本参数和常数项发电成本参数;d、u

分别为二次、一次负荷机组的效益参数;DG1—DG4 为1号—4号发电机;Load1—Load4为1号—4号负 荷。以DG1和Load1为例,DG1的容量范围为[30, 300]kW,表示其额定发电能力的下限和上限分别为 30kW和300kW;Load1的容量范围为[50,100]kW, 表示其电力需求的下限和上限分别为50kW和 100kW。在上述场景和参数设置下验证了算法。对 式(12)—式(15)的收敛性能的验证如图3所示,发电机 组和负荷的最优增量成本收敛至8.6862美元/kWh。 各机组和负荷率输出如图4所示,在达到稳态后各 机组的输出功率保持不变,机组达到算法下的最优 运行状态。



Fig.3 Incremental cost convergence state for each unit



发电机组和负荷局部失配功率和总供需情况 如图 5、图 6 所示。局部失配功率收敛至 0,输出功 率总和与需求功率总和最终一致,这意味着整个系 统中供需达到平衡状态且各个机组都处于自身的 最优运行状态,此状态下智能电网整体实现了最优 调度。



Fig.6 Total supply and demand for units

相应地,基于差分隐私保护的经济调度式(16) 的收敛情况如图 7一图 10 所示。图 7 为各发电机组 和负荷的增量成本收敛情况,最优增量成本收敛至 8.686 2 美元/kWh,与传统的分布式算法收敛至相同 的结果,表明了所提出算法的有效性。各机组的局 部失配功率的变化情况如图 9 所示,随着迭代的进 行,局部失配功率逐渐趋近于 0,这意味着各个机组 的邻居已经不存在局部功率差值,且自身功率量不 再发生变化,各机组的运行已经达到稳定状态。根





据卡罗需-库恩-塔克条件(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)最优性条件,此时各机组都在保证功率供给的 情况下实现了全局最优经济调度。



Fig.8 Power output of each unit under differential privacy protection scheme





privacy protection scheme



differential privacy protection program

图 11 为在 Paillier 加密算法保护下的各机组传 输增量成本情况,可以看出所有的数据均通过加密 方式进行传输。图 12 为各机组的总供需情况,可以 看出由于供需在收敛状态下未完全达到平衡,因此 该算法也未收敛至最优。这是由于量化过程和加密 过程产生的误差导致的。在配备 3.1 GHz Intel Core i9 处理器和 32 GB 内存的笔记本电脑上,比较两个 算法的计算复杂度,Paillier 加密算法迭代 300 次需 要 1.861 s,而基于差分隐私保护的经济调度的方案 仅需 0.012 s。该仿真验证了所提方案的可行性和优 越性。





Fig.11 Incremental transmission cost of each unit under Paillier encryption algorithm





综上所述,基于差分隐私保护的经济调度的方案,与传统分布式算法相比,隐私保护程度更高,且 都能达到最优运行状态;相比于 Paillier 加密算法, 在计算复杂度和最优性方面均有优势。

#### 5 结束语

通过构建基于需求响应的框架,文中引入服从

正态分布的高斯噪声的同时,量化了隐私保护的效果,有效保护了智能电网和负荷的隐私信息。仿真 结果验证了所提方案在智能电网经济调度过程中能 有效防范隐私披露问题。未来的研究将进一步聚焦 智能电网或综合能源系统中的隐私保护挑战,致力 于提升隐私保护方案的安全性和适用性。

#### 参考文献

- [1] 张瑶嘉,高岩.基于 ADMM-GBS 的考虑风光不确定性的智能电网实时电价策略[J].分布式能源,2023,8(6):27-35.
   ZHANG Yaojia, GAO Yan. Real-time price strategy for smart grid considering wind and solar power uncertainty based on ADMM-GBS[J]. Distributed Energy,2023,8(6):27-35.
- [2] 陈涛,邢金晶,刘闯,等.基于改进PSO-DE融合算法的风电场 储能容量优化配置[J].山东电力技术,2023,50(1):8-13.
   CHEN Tao, XING Jinjing, LIU Chuang, et al. Optimal allocation of wind farm energy storage capacity based on improved PSO-DE fusion algorithm[J].Shandong Electric Power,2023,50(1):8-13.
- [3] 罗其华,李平,张少迪.考虑需求响应和阶梯碳交易的虚拟电厂 低碳经济调度[J].浙江电力,2023,42(6):51-59.
   LUO Qihua, LI Ping, ZHANG Shaodi. Low-carbon and economic scheduling of virtual power plant considering demand response and stepwise carbon trading[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(6): 51-59.
- [4] 张雪莹,曾强,陈腾生.基于一致性理论的主动配电网分层分区 经济性协调控制研究[J].电气自动化,2024,46(1):47-51. ZHANG Xueying, ZENG Qiang, CHEN Tengsheng. Research on economic coordination control of active distribution network hierarchical zoning based on consistency theory [J]. Electrical Automation,2024,46(1):47-51.
- [5] 吕朋蓬,赵晋泉,苏大威,等.基于一致性理论的独立微电网分 布式动态经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(5):22-29.
   LYU Pengpeng,ZHAO Jinquan,SU Dawei, et al.Consensus-based distributed dynamic economic dispatching for islanded microgrids
   [J].Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5):22-29.
- [6] 卢梦蝶,宁涛,王德佳,等.基于多智能体一致性的多微电网分 布式经济调度[J].电气自动化,2022,44(2):21-24.
   LIU Mengdie, NING Tao, WANG Dejia, et al. Multi - agent consensus-based distributed economic dispatch method in a multimicrogrid[J].Electrical automation,2022,44(2):21-24.
- [7] 胡诗尧,安佳坤,韩璟琳,等.基于一致性算法的智能电网储能 单元分布式调度策略[J].沈阳工业大学学报,2019,41(4): 372-377.

HU Shiyao, AN Jiakun, HAN Jinglin, et al. Distributed scheduling strategy of smart grid energy storage units based on consistency algorithm[J].Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(4):372-377.

- [8] 安宝祥,陈珍萍,贺文,等.基于一致性的智能微电网多目标经济调度研究[J].计算机仿真,2023,40(10):86-93.
  AN Baoxiang, CHEN Zhenping, HE Wen, et al. Consensus-based multi-objective economic dispatch method in smart microgrid[J].
  Computer Simulation,2023,40(10):86-93.
- [9] WANG R, LI Q Q, LI G G, et al. A gossip-based distributed algorithm for economic dispatch in smart grids with random communication link failures [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6):4635-4645.
- [10] 张翰林,汪睿哲,刘友波,等.考虑源荷碳势耦合的电力系统双层低碳经济调度[J].电力建设,2023,44(12):28-42.
   ZHANG Hanlin, WANG Ruizhe, LIU Youbo, et al. Two-stage low-carbon economic scheduling of power system considering source-load carbon intensity coupling [J]. Electric Power Construction, 2023,44(12):28-42.
- [11] 赵佩尧,李正烁,高晗,等.电-气-热综合能源系统协同调度优化研究综述[J].山东电力技术,2024,51(4):1-11.
  ZHAO Peiyao, LI Zhengshuo, GAO Han, et al. Review on collaborative scheduling optimization of electricity-gas heat integrated energy system [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51 (4):1-11.
- [12] 王建元.基于多智能体一致性的港口微电网分布式能源管理 [D].大连:大连海事大学,2023.
- [13] 周鹏,刘若琳,陈追潇,等.基于数据共享框架的电网隐私保护研究[J].制造业自动化,2023,45(5):7-12.
   ZHOU Peng, LIU Ruolin, CHEN Xiaoxiao, et al. Research on power grid privacy protection based on data sharing framework [J].
   Manufacturing Automation, 2023, 45(5):7-12.
- [14] 王思诚.基于分布式隐私保护算法的智能电网经济调度研究 [D].西南大学,2024.
- [15] 黄博南, 詹凤楠, 张天闻, 等. 一种针对电-热综合能源系统经济 调度的 DoS 最优攻击策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (21):6839-6854.

HUANG Bonan, ZHAN Fengnan, ZHANG Tianwen, et al. An optimal DoS attack strategy against the economic dispatch for electric-thermal integrated energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21):6839–6854.

[16] DUAN J, CHOW M Y.A novel data integrity attack on consensusbased distributed energy management algorithm using local information[J].IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3):1544-1553.

- [17] 陈春宇,涂歌,臧天磊,等.面向多主体隐私保护的源网荷储分 布式协同优化调度[J].工程科学与技术,2024,56(2):45-54.
   CHEN Chunyu, TU Ge, ZANG Tianlei, et al. Privacy-preserving multi-agent coordinated economic dispatch with generation-gridload - storage interaction [J]. Advanced Engineering Sciences, 2024,56(2):45-54.
- [18] 郭佳兴,王金梅,张海同.基于虚拟电厂的多能源协同系统调度 优化策略[J].电力建设,2022,43(12):141-151.
   GUO Jiaxing, WANG Jinmei, ZHANG Haitong. Scheduling optimization strategy based on virtual power plant for multi-energy collaborative system [J]. Electric Power Construction, 2022, 43 (12):141-151.
- [19] 詹成康,李晓露,陆一鸣,等.基于集群的主动配电网双层分布 式优化调度策略研究[J].电气传动,2023,53(1):81-90.
   ZHAN Chengkang,LI Xiaolu,LU Yiming, et al. Research on twotier distributed optimal dispatch strategy of active distribution network based on cluster[J].Electric Drive,2023,53(1):81-90.
- [20] 杨飞生,刘佳明,丁瑞森,等.基于半同态加密体制的安全分布 式经济调度[J/OL].控制理论与应用:1-9[2024-09-22].http:// kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20240416.0935.022.html.
  YANG Feisheng, LIU Jiaming, DING Ruisen, et al. Secure distributed economic dispatch based on semi -homomorphic encryption [J/OL].Control Theory & Applications:1-9[2024-09-22]. http: // kns. cnki. net / kcms / detail / 44.1240. TP.20240416.0935.022.html.

收稿日期:2024-09-25

修回日期:2024-12-14

作者简介:

解国庆(1983),男,工程师,主要研究方向为电力生产数字化建 设及自动控制;

梁 添(1988),男,工程师,主要研究方向为电力生产数字化建 设及自动控制;

周兵兵(1998),男,主要研究方向为电力生产数字化建设及自动 控制;

李鸿伟(1987),男,工程师,主要研究方向为电力生产数字化建 设及自动控制;

付文龙(1988),通信作者(ctgu\_fuwenlong@126.com),男,博士, 副教授,主要研究方向为电力系统建模、人工智能应用等。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.004

·配电网·

# 基于双层优化柔性共享VDAPF的配电网谐波治理

朱岩松1\*,谢振刚2,黄志敏3,叶梦豆4,江友华1

(1.上海电力大学电子与信息工程学院,上海 200120;

2. 国网江西省电力有限公司赣州市赣县区供电分公司,江西 赣州 341100;

3.广东电网有限责任公司广州供电局,广东 广州 510900;4.国网上海送变电工程有限公司,上海 201101)

摘要:随着配电网络大规模接入,谐波污染呈现出高密度、分散和网络化特征,传统点对点谐波控制方法无法满足要求, 对此提出一种兼顾配电网多谐波源治理成本和效果的基于谐波发射权重和灵敏度分析的有源滤波器双层优化配置方 法。首先,建立谐波发射权重模型,通过谐波治理灵敏度分析,构建以电压检测型有源电力滤波器(voltage detection active power filter, VDAPF)接入点为参照的谐波防治区划;其次,采用两层优化模型对其进行求解,外层以 VDAPF最小运行成 本为目标函数,内层以治理后电压畸变率最低为目标函数,并用改进多目标秃鹫算法进行求解,得到有源电力滤波器 (active power filter, APF)的最佳安装数量、位置和容量。最后,以IEEE 33节点为例,对所提算法进行仿真研究,以检验所 提算法在电网谐波治理中的应用效果。

关键词:谐波源;有源滤波器;双层优化;配电网;谐波治理;多目标秃鹫算法;柔性共享
 中图分类号:TM761
 文献标志码:A
 文章编号:1007-9904(2025)04-0029-11

# Harmonic Mitigation in Distribution Network Based on Dual-level Optimization Flexible Shared Voltage Detection Active Power Filter

ZHU Yansong<sup>1\*</sup>, XIE Zhengang<sup>2</sup>, HUANG Zhimin<sup>3</sup>, YE Mengdou<sup>4</sup>, JIANG Youhua<sup>1</sup>

(1.School of Electronic and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200120, China;

2.State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd.Ganzhou Ganxian District Power Supply Branch, Ganzhou 341100, China;

3.Guangdong Power Grid Co., Ltd.Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510900, China.

4. State Grid Shanghai Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Shanghai 201101, China)

Abstract : With the large-scale integration of distribution networks, harmonic pollution presents characteristics of high density, decentralization, and networked behavior. Traditional point-to-point harmonic control methods cannot meet the requirements. To address this, this paper proposes a dual-layer optimization configuration method for active filters, based on harmonic emission weighting and sensitivity analysis, which balances both the cost and effectiveness of multi-harmonic mitigation in distribution networks. Firstly, a harmonic emission weight model is established, and through sensitivity analysis of harmonic mitigation, a harmonic prevention zone is constructed based on the voltage detection active power filter (VDAPF) access point as reference; Secondly, the dual-level optimization model is employed to solve the problem. The outer layer of the optimization model has the objective function of minimizing the operating cost of the VDAPF, while the inner layer has the objective function of minimizing the optimal installation. The improved multi-objective vulture algorithm is used to solve the problem and obtain the optimal installation quantity, location, and capacity of active power filter (APF). Finally, taking the IEEE33-bus system as an example, simulation studies are conducted to verify the application performance of the proposed algorithm in harmonic mitigation within the power grid.

Keywords: harmonic source; active filter; dual-layer optimization; distribution network; harmonic mitigation; multi-objective vulture algorithm; flexible sharing

#### 0 引言

传统电网的谐波源数量较少且散布广泛,主要 集中于某些用户群体,通过定向治理措施即可有效

**基金项目:**上海市自然科学基金项目"区域电网内多谐波源解耦治理 及其协同优化策略研究"(21ZR1424800)。

Shanghai Natural Science Foundation "Research on Decoupling Control and Collaborative Optimization Strategy of Multiple Harmonic Sources in Regional Power Grid" (21ZR1424800).

调控全网谐波状况,此策略可称为"精确靶向"控 制<sup>[1-2]</sup>。在电力电子配电架构内,个别功率电子器件 引发的谐波影响颇为有限,可视为谐波生成的微小 因素。但当多个此类微小因素相互作用并累积时, 其综合效应变得显著,促使配电系统中谐波污染呈 现出高密度、广泛且网络交织的特性<sup>[3-4]</sup>。随着电 力技术不断进步,有源滤波已成为电力系统接入的 重要工具,其核心机制在于利用有源负载路径上的 谐波监测与电流补偿控制,达成谐波的高效管理 目标。

在分布式谐波管理的研究领域,文献[5]聚焦 于分布式电压源型有源电力滤波器 (voltage detection active power filter, VDAPF), 深入剖析了其 在谐波管理系统中的稳定性表现,揭示了 VDAPF 凭 借独特的导向特性,能有效引导谐波电流沿特定路 径释放,为"双高"配电网络的去中心化、网络化调控 提供了坚实的支撑。文献[6]则进一步提出了 VDAPF 的控制策略,该策略在谐波补偿领域取得了 一定成果,为VDAPF的实际部署开辟了新路径。为 提升多 VDAPF 间的协同作业效率,本研究借鉴其思 路,在既有基础上构建了基于电压直接控制的多 VDAPF 协同框架,旨在优化整体的谐波治理成效。 针对共联点(point of common coupling, PCC)谐波问 题,尽管文献[7]等已有初步探讨,但传统按容量比 例分配 VDAPF 的方法因忽视谐波分布的局部特性 而展现出局限性。本研究强调,实际治理策略应依 据各区域实时的谐波污染状况动态调整,通过偏微 分方程组的协同控制,实现调节容量的精确配置。 文献[8]从不同视角探索了谐波治理与能源管理的 创新融合,构建了独立微网的动态经济调度模型,并 讨论了基于趋同原理的分布式实施策略。文献[9] 利用趋同算法实现储能单元间的最优功率分配,提 出了选择性闭环并联有源滤波器及基于 PCC 谐波电 压的动态增益调整方案,拓宽了谐波治理的技术视 野。文献[10]证明了静态有源电力滤波器(static active power filter, SAPF)在谐波检测中的自主性与 高效性,其直接利用 PCC 局部电压信息进行谐波检 测,展示了卓越控制效能。文献[11]借助小波分析 与回归模型系数波动性分析,深入探究了电力系统 谐波源在故障状态下的稳态变迁特性,为故障辨识 与数据筛选提供了理论基础。前述文献主要聚焦于 电力系统多谐波源治理策略的优化,而较少触及优 化过程中的经济成本考量,这在应对高比例电力电 子化电网带来的分散且全网覆盖的谐波污染挑战 时,显得尤为重要。

本文引入谐波发射权重,探索一种既考虑谐波 污染控制成本又兼顾控制效果的共享治理策略,并 设计 APF 的选址与容量配置的双层优化模型。并通 过 IEEE 33 节点配电网络的模拟实验,验证了所提 出方法的有效性和实用性,以期全面提升电网的运 行安全性与可靠性。

#### 1 柔性共享谐波治理策略

#### 1.1 谐波治理模型

当前谐波治理设备的配置策略多依据接入点 的谐波发射额定值设计,但新型电力系统中的谐波 源展现出显著的波动性,其发射量往往远低于额定 值,导致治理设备长期处于低负载状态,引发补偿 容量闲置和年运行效率偏低等资源配置问题,降低 了整体效益<sup>[12-13]</sup>。依据谐波源的活跃程度,将其分 为活跃型、温和型及波动型三类,并探索相应的配 置策略:基准容量治理、共享容量治理及二者结合 的混合配置,旨在提升治理设备的配置精确度和 效率。

1)活跃型谐波源。其谐波发射权重较高,且长 期接近额定发射值上限。采用针对性的基准谐波治 理方式,即配置与谐波发射额定值相匹配的治理设 备,实现就近高效治理。谐波发射量可计算为

$$p_{t,i}^{\text{adjust}} = p_{t,i}^{\text{origin}} - p_{t,i}^{\text{IL,max}} \delta_i \tag{1}$$

式中: $p_{t,i}^{\text{origin}} 与 p_{t,i}^{\text{adjust}}$ 分别为谐波源 *i* 在 *t* 时刻的基本谐 波发射量和变化的谐波发射量; $p_{t,i}^{\text{IL,max}}$ 为谐波源 *i* 在 *t* 时刻最大的谐波波动量; $\delta_i$ 为谐波源 *i* 谐波发射量波 动的有效率。满足  $0 \le p_{t,i}^{\text{IL}} \le p_{t,i}^{\text{IL,max}}, 0 \le \delta_i \le 1$ ,其中  $p_{t,i}^{\text{IL}}$ 为谐波源 *i* 在 *t* 时刻的谐波波动量。

2)温和型谐波源。温和型谐波源的谐波发射量 模型同活跃型谐波源,不过谐波表现更加温和。

3)波动型谐波源。指的是谐波发射权重在额定 值上限与低水平下限之间波动,须兼顾治理快速响 应与资源高效配置,故采用基准容量与共享容量相 结合的谐波治理配置策略。基准容量的治理装置迅
速处理谐波源的基准发射权重,而超出部分则由配置的共享容量治理装置进行滤除。该策略的数学模型<sup>[14-15]</sup>为

$$p_{t,i}^{\text{adjust}} = p_{t,i}^{\text{origin}} - p_{t,i}^{\text{trans}} \delta_i \tag{2}$$

式中: $p_{l,i}^{\text{trans}}$ 为谐波源  $i \neq t$ 时刻变化的谐波发射量,若  $p_{l,i}^{\text{trans}} > 0$ 表示正在减少谐波的当前状态, $p_{l,i}^{\text{trans}} < 0$ 表示 正在增加谐波的当前状态,满足  $0 \leq |p_{l,i}^{\text{trans}}| \leq p_{l,i}^{\text{trans}}$ ,  $\sum_{t=1}^{T} p_{l,i}^{\text{trans}} = 0$ 。其中, $p_{l,i}^{\text{trans,max}}$ 为谐波源  $i \neq t$ 时刻的最大 谐波发射量。

受各种不确定性因素影响,负载谐波发射水平 往往很难达到期望程度<sup>[16]</sup>。 $p_{t,i}^{II,max} 与 p_{t,i}^{trans,max}$ 所有数 据都是预期值,有可能出现偏差  $\Delta p_{t,i}^{II} 与 \Delta p_{t,i}^{trans}$ 。各种 不确定性因素造成的误差为:

$$\Delta p_{t,i}^{\mathrm{IL}} = p_{t,i}^{\mathrm{IL,max}} \theta_i \vartheta \tag{3}$$

$$\Delta p_{t,i}^{\text{trans}} = p_{t,i}^{\text{trans},\max} \theta_i \vartheta \tag{4}$$

式中: $\theta_i$ 为谐波源*i*的偏差水平,满足  $0 \le \theta_i \le 1$ ; $\vartheta$ 为谐 波来源的偏离程度,是取值范围为[-1,1]的均值为 0的随机变量。考虑不确定,式(2)可以表示如式(5) 和式(6)所示。

$$0 \leq p_{\iota,i}^{\mathrm{IL}} \leq p_{\iota,i}^{\mathrm{IL,max}} - \Delta p_{\iota,i}^{\mathrm{IL}}$$

$$(5)$$

$$0 \le \left| p_{\iota,i}^{\text{trans}} \right| \le p_{\iota,i}^{\text{trans,max}} - \Delta p_{\iota,i}^{\text{trans}}$$
(6)

对谐波源 i 而言,  $p_{\iota,i}^{\Pi,\max} - \Delta p_{\iota,i}^{\Pi} = \int p_{\iota,i}^{\text{trans,max}} - \Delta p_{\iota,i}^{\text{trans,max}}$ 难以精确预测, 受概率约束限制, 即:

$$\Pr\left\{p_{t,i}^{\text{IL}} > p_{t,i}^{\text{IL},\max} - \Delta p_{t,i}^{\text{IL}}\right\} < 1 - q^{\text{IL}}$$
(7)

$$\Pr\left\{\left|p_{t,i}^{\text{trans}} > p_{t,i}^{\text{trans,max}} - \Delta p_{t,i}^{\text{trans}}\right|\right\} < 1 - q^{\text{trans}}$$
(8)

式中:pr{.}为发生约束的概率;q<sup>11</sup>、q<sup>tans</sup>均为概率置 信水平的界定值。在霍夫丁不等式的基础上,把概 率约束限制重新构造成一个线性模型。由此得到各 谐振*i*源的预测调整能力。

$$p_{l,i}^{\rm IL} < p_{l,i}^{\rm IL,max} - \sqrt{-2\ln(1-q^{\rm IL})} p_{l,i}^{\rm IL,max} \theta_i \tag{9}$$

 $p_{\iota,i}^{\text{trans}} < p_{\iota,i}^{\text{trans,max}} - \sqrt{-2\ln(1-q^{\text{trans}})} p_{\iota,i}^{\text{trans,max}} \theta_i \quad (10)$ 式中:  $\ln(\cdot)$ 为底数为 e 的对数。

# 1.2 分区治理架构

为实现多个波动性谐波源对预设治理装置的共 享利用,依据网格化区域内谐波的数量、类型及其治 理配置策略,深入探索多谐波源的共享治理机制,从 而在长时间尺度上达成网格区域内谐波发射总量与 治理装置共享容量的动态均衡,进而提升治理装置 的年度有效运行时长,优化资源配置效益<sup>[17-18]</sup>。图1 直观展示了新型配电网中多谐波源网格化分区治理 的研究框架。





VDAPF 在接入点及其邻近区域具有出色的谐 波控制能力,但在偏远区域其效果有限。对此,提出 了一种基于 VDAPF 的电力网络分区策略,该策略以 VDAPF 作为分区的控制核心,其他节点则作为受该 核心控制的节点,每个 VDAPF 负责其管理范围内受 控节点的谐波治理。通过调整控制节点 VDAPF 的 调节电导,可有效调节各受控节点的谐波电压,这是 实现区域谐波治理的关键所在。在 h 阶主要谐波 中,先确定可控节点 j 的谐波电压和节点 c 对谐波处 理的电导敏感性 w<sub>hic</sub> 为

$$\boldsymbol{w}_{h,j,c} = \frac{\partial \boldsymbol{U}_{h,j}}{\partial \boldsymbol{G}_{h,c}} \tag{11}$$

式中: $U_{h,j}$ 为可控节点j的h次谐波电压; $G_{h,c}$ 为h次 主要谐波节点c的设计等效电导。谐波电压等于谐 波电流与谐波阻抗之间的乘积,而谐波节点c的设 计等效电导对于谐波阻抗产生影响,因此谐波电压 与等效电导之间存在关联。由式(11)可知 $w_{h,j,c}$ 代表 在谐波节点c上的电导率的改变对可控节点j谐波 电压改变的幅度。

灵敏度 **w**<sub>h,j,c</sub> 可由谐波传输方程导出。谐波功率 流的限制条件为

$$\boldsymbol{U}_{h} = \boldsymbol{Y}_{h}^{-1} \boldsymbol{I}_{h} \tag{12}$$

式中: $U_h$ 为节点处的h次谐波电压; $I_h$ 为节点处的h次谐波电流矢量; $Y_h$ 为利用电力电网参量求出的h次谐波导纳矩阵。等效控制节点电导率 $G_j$ 出现在 $Y_h$ 的对角元素中,即为

$$\begin{bmatrix} U_{h,1} \\ \vdots \\ U_{h,j} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{h,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 + Y'_{11} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Y_{j1} & \cdots & G_j + Y'_{jj} & \cdots & Y_{jn} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & G_n + Y'_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{h,1} \\ \vdots \\ I_{h,j} \\ \vdots \\ I_{h,n} \end{bmatrix}$$
(13)

式中: $G_j$ 为可控节点j引入 VDAPF 的等效电导率,被控制节点  $G_j = 0$ ; $Y'_{jj}$ 为可控节点j的自导纳中除去  $G_j$ 后的部分。由于  $I_{h,j}$ 为预测量, $U_{h,j}$ 为由  $G_j$ 决定的因变量。

假设整个电网由 m 个控制节点和 n 个受控节点 组成,可得各受控节点的谐振电压与控制节点的等 效导电率之间的关系矩阵 S<sub>u-c</sub>为

$$S_{U-G} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{w}_{h,1,c_{1}} & \boldsymbol{w}_{h,2,c_{1}} & \cdots & \boldsymbol{w}_{h,n,c_{1}} \\ \boldsymbol{w}_{h,1,c_{2}} & \boldsymbol{w}_{h,2,c_{2}} & \cdots & \boldsymbol{w}_{h,n,c_{2}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{w}_{h,1,c_{m}} & \boldsymbol{w}_{h,2,c_{m}} & \cdots & \boldsymbol{w}_{h,n,c_{m}} \end{bmatrix}$$
(14)

在分区过程中,各个控制节点的谐波电导率变 化越大,则其对被控节点的控制能力越强。本文采 用如下策略进行电力系统的划分。

1)以各 VDAPF 访问节点作为分区的中央,将m的形状设为一个起始区。调谐灵敏度阈值 $\beta_{chre}$ ,将灵敏度矩阵 $S_{u-c}$ 每行按大小对齐,得到m个序列。 在此基础上提出一种电力系统网络拓扑结构。

2)当被控制节点谐波敏感度低于临界值时,对 矩阵 *S<sub>v-c</sub>* 将各节点所属的各栏按大小依次排列,并 对各被控节点进行共用处理设备分区,从而对边缘 节点进行 VDAPF 协同管控。

3)当被控制节点的谐波敏感性发生起伏时,对 矩阵 *S<sub>v-c</sub>* 将控制节点按其所属的栏进行顺序排列, 并将其分为基准和共享控制的范围。对电网中的谐 波处理设备进行配流能力与处理结果的最优选择。

此外,根据短时谐波预报的动态性,将其划分为 长期的、动态的调节。

#### 1.3 谐波治理装置容量

在实际电力系统中,源端输出的谐波电流具有 随机性,通过网络传播会对其他节点电压造成干 扰<sup>[19-20]</sup>。本文旨在通过调整 VDAPF 局部控制器的 当前工作点,来改变其控制强度,从而实现对电网局 部电压的鲁棒控制,以满足电网谐波不确定性治理 的需求。各控制节点的谐波发射量随时间波动,如 图 2 所示,图中起伏的曲线反映了这一变化。图 2 中,两条实线分别代表谐波发射权重的上限和下限, 而两条虚线则分别表示谐波治理设备的参考容量与 额定容量,同时这两条虚线也代表了谐波治理设备 的共享容量范围。





控制节点上的电压畸变程度能够体现该区域 的电压质量。当控制节点的谐波电压接近临界值 时,该区域的节点在谐波干扰下容易出现电压越限 情况<sup>[21-22]</sup>。然而,在某一范围内,如果系统中的谐 波电压相对于限值不是特别高,则不会导致电网电 压越限。在 VDAPF 中,节点电压总失真率的最大 值决定了可接受的电压畸变程度,并且该畸变的每 一阶谐波电压的基准值与谐波处理器的三阶控制 参数成正比<sup>[23]</sup>。通过设定各次谐波的导电值,可以 分别调节次谐波的电导,以达到控制谐波电压的 目的。

对 VDAPF 的各次谐波处理能力的调整程度进 行单独设定。将谐波源节点 c 注入控制区的谐波电 压设为  $U_{h,c}$ ,且电流扰动量矢量  $\Delta I_h$  是从谐波资料中 得到的,通常是已知量,一般以其在谐波辐射电平中 的百分数来表示。设节点 c 在此基础上,利用所推 导的区域谐波传输方程,计算出各节点处的谐波电 压扰动值  $\Delta U_{h,i}$ 。

$$\begin{bmatrix} \Delta U_{h,1} \\ \vdots \\ \Delta U_{h,i} \\ \vdots \\ \Delta U_{h,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & \Delta G_{h,c} + Y_{ii} \\ \vdots & & \vdots \\ Y_{(t+1)i} & \cdots & Y_{(t+1)i} \end{bmatrix}$$

此处研究在谐波电流中最严峻的情形,即每个 节点  $\Delta I_h$ 都取其上界值。进而可得使得方程成立的 最小谐和导通量  $\Delta G_{h,c}$ 。按最小调和规则  $\Delta G_{h,c}$ ,可以 求出局部操作特征下 h 阶谐波电导率调整程度的极 小值  $b_{emin}$  为

$$b_{cmin} = \frac{\Delta G_{h,c}}{U'_{h,c} - U_{h,c}}$$
(16)

式中:U<sup>*i*</sup><sub>h,c</sub>为给定被干扰后的谐波源节点 *c* 的 *h* 次电 压谐波值;U<sub>h,c</sub>为在电力扰动前,对谐波源节点 *c* 的 *h* 次谐波进行控制的变量。由式(16)可知,当电网谐 波电压过大时,*b*<sub>emin</sub>是保证某一区域内的控制节点 *c* 的谐波电导调节度最小值。

依据谐波辐射最大波动幅度来设定调节幅度, 确保谐波源端电流扰动在其变化区间内任意取值 时,该区域谐波电压均不超限;同时,结合电网实时 状况,动态优化系统运行特性参数。

# 2 双层优化配置模型

#### 2.1 双层模型架构

为最小化治理费用及单节点电压畸变,通过调整 VDAPF 的接入位置与容量作为优化变量,构建 了嵌套式双层优化框架。并在此基础上,详细阐述 了内外层最优决策变量间的相互关联,如图 3 所示。



图3 双层优化互动关系



$$\begin{array}{ccc} \cdots & \boldsymbol{Y}_{1(t+1)} \\ & \vdots \\ \cdots & \boldsymbol{Y}_{i(t+1)} \\ \ddots & \vdots \\ \cdots & \boldsymbol{Y}_{(t+1)(t+1)} \end{array} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{I}_{h,1} \\ \vdots \\ \Delta \boldsymbol{I}_{h,i} \\ \vdots \\ \Delta \boldsymbol{I}_{h,t} \end{bmatrix}$$
(15)

采用多目标秃鹫算法对目标函数进行优化,并 将电网负荷合理分配到运行层。随后,运行层将最 优布局位置与布局能力设为变量,通过外部优化模 型求解,筛选出最佳配置方案。通过内外两层循环 迭代,不断进行全局优化调整,最终获得既满足配电 网络谐波治理需求,同时能有效减少治理费用的有 源电力系统优化配置策略。

# 2.2 上层优化模型

1)高层优化模型的核心目标是实现电网谐波治 理费用的最小化<sup>[24]</sup>。通过对配电网络的深入分析, 构建 APF 购置、安装及维护成本与补偿容量之间的 数学函数关系为

$$\min F_{2} = \min \sum_{j=1}^{N} X_{j} (C_{0} + f V_{c,j})$$
(17)

式中: $F_2$ 为用来配置费用的函数; $X_j$ 为可控节点j的 VDAPF 安装值, $X_j$ =0 代表未安装, $X_j$ =1 代表已安装;  $C_0$ 为安装 VDAPF 的配电网络区域基础成本; $V_{e,j}$ 为 谐波源节点c注入可控节点j的 VDAPF 的安装量;f为采购 VDAPF 设备的成本;N 为受控节点数上限。

2) VDAPF 补偿容量约束。VDAPF 的接入能力 由输入的基波电压以及所生成的补偿电流所确定, 补偿容量约束 V<sub>i</sub>可以表达为

$$\begin{cases} V_{j} = U_{j}^{1}I_{j} = \sqrt{\sum_{h=6k\pm 1}^{H} (U_{j}^{1}\dot{I}_{j}^{h})^{2}} = \sqrt{\sum_{h=6k\pm 1}^{H} (V_{j}^{h})^{2}} \\ I_{j} = \sqrt{\sum_{h=6k\pm 1}^{H} |\dot{I}_{j}^{h}|^{2}} \end{cases}$$
(18)

式中: $I_j$ 为可控节点j的 VDAPF 存取一个节点后生成 补偿的当前电流有效值; $U_j^i$ 为可控节点j的基准电 压有效值; $V_j^h$ 为针对可控节点j的h次谐波生成的 VDAPF 的补偿能力; $I_j^h$ 为可控节点j的h次谐波电 流导数;H为谐波次数上限。

#### 2.3 下层优化模型

1)以配电网络中各个节点的谐波最小为目标, 以偏振有源滤波器的装设位置及装设容量作为决策 变量。目标函数为

$$\begin{cases} \min F_1 = \forall \left\{ \delta_{\text{THD}_i}, \delta_{\text{THD}_i}, \cdots, \delta_{\text{THD}_j} \right\} \\ \delta_{\text{THD}_j} = \sqrt{\sum_{h=6k\pm 1}^{H} (U_j^h)^2 / U_j^1} \times 100\% \end{cases}$$
(19)

式中: $F_1$ 为配电网各节点的谐波电压畸变率; $U_j^h$ 为配电网可控节点j的h次谐波有效电压值; $U_j^i$ 为配电网络中可控节点j的参考电压有效值; $\delta_{\text{THD}}$ ,为配电网络中可控节点j的谐波电压总失真, 为配电网络中可控节点j的谐波电压总失真, { $\delta_{\text{THD}}, \delta_{\text{THD}}, \dots, \delta_{\text{THD}}$ }为配电网中各节点电压畸变计算结果。

2)电流补偿系数约束。将补偿的概念系数α引 入电网接入节点处,通过调整设备产生的补偿电流 幅值,使得各个补偿电流在电网中的分配 I<sup>h</sup><sub>cj</sub> 与流入 负荷的谐波电流 I<sup>h</sup><sub>i</sub> 是反向的,补偿系数 δ<sub>THD</sub>。补偿 电流 Î<sup>h</sup><sub>ci</sub> 和谐波电流 Î<sup>h</sup><sub>i</sub> 可表示为

$$\hat{I}^{h}_{c,j} = -\alpha \hat{I}^{h}_{j} \tag{20}$$

式中: $\hat{I}_{j}^{h}$ 为可控节点j的h次谐波电流。为防止过调,  $\alpha$ 取值范围设定在[0, -1]。

3)节点总电压畸变率约束。在配电网络优化设 计时,必须保证各个可控节点的谐波、电压畸变都能 满足国家规定<sup>[25-26]</sup>。谐波电压失真度可表达为

$$\delta_{\text{THD}_{j}} = \sqrt{\sum_{h=6k\pm 1}^{H} (U_{j}^{h})^{2} / U_{j}^{1}} \times 100\% \leq \delta_{\text{THD}_{\text{max}}}$$
(21)

计算结果表明,在相应电压水平下,配电网络中 节点最大谐波失真率是允许的。

### 3 双层优化模型求解

在对谐波源实施有效分类与新型配电网网格化 分区后,须高效配置共享机制的谐波治理装置,以确 定各类型谐波适用的治理装置配置方式(基准容量、 共享容量或两者结合),优化配置位置,并合理设定 共享容量以平衡治理需求与资源利用。上下层优化 模型求解流程如图4所示。

双层优化模型流程如下。

步骤 1):数据准备与算法设置。将新型配电网的网络阻抗、支路信息、谐波源节点等空间信息及光伏、风电时序、负荷特性等时间尺度数据导入 MATLAB,并设定多目标秃鹫算法的相关参数(多目标秃鹫算法不再具体介绍)。

步骤 2):谐波潮流分析与初始配置。构建配电

网谐波导纳模型,进行谐波潮流计算,获取初始谐波 潮流信息。利用资源配置效益灵敏度分析,初步确 定谐波治理装置的配置位置。





步骤 3):上层模型初始方案生成。结合谐波治 理装置初始配置位置、谐波发射权重、波动区间、分 类信息及网格化分区数据,上层模型随机生成治理 装置的配置方式、基准容量及共享容量的初始方案。

步骤4):下层模型验证与优化。将初始方案传 递至下层模型,利用GUROBI求解器,考虑谐波发射 权重边界、峰谷波动容量、治理装置补偿容量、网格 化分区大小等约束以及电网安全稳定性与治理效果 目标,生成最优的治理装置类型、位置、共享容量方 案及其对应目标函数值。

步骤 5):上层模型反馈与评估。上层模型接收 下层结果,综合考虑资源配置效益的经济成本与治 理效果,计算每种方案的资源配置效益与治理效果 指标。

步骤 6):Pareto 最优解集更新与输出。将非支

配解加入 Pareto 最优解集,判断上层计算是否满足 停止条件。若不满足,则返回步骤3)继续迭代;若满 足,则输出存档中的 Pareto 最优解集,作为基于共享 机制的谐波治理装置优化方案的选择依据。

# 4 算例仿真

## 4.1 算例设置

以改良 IEEE 33 节点配电系统为实例,设定线路 参数:单位长度电阻值设为 0.58 Ω/km,单位长度电 感设为 2.2 mH/km,单位长度电容设为 26.7 μF/km。 选择总节点数的 30% 作为观测节点。针对 VDAPF 与分布式电源(distributed generation,DG)并网逆变 器的配置,设定如表 1 所示参数。为了进行配电网 的区域划分,引入谐波治理灵敏度指标,并依据此指 标将配电网划分为不同区域,结果如图 5 所示。在 图 5 中,填充底色标记出各分区,同时红色粗体节点 标记出所有观测节点。



图 5 IEEE 33 分区结构 Fig.5 Partitioned structure of IEEE 33-bus system

Та	ble 1 F	Param	eters c	of acces	ss devic	es	
<del>幺</del> 粉		D	G			VDAPF	
参奴 ·	1	2	3	4	1	2	3
位置(节点)	32	17	23	10	29	5	14

07

0.6

55A

55A

75A

容量/MW

0.8

1

表1 接入设备参数

在实例应用中,外层多目标优化算法采用秃鹫 算法,参数设置为:种群规模20、迭代次数40、学习 因子2、权重系数分别为0.8 与0.4。内层多目标优 化同样采用秃鹫算法,但参数有所不同,包括种群规 模 40、迭代时长 50、交叉概率分别为 0.8、0.1 和 0.2。 针对 IEEE 33 节点配电系统,为满足 SAPF 配置的实际需求,设定秃鹫算法中个体的变化范围为[1,10], 意味着该系统最多可容纳 10 个 SAPF。本研究选取 并网光伏、风机等节点的高次谐波导纳作为优化对 象,依据构建的谐波辐射加权模型,结合潮流计算技 术,得出各节点的等效电导数值。控制节点的电导 基准值如表 2 所示。

表2 控制节点电导基准值

Table 2 Reference values for control node conductivity

控制节点	5次谐波电导基准值	控制节点	5次谐波电导基准值
5	0.8	17	0.8
8	0.7	20	0.9
11	0.6	22	0.7
13	0.7	31	0.7

所提出的 APF 两层优化算法中,外层优化专注 于 APF 的安装数量,以秃鹫位置来直观表示。针对 经过改进的 IEEE 33 节点配电网案例,本研究重点 关注 5 次、7 次、11 次及 13 次谐波。表 3 详细列出了 在各谐振频率下,前 4 个关键节点的参与因子数据 (按降序排列。

表3 IEEE 33 节点系统的节点参与因子

Table 3 Node participation factors of IEEE33 node system

谐波次数		参与因子(位	<b>置</b> 节点序号)	
5	0.683 5(7)	0.643 7(18)	0.528 6(17)	0.380 9(29)
7	0.372 9(28)	0.351 4(2)	0.323 9(6)	0.302 8(22)
13	0.842 9(21)	0.461 9(12)	0.452 8(16)	0.432 6(21)

由表 3 可知,发现第 5 次、第 7 次、第 11 次和第 13 次谐波的谐振中心分别位于节点 7、节点 28、节点 13 和节点 21。为验证所提谐振电压治理方法的有 效性,设计谐波电流注入量的预测场景。设定两组 不同的谐波源电流注入场景,并观测在这些场景下, 各观测节点所接收到的各次谐波电流的幅值,结果 如图 6 所示,图中  $\bar{I}_{\rm sh}$ 、 $\bar{I}_{\rm 11h}$  和  $\bar{I}_{\rm 13h}$  分别为第 5 次、 第 7 次、第 11 次和第 13 次谐波电流均值。



#### 4.2 结果分析

提出一种创新算法,其中各区域控制器能够灵 活调整其管理范围内的治理设备输出,核心目标是 最大限度地降低区域节点的谐波电压畸变累积量, 力求将当前治理量与之前制定的长时间尺度(如日 前)治理计划之间的偏差保持在最小水平。经此算 法治理,得到节点谐波驻波电压畸变率基准值以及 明确波动区间,这些关键数据被直观地展示在 图7中。

在谐波波动的特定情境下,区域控制器能够在 极短时间内对区域内治理设备进行治理量的动态调 整与优化。如图7所示,经过治理,所有节点的总谐 波电压畸变率均成功达到预设的限值要求。当谐波 源电流的注入量处于预先设定的预测范围之内时, 各节点的仿射谐波电压畸变值均呈现出一种在限定 区间内的稳定波动状态。尤为重要的是,整个电力 网络中,所有节点的谐波电压畸变波动范围的最大 值均未超出严格设定的限值要求,从而验证所提方 法的有效性和可靠性。



为全面评估并验证所提算法性能,引入两种治 理模式进行对比分析。对比模式1:采纳文献[6]中 阐述的全局导纳重塑优化治理策略,该策略的核心 在于运用全局优化的技术手段对导纳进行重塑,以 此来实现对全网谐波谐振电压的有效治理。对比模 式2:引入文献[10]中描述的线路特征阻抗阻尼治理 方法,核心措施是在线路的末端安装阻尼装置,并将 阻尼的取值设定为线路的特性阻抗。

在3种对比模式设定中,针对各个观测节点赋 予不同权重系数:设定节点7权重为0.369、节点28 权重为0.328、节点21权重为0.213、其余观测节点 统一赋予较小权重值0.011。在保持谐波源电流注 入场景一致的条件下,分别采用3种不同的谐振电 压抑制策略对比分析。3种策略下治理前后各观测 节点的谐波谐振电压畸变率变化情况如图8所示。





由图 8 可知,采用本文所提算法可以显著地将 各个观测节点的谐振电压降低至预设限值以下,充 分展现了该治理策略在降低谐波谐振电压方面的卓 越性能。然而,与之形成鲜明对比的是,对比模式1 和对比模式2两种算法效果相对较弱,仍有一部分 观测节点的电压畸变率未能达到合格标准,这在一 定程度上揭示了该策略在应对复杂谐波问题时可能 存在的局限性。

3种不同方案在 Pareto 最优解空间中的分布情况如图 9 所示。由图 9 可知,在两个极端的 Pareto 最优解位置,3 种方案均实现了平均电压失真率与经济代价的最小化,说明 3 种方案在性能与经济性平衡方面均具有一定优势;随着经济费用的增加,即 APF 容量逐步增大,整体谐波失真率呈现降低趋势,反之当经济费用减少时, APF 容量减小,总谐波失真率相应上升。能够为实际应用中权衡成本与性能提供参考依据。



Fig.9 Comparison of Pareto optimal solutions

根据图9结果,在Pareto解集的广阔范围内,遵 循折中原则,确定一个既经济又高效的优化方案。 具体而言,该优化方案的经济费用为50.8万元,而总 电压畸变率为极低的1.8%。在相同的经济成本 (50.8万元)约束下,对比模式1算法通过安装有源 滤波器,将系统的总电压谐波畸变率降低至3.8%, 这一成果虽然已经达到了国家规定<sup>[5]</sup>的低于5%的 谐波畸变率标准,但与本文方法所实现的1.8%的总 电压畸变率相比,仍存在着较为明显的差距。对比 模式1与对比模式2的结果较为接近,不再赘述。 更为关键的是,本文方法在达到更低畸变率的同时, 还实现了经济成本的进一步优化。

## 5 结论

提出一种新的有源滤波器最优分配方法。通过 对 IEEE 33 节点的配电网络进行数值模拟,验证该 方法能以较低的成本、高效率地解决配电系统的谐 波去中心问题和全网化的污染问题。

1)提出根据谐波发射权重和电导灵敏度对谐波 进行分类治理,建立谐波发射权重模型,根据灵敏度 指标选取合适的治理点。

2)提出基于谐波发射权重和电导灵敏度的配电 网双层优化共享治理策略,外层以 VDAPF 最小运行 成本为目标函数,内层以治理后电压畸变率最低为 目标函数,并用改进多目标秃鹫算法进行求解,得到 APF 的最佳安装数量、位置和容量,以实现兼顾治理 效果和治理成本最优。

下一步,将研究 APF 的实时动态调整策略,以适应谐波源变化,提高治理实时性;探索 AI 技术在谐 波治理中的应用,如使用机器学习预测谐波趋势,优 化 APF 配置,以实现 APF 的实时动态预测调整,提 升系统的谐波治理响应速度。

#### 参考文献

- [1] CAO W, LIU K L, WU M M, et al. An improved current control strategy based on particle swarm optimization and steady-state error correction for SAPF [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4):4268-4274.
- [2] XUAN X F, CHANG Z Q, ZHANG Z W, et al. Design a wideband high-efficiency continuous class-GF power amplifier based on a source second harmonic manipulation architecture [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2024, 66(2):e34081.

[3] 唐爱红,宋幸,尚宇菲,等.基于分布式潮流控制器的海上风电 系统谐波治理方法和控制策略[J].电力系统自动化,2024,48 (2):20-28.

TANG Aihong, SONG Xing, SHANG Yufei, et al. Harmonic mitigation method and control strategy of offshore wind power system based on distributed power flow controller [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2):20–28.

- [4] YAN X W, HUANG S Q, LI R B, et al. Harmonic voltage compensation and harmonic current sharing strategy of gridforming inverter [J]. Electric Power Systems Research, 2025, 238: 111115.
- [5] LIU S Y, LIU C H, ZHAO H, et al. Improved flux weakening control strategy for five-phase PMSM considering harmonic voltage vectors[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 10967-10980.
- [6] 卜令岩,贾清泉,田书娅,等.电压检测型APF构成的分布式谐 波治理系统稳定性分析[J].电力系统自动化,2020,44(21): 99-106.

BU Lingyan, JIA Qingquan, TIAN Shuya, et al. Stability analysis for distributed harmonic mitigation system composed of voltage detection based active power filters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21):99–106.

[7] 石磊磊,贾清泉,林丽娟,等.电力电子化配电网谐波分布式全局优化治理策略[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2914-2924.

SHI Leilei, JIA Qingquan, LIN Lijuan, et al. Distributed global optimal harmonic mitigation strategy for power electronics high penetrated distribution networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(9):2914–2924.

- [8] YANG J N, DENG J L, ZHAO J H, et al. A novel parallel multiharmonic global multi – channel control algorithm for helicopter active vibration control [J]. Control Engineering Practice, 2024, 142:105772.
- [9] MUNIR H M, ZOU J X, XIE C, et al. Direct harmonic voltage control strategy of shunt active power filters suitable for microgrid applications [J]. Journal of Power Electronics, 2019, 19 (1) : 265-277.
- [10] WANG J Y, CHEN X X, LIU Y X, et al. Research on current harmonic suppression strategy of HSPMSM based on super twisting sliding mode control[J].Electrical Engineering, 2024:1-12.
- [11] ZHONG C, HE S B, SONG M X, et al.Study of harmonic control power amplifier technology based on improved modeling of bondwire [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2022, 32(10):e23317.
- [12] GAO F, BAI Z F. Frequency-adaptive odd-harmonic repetitive control scheme for three-phase shunt active power filters [J]. European Journal of Control, 2024, 79: 101078.
- [13] JAYAKUMAR T, RAMANI G, JAMUNA P, et al. Investigation and

validation of PV fed reduced switch asymmetric multilevel inverter using optimization based selective harmonic elimination technique [J].Automatika,2023,64(3):441-452.

- [14] ZHENG H R, XU F W, SHU Q, et al. Estimation of harmonic impedance and harmonic contribution with harmonic complex power in the absence of harmonic phase angle[J].IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(1):200-208.
- [15] RAMAN R, SADHU P K, KUMAR R, et al. Feasible evaluation and implementation of shunt active filter for harmonic mitigation in induction heating system [J]. Electronics, 2022, 11 (21): 3464– 3476.
- [16] CHEN J, XU J Z, TANG H G, et al. Second harmonic voltage suppression for LLC converter in dual-stage single-phase rectifier based on voltage-oriented state plane feedforward control[J].IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(8):9329-9334.
- [17] 周超群,刘明峰,李晓悦,等.谐波振荡抑制式电流源型整流器 模型预测控制策略[J].山东电力技术,2023,50(9):50-57.
   ZHOU Chaoqun, LIU Mingfeng, LI Xiaoyue, et al. A model predictive control strategy of current source rectifier with harmonic oscillation suppression[J].Shandong Electric Power,2023,50(9): 50-57.
- [18] 叶宗彬,侯波,张延澳,等.一种三相对称系统快速谐波检测算法[J].电工技术学报,2023,38(2):510-522.
  YE Zongbin, HOU Bo, ZHANG Yan'ao, et al. A fast harmonic detection algorithm for three phase symmetric systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(2): 510-522.
- [19] 杨权,梁永昌,魏建荣,等.多谐波源下分布式电源并网逆变器的谐波抑制策略[J].电工技术学报,2023,38(11):2908-2920. YANG Quan,LIANG Yongchang,WEI Jianrong, et al.Research on harmonic suppression strategy of grid connected inverterunder multi-harmonic sources[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(11):2908-2920.
- [20] 张步云,王晋宁,梁定康,等.采用一致性算法的自治微电网群 分布式储能优化控制策略[J].电网技术,2020,44(5):1705-1713.

ZHANG Buyun, WANG Jinning, LIANG Dingkang, et al. Optimization control strategy of distributed energy storage in autonomous microgrid cluster on consensus algorithm [J]. Power System Technology, 2020, 44(5):1705–1713.

- [21] ZHAO T, QIU F X, SUN Z X, et al. Research on the harmonic compensation strategy for improving the low-voltage ride-through performance of CHB PV inverter during inter-phase short-circuit fault[J].Electrical Engineering, 2024:1-17.
- [22] 肖朝霞,张世荣,马占军,等.多谐波源接入的城市配电网SAPF 优化配置方法[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(1):1-9.
   XIAO Zhaoxia, ZHANG Shirong, MA Zhanjun, et al. SAPF optimization allocation method for urban distribution network with

multiple harmonic sources [J].Proceedings of the CSU - EPSA, 2024,36(1):1-9.

- [23] JIA Q Q,ZHANG T,ZHAO S Y.Distributed-based comprehensive optimal configuration strategy for reactive power and harmonic management equipment [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 162:110250.
- [24] ZHAO E S, HAN Y, LIN X Y, et al.Harmonic characteristics and control strategies of grid-connected photovoltaic inverters under weak grid conditions [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 142:108280.
- [25] ZAID M, PAMPORI A, NAZIR M S, et al.GaN-based wide-band high-efficiency power amplifier with multi harmonic resonance[J]. Microelectronics Journal, 2024, 145:106129.
- [26] 袁林涛,孙媛媛,刘振,等.基于潮流变向点的配电网低压分布 式光伏无功影响及优化[J].山东电力技术,2023,50(8):11-19.
   YUAN Lintao, SUN Yuanyuan, LIU Zhen, et al. Influence and

optimization of low-voltage distributed photovoltaic reactive power in active distribution network based on the power flow reverse point [J].Shandong Electric Power, 2023, 50(8):11–19.

收稿日期:2024-10-22

#### 修回日期:2025-02-08

作者简介:

朱岩松(1999),通信作者(1357982855@qq.com),男,硕士在读, 主要研究方向为谐波治理优化;

谢振刚(1993),男,硕士,主要研究方向为电能质量评估;

黄志敏(1998),男,硕士,主要研究方向为电力系统电能质量 控制;

叶梦豆(1997),女,硕士,主要研究方向为非侵入式负荷分解;

江友华(1974),男,博士,教授,主要研究方向为谐波治理与无功 优化、电能质量控制等。

(责任编辑 郑天茹)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.005

# 含电热综合能源系统的直流配电网分布式优化调度

王 岩<sup>1\*</sup>,李冠冠<sup>2</sup>,邸蕴鹏<sup>1</sup>,李慧鹏<sup>3</sup>,杨 磊<sup>1</sup>,刘学堃<sup>1</sup>
 (1.国网河北省电力有限公司超高压分公司,河北 石家庄 050070;
 2.山东理工大学电气与电子工程学院,山东 淄博 255000;
 3.国网河北电力调度控制中心,河北 石家庄 050021)

摘要:直流配电网是未来配电网发展的主要形式,电热综合能源系统(integrated energy system, IES)的迅速发展对直流配 电网调度运行提出了更高要求。针对含电热 IES 的直流配电网集中式调度存在优化时间长以及数据私密性不强的问题, 提出含电热 IES 的直流配电网分布式优化策略。首先以经济性最优为目标,综合考虑柴油发电机出力约束、风光出力约 束、电储能系统运行约束等电约束及热泵约束、氢燃料电池约束、热功率平衡约束等热约束,分别建立下层电热 IES 模型 和上层直流配电网模型,然后采用目标级联分析法(analytical target cascading, ATC)对所建双层模型进行分布式求解,最 后通过算例分析验证了所提分布式优化策略可以求解出各种调度资源最优调度方案。相比于集中式优化,所提策略具 有更好保护电网数据隐私性且求解时间更短的优点。

关键词:直流配电网;综合能源系统;分布式优化;目标级联分析法

文献标志码:A

中图分类号:TM734

文章编号:1007-9904(2025)04-0040-09

# Distributed Optimization Scheduling of DC Distribution Network with Electric Heating Integrated Energy System

WANG Yan 1\*, LI Guanguan 2, DI Yunpeng 1, LI Huipeng 3, YANG Lei<sup>1</sup>, LIU Xuekun<sup>1</sup>

(1. State Grid Hebei Extra High Voltage Company, Shijiazhuang 050070, China;

2.School of Electrical & Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;3.Hebei Electric Power Dispatching and Control Center, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The DC distribution network is the main form of future distribution network development. With the rapid development of electric heating integrated energy systems, higher requirements have been put forward for the dispatch and operation of the DC distribution network. Aiming at the problems of long optimization time and weak data privacy in the centralized scheduling of DC distribution networks containing electric heating integrated energy systems (IES), a distributed optimization strategy for DC distribution networks containing electric heating integrated energy systems is proposed. Firstly, with the goal of achieving optimal economic efficiency, a lower level electric thermal integrated energy system model and an upper level DC distribution network model are established by considering electrical constraints such as generator output constraints, and electric energy storage system operation constraints, as well as thermal constraints such as heat pump constraints, hydrogen fuel cell constraints, and thermal power balance constraints. Then, the analytical target cascading strategy is used to perform distributed solution on the constructed two-layer model. Finally, case studies is used to verify that the proposed distributed optimization strategy can solve the optimal scheduling solutions for various scheduling resources. Compared with centralized optimization, the proposed strategy has the advantages of better protecting the privacy of power grid data and shorter computation time.

Keywords: DC distribution network; integrated energy system; distributed optimization; analytical target cascading

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2023QF158)

Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2023QF158).

# 0 引言

直流配电网作为电力系统中不可或缺的关键环 节,承担着消纳新能源、促进能源高效利用的重要任 务。传统交流配电网接纳新能源时,存在相位同步、 无功补偿等诸多问题。然而直流配电网不需要相频 控制、接纳新能源能力强<sup>[1-2]</sup>,可显著缓解由于新能 源波动带来的电压越限问题。因此直流配电网的发 展可有效克服新能源消纳的难题,极大提升电网运 行的灵活性[3]。由于全球对节能减排与绿色发展日 益重视,综合能源系统(integrated energy system, IES) 凭借其高效节能、清洁环保及低碳排放的显著优势, 赢得了广泛的关注<sup>[4]</sup>。基于多能互补和系统集成技 术,IES实现了能源的高效利用和运行成本的降低, 可以满足差异化用能需求[5-6]。然而 IES 规模较小, 区域内能源互补以及有效利用导致其与直流配电网 仅需要少量的功率交互,无需过多信息交互,因此 IES 的接入,对直流配电网调度运行提出了新的要 求。对于含 IES 的直流配电网来说,集中式调度必 然存在着对区域内数据隐私保护性不强的问题[7]。 除此之外,集中式优化是一个考虑了各种约束的复 杂问题。随着电网规模日渐复杂且电网内各资源约 束增多,集中式优化求解时间变长,有时难以满足实 时调度的时间尺度要求。文献[8]研究了混合交直 流主动配电网分层分布式优化调度方法,对多区域 优化调度提供一定借鉴。文献[9]研究了考虑网络 灵活性的混合交直流配电网两阶段优化模型,但交 直流电网优化采用集中式算法,存在优化时间长的 问题。文献[10]构建计及充换储一体站的交直流混 合配电网多时间尺度优化调度模型,验证了交直流 混合配电网形式具有更强的适应性。文献[11]提出 一种基于碳绿色证书联合市场的多区域 IES 调度模 型,分析了碳交易系统、绿证市场系统以及天然气价 格的变化对系统运行成本的影响。文献[12]引入阶 梯型碳交易机制约束,综合各种约束构建 IES 低碳 经济调度模型,使得碳排放有所降低。文献[13]提 出一种考虑绿证-碳交易机制的 IES 双层优化调度 方法,对降低碳排放和提高能源消纳率提供了参考。 文献[14]基于合作博弈理论,研究了多园区互联 IES 优化问题。IES虽然可以实现多能互补,但是为了保 证运行可靠性,仍然对上级电网有所依赖。随着直流配电网和 IES 的快速发展,二者的电气联系更加紧密,然而现有文章对多 IES 协同调度以及混合交直流电网调度研究较多,对含多 IES 的直流配电网优化调度研究较少。

综上所述,研究含 IES 的直流配电网分布式优 化调度,具有现实意义。首先以经济性最优为目标, 建立下层 IES 模型和上层直流配电网模型,针对双 层优化问题,采用目标级联分析法(analytical target cascading, ATC)进行求解,并通过算例验证所提出 的分布式优化调度方法的可行性。

# 1 直流配电网模型

研究的直流配电网包含柴油发电机组、风力发 电机组、光伏机组、电储能等。直流配电网能流关系 如图1所示。



图1 直流配电网能流

Fig.1 Energy flow of DC distribution network

#### 1.1 目标函数

综合考虑上述各种资源,以经济性最优为目标 函数,具体为

$$f_{\rm DC} = \min \Delta t \times \sum_{t=1}^{T} \begin{cases} \sum_{g=1}^{N_c} \left( a \left( P_{e,t}^{\rm G} \right)^2 + b P_{e,t}^{\rm G} + c \right) + \\ \sum_{g=1}^{N_w} \lambda^{\rm W} \left( P_{g,t}^{\rm W,max} - P_{g,t}^{\rm W} \right) + \\ \sum_{t=1}^{N_{ex}} \left( P_{l,t}^{\rm buy,ex} \lambda_t^{\rm buy} - P_{l,t}^{\rm sell,ex} \lambda_t^{\rm sell} \right) + \\ \sum_{h=1}^{N_{ex}} \lambda^{\rm PV} \left( P_{h,t}^{\rm PV,max} - P_{h,t}^{\rm PV} \right) + \\ \left( P_t^{\rm buy} \lambda_t^{\rm buy} - P_t^{\rm sell} \lambda_t^{\rm sell} \right) \end{cases}$$
(1)

式中: $f_{DC}$ 为直流配电网目标函数; $\Delta t$ 为优化的时间 尺度;T为调度周期; $N_{G}$ 为柴油发电机数量; $P_{e,t}^{G}$ 为第 e台柴油发电机t时刻的功率; $a \ b \ c$ 为柴油发电机 成本系数; $N_{W}$ 为风电机组数量; $\lambda^{W}$ 为弃风成本;  $P_{g,t}^{W,max}$ 、 $P_{g,t}^{W}$ 分别为第g台风电机组t时刻可以调用的 最大功率和实际功率; $N_{IES}$ 为直流配电网中 IES 的数 量; $P_{l,t}^{buy,ex}$ 、 $P_{l,t}^{sell,ex}$ 分别为直流配电网在t时刻向第l个 IES 购电、售电功率; $\lambda_{t}^{buy}$ 、 $\lambda_{t}^{sell}$ 分别为t时刻购电、售 电单价; $N_{PV}$ 为光伏数量; $\lambda^{PV}$ 为弃光成本; $P_{h,t}^{PV,max}$ 、 $P_{h,t}^{PV}$ 分别为第h台光伏t时刻可以调用的最大功率和实 际功率; $P_{t}^{buy}$ 、 $P_{t}^{sell}$ 分别为直流配电网在t时刻向上级 电网购电、售电功率。

#### 1.2 约束条件

直流配电网中约束条件包括电网内各种调度资源的出力约束以及电网潮流平衡约束,具体如下:

1)柴油发电机组出力约束为

$$P_{e,\min}^{G} \leq P_{e,t}^{G} \leq P_{e,\max}^{G}$$
(2)

式中: P<sup>c</sup><sub>e,min</sub>、 P<sup>c</sup><sub>e,max</sub>分别为第 e 台柴油发电机最小、最大功率限值。

2)风电机组和光伏机组出力约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{g,t}^{W} \leq P_{g,t}^{W,\max} \\ 0 \leq P_{h,t}^{PV} \leq P_{h,t}^{PV,\max} \end{cases}$$
(3)

3)与上级电网功率交互约束为[15]

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\iota}^{\text{buy}} \leq \alpha_{\iota} P_{\iota}^{\text{balance}}, \ 0 \leq P_{\iota}^{\text{sell}} \leq \beta_{\iota} P_{\iota}^{\text{balance}} \\ \alpha_{\iota}, \beta_{\iota} \in \{0, 1\}, \ 0 \leq \alpha_{\iota} + \beta_{\iota} \leq 1 \end{cases}$$
(4)

式中: $P_{t}^{\text{balance}}$ 为直流配电网在t时刻向上级电网购售 电功率限值; $\alpha_{t}$ 、 $\beta_{t}$ 为直流配电网在t时刻向上级电 网购、售电状态变量。

4)与 IES 功率交互约束为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{l,t}^{\text{buy,ex}} \leq \alpha_{l}^{\text{buy,ex}} P_{l,t}^{\text{ex,max}} \\ 0 \leq P_{l,t}^{\text{sell,ex}} \leq \beta_{l}^{\text{sell,ex}} P_{l,t}^{\text{ex,max}} \\ \alpha_{l}^{\text{buy,ex}}, \beta_{l}^{\text{sell,ex}} \in \{0, 1\} \\ 0 \leq \alpha_{l}^{\text{buy,ex}} + \beta_{l}^{\text{sell,ex}} \leq 1 \end{cases}$$

$$(5)$$

式中: $P_{l,t}^{\text{ex,max}}$ 为直流配电网在t时刻向第l个 IES 购 电、售电功率限值; $\alpha_t^{\text{buy,ex}}$ 、 $\beta_t^{\text{sell,ex}}$ 为直流配电网在t时 刻向 IES 购、售电状态变量。

5)电储能系统运行约束为[16]

$$\begin{cases} E_{m,t}^{\min} \leq E_{m,t} \leq E_{m,t}^{\max}, 0 \leq U_{m,t}^{d} + U_{m,t}^{ch} \leq 1 \\ 0 \leq P_{m,t}^{d} \leq P_{m,t}^{d,\max} U_{m,t}^{d}, 0 \leq P_{m,t}^{ch} \leq P_{m,t}^{ch,\max} U_{m,t}^{ch} \\ E_{m,t} = E_{m,t-1} - P_{m,t}^{d} \Delta t / \eta_{d} + P_{m,t}^{ch} \Delta t \eta_{ch} \end{cases}$$
(6)

式中: $E_{m,t}$ 和 $E_{m,t-1}$ 为第m个储能系统在t和t-1时 刻的荷电量; $E_{m,t}^{min}$ 、 $E_{m,t}^{max}$ 分别为第m个储能系统在t时 刻最小、最大荷电量; $U_{m,t}^{ch}$ 、 $U_{m,t}^{d}$ 为0-1变量,分别代表 第m个储能系统在t时刻的充、放电状态; $P_{m,t}^{ch}$ 、 $P_{m,t}^{d}$  分别为第 m 个储能系统在 t 时刻的充、放电功率;  $P_{m,t}^{ch,max}$ 、 $P_{m,t}^{d,max}$ 分别为第 m 个储能系统在 t 时刻的充、 放电功率极限; $\eta_{ch}$ 、 $\eta_{d}$ 分别为充、放电效率。

6)潮流约束为

$$\begin{cases} P_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} r_{ij} + P_{j,t} + \sum_{k \in j} P_{jk,t} \\ V_{i,t}^2 = V_{j,t}^2 + 2r_{ij}P_{ij,t} - r_{ij}^2 \frac{P_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} \end{cases}$$
(7)

式中: $P_{ij,t}$ 、 $P_{jk,t}$ 分别为直流配电网t时刻支路ij、支路 jk的功率; $P_{j,t}$ 为t时刻节点j的负荷功率; $r_{ij}$ 为支路ij的电阻; $k \in j$ 表示节点k为与节点j相连的节点; $V_{i,t}$ 、  $V_{j,t}$ 分别为t时刻节点i和节点j的电压。此约束进 行二阶锥松弛<sup>[17]</sup>后变为二阶锥约束。

# 2 IES模型

研究的 IES 包含氢燃料电池、热泵、光伏、电转 气设备、储氢设备、电储能等资源, IES 的能流关系如 图 2 所示。



图 2 IES 电-热能流关系 Fig.2 The electric thermal flow relationship of IES

#### 2.1 目标函数

综合考虑 IES 内各种资源,以弃光成本和购电 成本之和最小为目标函数,具体如式(8)所示。

$$f_{\rm IES} = \min \sum_{t=1}^{T} \begin{cases} \sum_{h=1}^{N_{\rm PV}} \lambda^{\rm PV} \left( P_{h,t}^{\rm PV,\max} - P_{h,t}^{\rm PV} \right) \Delta t + \\ \left( P_t^{\rm buy,DC} \lambda_t^{\rm buy} - P_t^{\rm sell,DC} \lambda_t^{\rm sell} \right) \Delta t \end{cases}$$
(8)

式中: $f_{\text{IES}}$ 为 IES 的目标函数; $P_t^{\text{buy,DC}}$ 、 $P_t^{\text{sell,DC}}$ 为 IES 向 直流配电网t时刻购电、售电功率。

#### 2.2 约束条件

IES 内约束条件包括电约束、热约束以及电热耦 合约束等,具体如下:

1) 热泵约束。

热泵是将电能转化成热能的能量转化装置,其 能效比很高,是理想的制热设备<sup>[18]</sup>。热泵约束为

$$Q_t^{\rm HP} = P_t^{\rm HP} \eta_{\rm HP} \tag{9}$$

式中: $P_{\iota}^{\text{HP}}$ 、 $Q_{\iota}^{\text{HP}}$ 为热泵 t 时刻消耗的电功率和产生的 热功率; $\eta_{\text{HP}}$ 为能效比。

2)电转气约束。

电转气技术<sup>[19]</sup>是将电能通过电解槽产生氢气的 技术,产生的氢气可以储存起来或者经过氢燃料电 池燃烧产热产电。电转气约束为

$$\begin{cases} H_{\iota}^{\mathrm{EL}} = P_{\iota}^{\mathrm{EL}} \eta_{\mathrm{EL}} \\ 0 \leq H_{\iota}^{\mathrm{EL}} \leq H_{\iota}^{\mathrm{EL, max}} \end{cases}$$
(10)

式中: $P_{t}^{\text{EL}}$ 、 $H_{t}^{\text{EL}}$ 为电转气设备t时刻消耗的电功率和 制氢量; $\eta_{\text{EL}}$ 为电制氢效率; $H_{t}^{\text{EL,max}}$ 为电转气设备t时 刻最大制氢量。

3)储氢系统运行约束如式(11)所示。  

$$\begin{cases}
E_{n,t}^{\text{H,min}} \leq E_{n,t}^{\text{H}} \leq E_{n,t}^{\text{H,max}}, 0 \leq U_{n,t}^{\text{d,H}} + U_{n,t}^{\text{ch,H}} \leq 1 \\
0 \leq H_{n,t}^{\text{d}} \leq H_{n,t}^{\text{d,max}} U_{n,t}^{\text{d,H}}, 0 \leq H_{n,t}^{\text{ch}} \leq H_{n,t}^{\text{ch,max}} U_{n,t}^{\text{ch,H}} \\
E_{n,t}^{\text{H}} = E_{n,t-1}^{\text{H}} - H_{n,t}^{\text{d}} \Delta t / \eta_{\text{d,H}} + H_{n,t}^{\text{ch}} \Delta t \eta_{\text{ch,H}}
\end{cases}$$
(11)

式中: $E_{n,t}^{\text{H}}$ 和 $E_{n,t-1}^{\text{H}}$ 为第n个储氢系统在t和t-1时 刻的储氢量; $E_{n,t}^{\text{H},\text{mix}}$ 、 $C_{n,t}^{\text{H},\text{max}}$ 分别为第n个储氢系统在t时刻最小、最大储存量; $U_{n,t}^{\text{ch},\text{H}}$ 、 $U_{n,t}^{\text{d},\text{H}}$ 为0-1变量,分别 代表第n个储氢系统在t时刻的储氢、放氢状态;  $H_{n,t}^{\text{ch}}$ 、 $H_{n,t}^{\text{d}}$ 分别为第n个储氢系统在t时刻的储氢、放 氢量; $H_{n,t}^{\text{ch},\text{max}}$ 、 $H_{n,t}^{\text{d},\text{max}}$ 分别为第n个储氢系统在t时刻 的储氢、放氢量极限; $\eta_{\text{ch},\text{H}}$ 、 $\eta_{\text{d},\text{H}}$ 分别为储氢、放氢 效率。

4)氢燃料电池约束。

氢燃料电池通过消耗氢气产生电能和热能供给 电热负荷<sup>[20]</sup>,具体约束为

$$\begin{cases} P_{t}^{\text{hfc}} = \eta_{\text{ele,hfc}} H_{t}^{\text{hfc}} \\ Q_{t}^{\text{hfc}} = \eta_{\text{hot,hfc}} H_{t}^{\text{hfc}} \\ 0 \leq H_{t}^{\text{hfc}} \leq H_{\text{max}} \end{cases}$$
(12)

式中: $P_{\iota}^{he}$ 、 $Q_{\iota}^{he}$ 分别为氢燃料电池在t时刻产生的电 功率和热功率; $\eta_{ele,hfe}$ 、 $\eta_{hot,hfe}$ 分别为氢燃料电池电转 换效率和热转换效率; $H_{\iota}^{hfe}$ 为氢燃料电池t时刻消耗 的氢气量; $H_{max}$ 为氢燃料电池氢气最大消耗量。

5) 热功率平衡约束。

如前所述,氢燃料电池产热和热泵产热用于供 热,具体约束为

$$Q_t^{\rm HP} + Q_t^{\rm hfc} = Q_t^{\rm load}$$
(13)

式中:Q<sub>t</sub><sup>load</sup>为t时刻热负荷功率。

6)氢气平衡约束。

电转气设备电制氢用来供给氢燃料电池,剩余 氢气储存于储氢系统中,具体约束为

$$H_{\iota}^{\rm EL} = H_{n,\iota}^{\rm ch} - H_{n,\iota}^{\rm d} + H_{\iota}^{\rm hfc}$$
(14)

7) 电功率平衡约束如式(15) 所示。

$$\begin{cases} P_{h,t}^{\text{PV}} + P_{t}^{\text{buy,DC}} - P_{t}^{\text{sell,DC}} + P_{m,t}^{\text{d}} - \\ P_{m,t}^{\text{ch}} - P_{t}^{\text{EL}} - P_{t}^{\text{HP}} + P_{t}^{\text{hfc}} = P_{t}^{\text{load}} \end{cases}$$
(15)

式中:P<sub>t</sub><sup>load</sup>为t时刻电负荷功率。

除以上约束外,IES 中还包括电储能约束、光伏 出力约束等,其形式与直流配电网中约束一致,不再 赘述。

# 3 基于ATC的分布式优化

上述建立的直流配电网和 IES 数学模型,是不同物理区域内的优化问题。两个区域交互的数据仅为二者之间的购售电功率,并不需要将区域内所有数据进行互通。从减少求解时间和保护区域数据隐私两方面考虑,将直流配电网优化作为上层优化问题,将 IES 优化作为下层优化问题,双层规划如式(16)所示。

式中: $Z_{ero}$ 为零矩阵; $\xi_{DC}$ 为上层直流配电网决策变量 矩阵,包括柴油发电机出力、风光出力、储能系统充 放电功率、直流网络功率、向上级电网和 IES 购售电 功率等; $G_1(\xi_{DC}) = Z_{ero}$ 和  $G_2(\xi_{DC}) \leq Z_{ero}$ 分别为上层 直流配电网等约束和不等约束; $\xi_{IES}$ 为下层 IES 决策 变量矩阵,包括热泵耗电功率、热泵产热功率、电转 气设备耗电功率、产气量、电储能系统充放电功率、 储氢系统储放氢功率、氢燃料电池耗氢功率及产电 产热功率、光伏出力及向直流配电网购售电功率等;  $G_3(\xi_{IES}) = Z_{ero}$ 和  $G_4(\xi_{IES}) \leq Z_{ero}$ 分别为下层 IES 等约 束和不等约束。

# 3.1 ATC

ATC<sup>[21]</sup>是一种用于解决复杂系统中目标优化问题的新方法,特别适用于非集中式、层次结构协调问题的优化。直流配电网和 IES 功率交互如图 3 所

示,二者通过联络线进行功率交互,因此在直流配电 网和 IES 联络线处进行解耦,构造基于 ATC 的双层 优化问题进行分布式求解。对于上层直流配电网而 言,联络线功率等效为虚拟负荷;对于下层 IES 而 言,联络线功率等效为虚拟电源功率。虚拟负荷值 与虚拟电源功率分别在直流配电网与 IES 模型中求 解得到。求解的最终结果是上层虚拟负荷值与下层 虚拟电源功率相等。



图 3 直流配电网与 IES 功率交互图 Fig.3 Power Interaction Diagram between DC distribution network and IES

在上层直流配电网模型中,基于 ATC 的直流配 电网优化目标函数为

$$f_{\rm \tiny IC}^{\rm ATC} = f_{\rm \tiny IC} + \min \sum_{t=1}^{T} \sum_{l=1}^{N_{\rm IS}} \begin{pmatrix} \omega_{l,t} \left( P_{l,t}^{\rm DC} - P_{l,t}^{\rm DC,ex} \right) + \\ \gamma_{l,t} \left( P_{l,t}^{\rm DC} - P_{l,t}^{\rm DC,ex} \right)^2 \end{pmatrix} \quad (17)$$

式中: $f_{ic}^{ATC}$ 为基于 ATC 的目标函数; $\omega_{l,i}$ 、 $\gamma_{l,i}$ 分别为目 标函数中t时刻第l个 IES 对应的一次项和二次项乘 子; $P_{l,i}^{DC}$ 、 $P_{l,i}^{DC,ex}$ 分别为直流配电网在t时刻与第l个 IES 交互功率和虚拟负荷功率。

在下层 IES 模型中,基于 ATC 的 IES 优化目标 函数为

$$f_{_{\rm HS}}^{\rm ATC} = f_{_{\rm HS}} + \min \sum_{t=1}^{T} \begin{pmatrix} \omega_{l,t} \left( P_{l,t}^{\rm IES} - P_{l,t}^{\rm IES,ex} \right) + \\ \gamma_{l,t} \left( P_{l,t}^{\rm IES} - P_{l,t}^{\rm IES,ex} \right)^2 \end{pmatrix}$$
(18)

式中: $f_{ss}^{ATC}$ 为基于 ATC 的目标函数; $P_{l,t}^{IES}$ 、 $P_{l,t}^{IES,ex}$ 分别 为第l个 IES 在t时刻与直流配电网交互功率和虚拟 电源功率。

双层分布式优化模型的收敛条件为

$$\left| P_{l,t}^{\text{DC,ex}} - P_{l,t}^{\text{IES,ex}} \right| \le \theta_1 \tag{19}$$

式中: θ1 为双层模型的收敛间隙。

若不满足收敛条件,则按照式(20)更新乘子。

$$\begin{cases} \omega_{l,l,q} = \omega_{l,l,q-1} + 2\gamma_{l,l,q-1}^{2} \left( P_{l,l,q-1}^{DC} - P_{l,l,q-1}^{DC,ex} \right) \\ \gamma_{l,l,q} = \beta\gamma_{l,l,q-1} \end{cases}$$
(20)

式中:下标q和q - 1的变量分别为第q次和第q - 1 次迭代过程中的变量; $\beta$ 为加速收敛因子,一般取值 2 <  $\beta$  < 3。

#### 3.2 基于ATC的双层分布式优化求解流程

根据以上描述,基于 ATC 的含电热 IES 的直流 配电网分布式优化调度求解流程如图 4 所示。



图 4 基于 ATC 的求解流程 Fig.4 Solution flowchart based on ATC

# 4 算例分析

本文研究的算例拓扑结构如图 5 所示。节点 3 和节点 6 分别接入 1 台柴油发电机组,节点 10 接入 1 个风电场,节点 20 接入 1 个光伏电站,节点 14 接 入 1 个储能电站,节点 3 和节点 8 分别接入 IES 系 统。其中 IES 系统中热泵能效比取 3,电转气设备电 制氢效率取 0.85,氢燃料电池电转换效率和热转换 效率分别取 0.6 和 0.35,电储能充电、放电效率分别 取值为 0.9 和 0.92,储氢、放氢效率分别取值 0.95 和 0.98,直流配电网与 IES 交互功率上限取值 500 kW, 弃风弃光成本为 2 元/kWh,分布式优化收敛间隙取 值为 0.1%,风光荷数据均来自实际系统,假设各 IES 原始数据相同,直流配电网中源荷数据曲线如图 6 所示,IES 中源荷数据曲线如图 7 所示,分时电价曲 线如图 8 所示。建模平台为 MATLAB 2023b, 调用 Gurobi9.0.1 求解。



图 5 算例拓扑图 Fig.5 Topology diagram of the example



Fig.6 Source and load curve of DC distribution network





Fig.8 Time of use electricity price curve

#### 4.1 上层直流配电网优化结果分析

首先分析直流配电网中各调度资源出力情况, 柴油发电机出力、与上级电网和 IES 功率交互情况 如图 9 所示,储能系统出力情况如图 10 所示。



图 9 柴油发电机功率和与上级电网、IES 交互功率 Fig.9 Diesel generator power and interaction power with

the higher-level power grid and IES





结合图 9 和图 10 可以得出:由于采用了分时电 价,在负荷较低时刻,柴油发电机功率较低,直流配电 网更倾向于向上级电网购电以满足功率需求,同时由 于电价较低,IES 倾向于向直流配电网购电,进一步加 大了直流配电网向上级电网的电量。在电价较高的 中午时刻,一方面向上级电网购电的费用大于发电机 运行成本,因此需要发电机功率增大;另一方面中午时 刻光伏功率处于最高状态,因而系统向上级电网购电 减少,以降低电网的运行成本。在 20:00 左右光伏功 率为 0,由于此时电价较高,为满足负荷需求,发电机 功率增大同时向上级电网购电功率减小,以降低电网 运行成本。储能系统在 08:00 和 20:00 左右发出较大 功率是因为这两个时间段负荷功率处于快速增长阶 段,但向上级电网购电功率减小,需要储能快速放电配 合其他调度资源出力以满足负荷的快速增长。

#### 4.2 下层 IES 优化结果分析

在 IES 中同时分析电热资源调度情况,以 IES1 为例,电力负荷平衡情况如图 11 所示,热力负荷平衡 情况如图 12 所示,储氢系统出力情况如图 13 所示。











Fig.13 Power of hydrogen storage system

结合图 11、图 12 和图 13 可得出:对于热负荷而 言,在电价较低时刻,全部由热泵供热,在电价较高 阶段,由热泵和燃料电池共同供热。这是因为电价 较低时,电转气设备耗电制氢将氢气储存起来,在电 价较高时,储氢系统快速将氢气放出,供给燃料电池 产电产热,一方面热泵机组可以减少耗电,另一方面 氢燃料电池产电也提供一部分电负荷,从而可以减 少向直流配电网的购电功率。对于电负荷而言,在 电价较低时刻,IES 更倾向于向直流电网购电,除满 足负荷需求外,其余电量用于电储能系统储电和电 转气机组制氢储氢。在负荷高峰时刻电价较高,此 时光伏出力较高,加上电储能系统放电以及燃料电 池产电共同供给电负荷,因此向直流电网购电功率 减少,从而降低负荷高峰时刻IES 的运行成本。

## 4.3 分布优化与集中优化对比

从对区域内电网数据隐私保护而言,相比于集 中式优化将所有电网数据集中汇总建立模型,分布 式优化只需要将各自区域内求解出的虚拟负荷(虚 拟电源)向对侧电网传递,无须将全部数据传递,因 此能更好保护电网数据的隐私性。

对分布式优化和集中优化的目标函数进行对 比,结果如表1所示。

表1 分布式和集中式目标函数比较

 Table 1 Comparison of distributed and centralized

	objective	functions		单位:美元
士四六计	直流配电网	IES1 目标	IES2 目标	全网目标
水脌力法	目标函数	函数	函数	函数
分布式	3 347.2	661.3	664.1	4 672.6
集中式	3 346.5	660.7	663.6	4 670.8

从表1可以得出:分布式优化与集中式优化目标函数并不完全相等,这是因为分布式优化上层直流配电网和下层 IES 相互迭代过程时存在收敛间隙。但分布式比集中式优化全网目标函数仅大0.04%,二者几乎相等,完全可以满足实际调度需求。

集中式、分布式优化模型的求解时间分别为 30.2 s 和 18.7 s。显然相比于集中式优化,分布式优 化求解耗时更少,这是因为分布式上下层各个问题 并行求解,且上下层之间解耦,仅需要交换少量变量 即可继续迭代。而集中式优化将全部约束条件堆砌 从而构造大模型,这是求解时间较长的根本原因。

为了验证基于 ATC 的双层分布式优化调度在 求解时间上的优势,将直流配电网内 IES 拓展到 6 个,集中式、分布式优化模型的求解时间分别为 102.5 s 和 33.8 s。由此可以得出:从数学模型而言, 随着模型的扩大,模型中约束数量成倍增长,目标函 数更加复杂。随着约束的增多必然导致优化模型寻 优的困难程度变大,但是由于分布式优化各个模型 同时求解,因而相比于集中式优化,分布式耗时更 少。对于实时调度等对求解时间有较高要求的场合 来说,分布式优化的优点更加突出。

#### 5 结束语

针对含电热 IES 的直流配电网集中式调度存在 优化时间长以及数据私密性不强的问题,提出基于 ATC 的含电热 IES 的直流配电网双层分布式优化策 略。将直流配电网优化问题作为上层问题,将 IES 优化问题作为下层问题,通过 ATC 进行分布式 求解。

分析双层优化结果中各调度资源出力情况,通 过基于分时电价的优化调度,各调度资源协同使得 全网运行成本最低。文章验证了分布式和集中式优 化目标函数几乎相等,而分布式优化求解耗时更短 的结论,并基于数学模型进行了阐述。

本文仍然存在一些不足之处,由于新能源和电 热负荷均具有不确定性,未考虑源荷不确定性对调 度结果的影响。此外,将双层优化模型通过卡罗需-库恩-塔克条件(Karush-Kuhn-Tucker,KKT)转化成 单层优化模型<sup>[22]</sup>,从而加快模型求解,这也是后续进 一步研究的方向。

# 参考文献

- [1] 朱建昆,高红均,贺帅佳,等.考虑VSC与光-储-充协同配置的 交直流混合配电网规划[J].智慧电力,2023,51(11):7-14.
   ZHU Jiankun, GAO Hongjun, HE Shuaijia, et al. AC-DC hybrid distribution network planning considering VSC and photovoltaicstorage-charging coordinated configuration[J].Smart Power, 2023, 51(11):7-14.
- [2] 卫志农,徐昊,陈胜,等.基于深度学习的直流配电网分布鲁棒 优化调度方法[J].电力自动化设备,2023,43(10):87-94.
   WEI Zhinong, XU Hao, CHEN Sheng, et al. Distributionally robust optimal dispatching method of DC distribution network based on deep learning[J].Electric Power Automation Equipment, 2023, 43 (10):87-94.
- [3] 梁栋,邱馨洁,刘琪,等.电动汽车与直流配电网协同的分布式 自适应滚动预测调度[J].电力系统自动化,2023,47(24): 90-99.

LIANG Dong, QIU Xinjie, LIU Qi, et al. Distributed adaptive rolling predictive scheduling based on coordination of electric vehicles and DC distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(24):90–99.

- [4] 赵佩尧,李正烁,高晗,等.电-气-热综合能源系统协同调度优化研究综述[J].山东电力技术,2024,51(4):1-11.
  ZHAO Peiyao, LI Zhengshuo, GAO Han, et al. Review on collaborative scheduling optimization of electricity gas -heat integrated energy system [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51 (4):1-11.
- [5] WANG J L, YAN T, PAN W G.Design and evaluation of integrated energy system combining solar energy and compressed-air energy storage[J].Renewable Energy, 2024, 232: 121068.
- [6] 梁作放,潘华,何辉,等.考虑碳交易的区域综合能源系统经济 调度研究[J].山东电力技术,2020,47(2):20-26. LIANG Zuofang, PAN Hua, HE Hui, et al. Study on economic dispatch of regional integrated energy system considering carbon trading[J].Shandong Electric Power,2020,47(2):20-26.
- [7] 沈运帷,徐凯,林顺富,等.考虑广义储能参与的多园区综合能源系统低碳优化运行策略[J/OL].电力自动化设备:1-17[2024-09-03].https://doi.org/10.16081/j.epae.202407014.
  SHEN Yunwei, XU Kai, LIN Shunfu, et al. Low carbon optimal operation strategy of multi park integrated energy system considering participation of generalized energy storage [J/OL]. Electric Power Automation Equipment:1-17[2024-09-03].https://doi.org/10.16081/j.epae.202407014.
- [8] 梁海平,王岩,刘英培,等.计及源荷不确定性的混合交直流主动配电网分层-分布式优化调度[J].电力自动化设备,2021,41 (12):62-69.

LIANG Haiping, WANG Yan, LIU Yingpei, et al. Hierarchical – distributed optimal scheduling of hybrid AC/DC active distribution network considering source and load uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12):62–69.

- [9] SU Y, TEH J. Two-stage optimal dispatching of AC/DC hybrid active distribution systems considering network flexibility [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(1): 52-65.
- [10] 朱兰,张贺.含EV充换储一体站的交直流混合配电网优化运行
   [J].上海电力大学学报,2024,40(2):115-123.
   ZHU Lan, ZHANG He. Research on optimal operation of AC/DC hybrid distribution network considering EV charging-swapping-storage integrated station [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power,2024,40(2):115-123.
- [11] 彭婧,徐慧慧,田云飞,等.基于碳绿证市场机制的多区域电力 系统低碳调度模型[J].可再生能源,2024,42(8):1120-1126. PENG Jing, XU Huihui, TIAN Yunfei, et al. A low carbon dispatching model for multi regional power systems based on carbon green certificate market mechanism[J].Renewable Energy Resources,2024,42(8):1120-1126.
- [12] 赵振宇,邓涵予.阶梯碳下考虑耦合电转气-碳捕集和热电联产 灵活输出的综合能源系统优化调度[J].动力工程学报,2024, 44(8):1287-1297.

ZHAO Zhenyu, DENG Hanyu. Optimal scheduling of integrated energy systems considering coupled power to gas, carbon capture system, and combined heating and power flexible outputs under stepped carbon [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(8): 1287-1297.

- [13] 梁宁,缪猛,徐慧慧,等.考虑绿证-碳交易机制的综合能源系统 双层优化调度[J].太阳能学报,2024,45(7):312-322.
   LIANG Ning, MIAO Meng, XU Huihui, et al. Bi - level optimal scheduling of integrated energy system considering green certificates-carbon emission trading mechanism[J].Acta Energiae Solaris Sinica,2024,45(7):312-322.
- [14] 邢家维,程艳,于芃,等.基于合作博弈的多园区互联综合能源 系统低碳经济调度[J].山东电力技术,2024,51(5):19-29.
   XING Jiawei, CHENG Yan, YU Peng, et al.Low-carbon economic scheduling of multiple interconnected park-level integrated energy systems based on cooperative game[J].Shandong Electric Power, 2024,51(5):19-29.
- [15] 刘练,马小龙,潘万宝,等.基于精英策略布谷鸟算法的主动配 电网经济优化调度[J].山东电力技术,2023,50(5):14-20.
  LIU Lian, MA Xiaolong, PAN Wanbao, et al. Economic optimal dispatch of active distribution network based on elite strategy cuckoo algorithm [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50 (5): 14-20.
- [16] 潘广旭,裴丽伟,李英杰,等.可再生能源冷热电分布式供能系统智慧高效运行[J].山东电力技术,2022,49(8):15-21.
   PAN Guangxu, PEI Liwei, LI Yingjie, et al.Research on intelligent and efficient operation of distributed energy supply system with cold thermoelectric and renewable energy [J]. Shandong Electric Power,2022,49(8):15-21.
- [17] 周贤正,郭创新,陈玮,等.基于混合整数二阶锥的配电-气网联合规划[J].电力自动化设备,2019,39(6):1-11.
   ZHOU Xianzheng, GUO Chuangxin, CHEN Wei, et al. Joint

planning of electricity-gas distribution network based on mixed integer second - order cone programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6):1-11.

- [18] 王云龙,韩璐,罗树林,等.集成电动汽车的家庭电热综合能源 系统负荷调度优化[J].中国电力,2024,57(5):39-49.
   WANG Yunlong, HAN Lu, LUO Shulin, et al. Load scheduling optimization of home electric heating integrated energy system with electric vehicle[J].Electric Power,2024,57(5):39-49.
- [19] 薛太林,杨海翔,张海霞,等.考虑P2G及碳捕集的热电联产虚 拟电厂低碳优化调度[J].山东电力技术,2024,51(5):1-8.
  XUE Tailin, YANG Haixiang, ZHANG Haixia, et al. Low carbon optimal scheduling of CHP virtual power plants considering P2G and carbon capture [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(5): 1-8.
- [20] 高月芬,员成博,孔凡鹏,等.需求响应激励下耦合电转气、碳捕 集设备的综合能源系统优化[J].中国电力,2024,57(4):32-41.
   GAO Yuefen, YUN Chengbo, KONG Fanpeng, et al. Optimization of integrated energy system coupled with power-to-gas and carbon capture and storage equipment under demand response incentive
   [J].Electric Power,2024,57(4):32-41.
- [21] 张旋,张玉敏,吉兴全,等.基于目标级联分析法的输电网结构 优化[J].电力自动化设备,2023,43(2):218-224.
   ZHANG Xuan, ZHANG Yumin, JI Xingquan, et al. Optimal transmission switching based on analytical target cascading method
   [J].Electric Power Automation Equipment,2023,43(2):218-224.
- [22] 张浩鹏,李泽宁,薛屹洵,等.基于共享储能服务的智能楼宇双层优化配置[J/OL].中国电机工程学报,2024:1-12[2024-09-03]. https: // kns. cnki. net / kcms / detail / 11.2107. TM.20240402.1440.024.html.

ZHANG Haopeng, LI Zening, XUE Yixun, et al. Double – layer optimal configuration of intelligent building based on shared energy storage service [J/OL].Proceedings of the CSEE, 2024:1–12 [2024 – 09 – 03]. https: // kns. cnki. net / kcms / detail / 11.2107. TM.20240402.1440.024.html.

```
收稿日期:2024-09-12
```

修回日期:2025-02-10

作者简介:

王 岩(1995),通信作者(1773629682@qq.com),男,硕士,主要 研究方向为综合能源系统优化调度、电力系统分布式优化等;

李冠冠(1989),男,博士,讲师,主要研究方向为电力系统优化 运行;

邸蕴鹏(1981),男,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行 与控制;

李慧鹏(1999),男,硕士,主要研究方向为新能源电力系统调度 运行;

杨 磊(1996),男,硕士,主要研究方向为新能源电力系统调度 运行;

刘学堃(1994),男,硕士,主要研究方向为新能源电力系统调度 运行。

(责任编辑 娄婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.006

# 平抑负荷峰谷差的配电网协同控制技术研究

贾东梨,杨晓雨\*,叶学顺 (中国电力科学研究院,北京 100192)

**摘要**:风能等新能源发电具有不确定性和波动性,大规模接入电网后呈现出反调峰特性,如何在实现可再生能源消纳的 同时充分挖掘配电网各台区的调节潜力平抑负荷峰谷差成为亟须解决的问题。首先提出了配电网各台区可调度容量的 量化方法,充分挖掘台区内以储能为代表的灵活性资源调节能力,最大化台区可向其他台区或配电网的支援功率;之后 以电网总负荷峰谷差最小和运行成本最小为目标函数,将各台区视为整体,统筹考虑各台区可调度容量的灵活转移,建 立考虑储能等可调节设备的平抑负荷峰谷差的配电网协同控制模型,并将模型中的非线性部分转化为二阶锥形式,以获 得全局最优解;最后,基于我国某县域配电网的实际数据进行仿真验证,证明了所提模型计算各台区可调度容量及平抑 负荷峰谷差的准确性及有效性。

关键词:调峰;安全经济运行;可调度容量;负荷峰谷差 中图分类号:TM73 文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)04-0049-09

# Research on Collaborative Control Technology of Distribution Network to Reduce Load Peak-valley Difference

JIA Dongli, YANG Xiaoyu\*, YE Xueshun

(China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Renewable energy sources such as wind power exhibit uncertainty and variability, and shows the characteristics of anti-peak regulation after large-scale access to the grid. How to realize the absorption of renewable energy and fully tap the regulation potential of each station area of the distribution network to smooth the load peak valley difference has become an urgent problem to be solved. In this paper, the quantification method of dispatchable capacity of each station area of distribution network is proposed to fully tap the flexible resource adjustment ability represented by energy storage in the station area and maximize the support power of the station area to other stations or distribution network. Then, taking the minimum peak-valley difference and the minimum operating cost of the total load as the objective function, each station area is regarded as a whole, and the flexible transfer of the dispatchable capacity of each station area is considered as a whole. A collaborative control model of the distribution network is established to smooth the peak-valley difference of the load considering the adjustable equipment such as energy storage, and the nonlinear part of the model is transformed into a second-order cone form to obtain the global optimal solution. Finally, based on the actual data of a county distribution network in China, the simulation proves the accuracy and effectiveness of the proposed model in calculating the dispatchable capacity and reducing load peak-valley difference.

Keywords: peak regulation; safe and economic operation; dispatchable capacity; load peak-valley difference

# 0 引言

近年来,为了达成"双碳"发展目标,我国开始大

规模构建以风电、光伏等可再生能源为主要出力设备的电力系统。但是,由于可再生能源发电容易受外在天气环境的影响,且接入电网后出力模式与负荷需求模式不匹配程度较高<sup>[1]</sup>,在夜间负荷小方式下出力较大、而在白天负荷大方式下出力又较小,这一特性会进一步拉大地区电网用电负荷的峰谷差<sup>[2]</sup>,导致系统源荷矛盾突出,尤其在负荷低谷时期,火电向下调节容量严重不足,致使系统接纳可再

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目"适应海量分布式能源接入的新型农村电网经济低碳调控关键技术研究与开发"(1400-202155508A-0-5-ZN)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research and Development of Key Technologies for Low-carbon Regulation of New Rural Power Grid Economy Adapted to Massive Distributed Energy Access" (1400-202155508A-0-5-ZN).

生能源空间受限,可再生能源的大规模并网将对电 网调峰和安全运行带来巨大挑战<sup>[3-4]</sup>。文献[5]论述 了发展分布式光伏发电的战略意义,分析了光伏技 术对于分布式发电的适用性;文献[6]研究了海量分 布式能源并网带来的电压波动、功率波动等问题,验 证了光伏电源不同的并网方式及并网位置对配电网 安全经济运行的影响;在"双碳"目标约束下,火电等 常规调峰电源发展规模受限,尤其对于以火电为主 的电网,受其向下调峰能力约束,大规模接纳风电将 迫使机组进入非常规运行模式,甚至通过启、停部分 火电机组以满足系统的调峰需求,严重影响了系统 的安全与经济运行<sup>[7-8]</sup>。

为提升可再生能源利用效率,提升传统发电设备的运行灵活性,国家推出一系列政策激励,火电机 组深度调峰技术手段不断提升,有效提高了风电接 纳空间<sup>[9]</sup>。但深度调峰会造成机组损耗增加机组运 行成本,导致火电机组运行效率和效益下降,使得火 电机组深度调峰意愿仍旧不足,未来火电机组调峰 调节能力难以满足新型电力系统下风电大规模并网 的运行要求<sup>[10-11]</sup>。

目前,在国内外已开展大量关于可再生能源并 网影响的研究,文献[12]研究了风电并网产生的配 电网震荡问题;文献[13]提出了考虑电网调峰需求 的风电接纳能力指标:文献[14]分析了电网可接纳 可再生能源的影响因素,减少了弃风、弃光等现象。 而在调节大规模新能源介入后的配电网负荷峰谷差 方面,文献[15]以调峰成本最小为目标函数,分析了 单边与双边交易的差异性:文献[16]以配电网机组可 调节电量最大为目标函数,优化结果满足风电波动最 恶劣情况下的调峰能力需求;文献[17]建立了以核电 机组为基础的调峰模型。为有利于提高电网新能源 消纳能力,应按照新能源出力特征采取合理的配电网 运行模式,从而降低配电网净负荷峰谷差,国内外已 有很多相关研究。文献[18]充分挖掘了传统发电与 新能源发电中的可控制部分,构建出一种考虑多种发 电设备联合优化模型,以解决电网吸收海量可再生能 源后对电网平抑负荷峰谷差能力的损失;文献[19-20 分析了电网大规模消纳风电、光伏等新能源后, 电网峰谷差和安全经济运行状态的改变;文献[21] 提出了以储能为基础,以系统运行成本最小为目标 的电网削峰填谷优化模型,优化电网调峰响应。

为了解决新型电力系统中电网调峰所面临的巨 大压力,迫切需要新技术手段来消除这一瓶颈。储 能系统在调节电网负荷和确保电网安全稳定方面发 挥着重要作用,因其同时具有电源和负载的双重特 性。因此,通过利用储能系统实现能量的时空平移, 可以在电网负荷处于峰值或低谷时进行"削峰填 谷",从而辅助电网调峰,有效缓解电力调峰压力,扩 大风电接纳空间,减少弃风现象的发生,并提高新型 电力系统的安全稳定水平<sup>[22-23]</sup>。然而,即使配置了 大量的储能进行削峰填谷,但因为传统的联络开关 灵活性较差,导致各馈线备用资源交换不及时,造成 储能容量利用率较低,且难以解决高渗透分布式电 源接入电网造成的功率不平衡现象,无法对配电网 设备进行快速而有效的控制。

建立配电网台区可调度容量评估模型,充分挖 掘了配电网台区可转移灵活性资源,利用平抑负荷 峰谷差的配电网协同控制技术,统筹考虑配电网负 荷峰谷差最小及运行成本最小,保证大规模新能源 接入配电网的安全经济运行,并基于我国某县域配 电网的实际数据进行仿真验证。

# 1 配电网台区可调度容量评估

# 1.1 目标函数

可再生能源出力具有较强的波动性和不确定 性,而风电出力与负荷需求的特性曲线有较大差异, 风电并网后带来的反调峰特性将进一步加大配电网的 净负荷峰谷差,影响配电网安全经济运行,使火电机组 的调节压力增大,甚至造成弃风切负荷现象的发生。

将配电网中含有光伏、储能和负荷的某条馈线 聚合为一个台区区域,在该台区区域中,光伏出力为 预测值与扰动值的和,储能的作用为依据光伏发电 与负荷需求的变化,灵活进行充电与放电模式的切 换,以调节该台区区域从配电网中吸收的功率,目标 函数为最大化该台区可向配电网及其他台区提供的 可调度功率,即为

$$\max E_{\sup} = \sum_{t=1}^{N_{\tau}} (P_m^{\max}(t) - P_m^{\min}(t)) \cdot \Delta t \qquad (1)$$

式中: $P_m^{max}(t)$ 、 $P_m^{min}(t)$ 分别为时段t内台区区域m与配电网联络线处的最大传输功率和最小传输功率;  $E_{sup}$ 为台区区域向配电网或其他台区区域提供的最大可调度功率; $N_T$ 为最大时段,此处取值为 24,代表 一个典型日中 24 h 被划分为 24 个时段; Δt 为实际调 度周期,取值范围为[0,24]。

# 1.2 约束调节

该优化模型需满足以下约束条件。

1)台区区域功率平衡约束。

 $P_m(t) =$   $\sum_{m=1}^{M} [P_{chm}(t) + P_{DR,m}(t) + P_{L,m}(t) - P_{dism}(t) - P_{pvm}(t)]^{(2)}$ 式中: *M* 为该配电网包含的台区区域数量;  $P_m(t)$  为 时段 *t* 内台区区域 *m* 与配电网联络线处的传输功 率;  $P_{ch,m}(t)$  与  $P_{dis,m}(t)$  为时段 *t* 内台区区域 *m* 中储能 系统(energy storage system, ESS)的充电与放电功率;  $P_{DR,m}(t)$  为时段 *t* 内台区区域 *m* 中有主动响应特性 的可中断负荷的有功功率;  $P_{L,m}(t)$  为时段 *t* 内台区 区域 *m* 中不可中断负荷的有功功率;  $P_{pv,m}(t)$  为时段 *t* 内台区区域 *m* 中的光伏有功出力。

2)储能约束。

$$0 \le E_{m,t} \le E_m^{\max} \tag{3}$$

式中: $E_{m,t}$ 为时段t内台区区域m中储能设备的实际容量; $E_m^{max}$ 是台区区域m中储能系统的最大容量。

$$0 \le P_{\operatorname{ch} m}(t) \le u_{\operatorname{ess} m} \cdot P_{\operatorname{ess} m}^{\operatorname{ed}}$$
(4)

式中:u<sub>ess,m</sub>为台区区域 m 中标志储能设备当前为充 电还是放电状态的 0/1 变量,取 1 时表示储能处于充 电状态,取 0 时表示储能处于放电状态;P<sup>ed</sup><sub>ess,m</sub>为系统 配置储能设备的额定功率。

$$\begin{cases} E_{\text{ess},m}(t) = E_{\text{ess},m}(0) + \eta_{\text{ch},m} \cdot \sum_{t=1}^{t} P_{\text{ch},m}(t) \cdot \Delta t - \\ \frac{1}{\eta_{\text{dis},m}} \cdot \sum_{t=1}^{t} P_{\text{dis},m}(t) \cdot \Delta t \\ \mu_{\text{down},m} \cdot E_{\text{ess},m}^{\text{ed}} \leq E_{\text{ess},m}(t) \leq \mu_{\text{up},m} \cdot E_{\text{ess},m}^{\text{ed}} \\ E_{\text{ess},m}(0) = \mu_{\text{start},m} \cdot E_{\text{ess},m}^{\text{ed}} \end{cases}$$
(5)

式中: $E_{ess,m}(0)$ 为台区区域m中ESS设备在优化开 始时刻内部含有的能量; $\eta_{ch,m}$ 与 $\eta_{dis,m}$ 分别为台区区 域m中ESS设备的充电效率与放电效率; $E_{ess,m}^{ed}$ 为台 区区域m中ESS的铭牌额定容量; $\mu_{down,m}$ 与 $\mu_{up,m}$ 分别 为台区区域m中约束储能设备中存储能量上限与下 限,一般分别取为10%和90%,增加储能设备运行 寿命; $\mu_{start,m}$ 为台区区域m中优化的第一个时段储能 设备中储存的能量。

$$\eta_{\mathrm{ch},m} \cdot \sum_{t=1}^{N_{\mathrm{r}}} P_{\mathrm{ch},m}(t) \cdot \Delta t - \frac{1}{\eta_{\mathrm{dis},m}} \cdot \sum_{t=1}^{N_{\mathrm{r}}} P_{\mathrm{dis},m}(t) \cdot \Delta t = 0 \quad (6)$$

式(6)表示在每个调度周期中,储能设备的调节

能力是一致的,即每个储能设备在某个调度周期内 的充放电容量是不变的。

$$\begin{cases} t = T_{\text{states}}^{\min} - 1 & (1 - u_{\text{ess},m,k}) \ge T_{\text{ch},m}^{\min} \left( u_{\text{ess},m,t-1} - u_{\text{ess},m,t} \right) \\ t = T_{\text{states}}^{\min} - 1 & (T) \\ \sum_{k=t}^{\max} - 1 & u_{\text{ess},m,k} \ge T_{\text{dis},m}^{\min} \left( u_{\text{ess},m,t} - u_{\text{ess},m,t-1} \right) \end{cases}$$
(7)

式中:*T*<sub>ehm</sub>为台区区域 *m* 中储能设备运行到充电状态 需维持的最低时段;*T*<sub>dism</sub>为台区区域 *m* 中储能设备运 行到放电状态需维持的最低时段,与储能设备的具体 物理参数有关;*u*<sub>essmk</sub>,*u*<sub>essml</sub>分别为储能设备在*k* 时段和 *t* 时段充放电状态,取1表示充电,取0表示放电。

3)台区区域运行约束。

为了确保各台区区域之间在进行能量互济时不 影响各台区区域内部的正常能量供需平衡,设约束 条件为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{output},m}(t) \leq P_{\text{dis},m}(t) + P_{\text{pv},m}(t) \\ 0 \leq P_{\text{input},m}(t) \leq \sum_{m=1}^{M} P_{\text{output},m}(t) \end{cases}$$
(8)

式中:Poutput,m(t)为时段 t 内台区区域 m 在配电网需 要多馈线进行能量互济时可向外输送的有功功率, 该功率来源为台区区域 m 内的光伏发电与储能充放 电;Pinput,m(t)为时段 t 内台区区域 m 在配电网需要多 馈线进行能量互济时接收的外来有功功率,该功率 来源为其他台区区域的出力。

配电网中所有台区区域,都应满足以下功率平 衡表达式:

$$P_{\text{L},m}(t) + P_{\text{DR},m}(t) + P_{\text{ch},m}(t) + P_{\text{output},m}(t) =$$

$$P_{\text{pv},m}(t) + P_{\text{dis},m}(t) + P_{\text{input},m}(t)$$

$$\sum_{m=1}^{M} P_{\text{output},m}(t) = \sum_{m=1}^{M} P_{\text{input},m}(t)$$
(10)

4)可中断负荷约束。

考虑到可实现向配电网其他馈线提供功率支撑 的负荷类型主要为可根据用户收益情况响应的可中 断负荷,通过用户对需求侧响应的意愿程度决定中 断负荷的比例。相关的运行约束条件如下:

$$\sum_{t=1}^{N_{\tau}} P_{\mathrm{DR},m}(t) \cdot \Delta t = E_{\mathrm{DR},m}$$
(11)

$$E_{\mathrm{DR},m}^{\min}(t) \leq P_{\mathrm{DR},m}(t) \cdot \Delta t \leq E_{\mathrm{DR},m}^{\max}(t)$$
(12)

式中: $P_{DR,m}(t)$ 为时段 t 内含可中断负荷的台区区域 m中可中断负荷可以提供的有功功率; $E_{DR,m}$ 为该响 应时段内台区区域m中总的需要可中断负荷提供的 有功出力; $E_{DR,m}(t)$ 与 $E_{DR,m}^{max}(t)$ 分别为时段 t 内可中 断负荷可以提供给配电网的最小有功容量与最大有 功容量,与用户的响应意愿是否强烈、回收电价的高 低等条件相关。

# 2 平抑负荷峰谷差的配电网协同控制技术

#### 2.1 目标函数

提出一种综合考虑用户侧与电网侧利益的多目标 有序充放电策略。该策略采用聚类算法分析峰平谷优 化电价,以电网总负荷峰谷差最小化和配电网运行成 本最小化为目标函数。模型的目标函数可以表示为

$$\begin{cases} F_{1} = \min \sum_{t=1}^{24} (P_{t}^{\max} - P_{t}^{\min}) \\ P_{t} = \sum_{i=1}^{N_{t}} P_{i,t} \\ P_{t}^{\max} = \max \{P_{t}\} \\ P_{t}^{\min} = \min \{P_{t}\} \end{cases}$$
(13)

 $F_2 = \min C_{g,t}^{oper} = a_g (P_{g,t})^2 + b_g P_{g,t} + c_g$  (14) 式中:  $F_1$  为最小负荷峰谷差;  $F_2$  为最小配电网运行 成本;  $N_1$  为配电网所有节点的总数量;  $P_{i,t}$  为配电 网时段 t 内 i 节点的净负荷;  $P_t$  为时段 t 内系统所有 节点总的净负荷值;  $P_t^{max} \sim P_t^{min}$  分别为时段 t 系统净 负荷的峰值和谷值;  $C_{g,t}^{oper}$  为在时段 t 内机组 g 的有 功出力;  $a_g \sim b_g \sim c_g$ 分别为发电机 g 的运行成本系数。

2.2 约束条件

1)潮流平衡约束。

在辐射状配电网的优化调度中,潮流表达式可 以基于 Distflow 模型来表示。辐射状配电网简化拓 扑结构及潮流如图 1 所示。





对于辐射状配电网中的节点 j 及支路 ij, 潮流平 衡式可表达为:

$$P_{ij,t} - I_{ij,t}^{2} T_{ij} - \sum_{y \in \phi(j)} P_{jy,t} = P_{j,t}^{\text{load}} - P_{j,t}^{\text{PV}} - P_{j,t}^{\text{ESSd}} + P_{j,t}^{\text{ESSch}} - P_{j,t}^{\text{G}}$$
(15)

$$Q_{ij,t} - I_{ij,t}^{2} x_{ij} - \sum_{y \in \phi(j)} Q_{jy,t} = Q_{j,t}^{\text{load}} - Q_{j,t}^{\text{PV}} - Q_{j,t}^{\text{ESSd}} - Q_{j,t}^{$$

$$U_{j,t}^{2} = U_{i,t}^{2} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^{2} + x_{ij}^{2})I_{ij,t}^{2}$$
(17)

$$I_{ij,t}^{2} = \frac{P_{ij,t}^{2} + Q_{ij,t}^{2}}{U_{i,t}^{2}}$$
(18)

式中: $\phi(j)$ 为节点集合,该集合内的节点均与节点j构成一条支路,且节点j为该共有支路的首端; $P_{ij,\iota}$ 、  $Q_{ij,\iota}$ 分别为时段t内由节点i流向节点j的有功潮流 和无功潮流; $P_{j,\iota}^{load}$ 、 $Q_{j,\iota}^{load}$ 分别为时段t内j节点处的有 功用户负荷与无功用户负荷; $P_{j,\iota}^{pv}$ 、 $Q_{j,\iota}^{pv}$ 分别为时段t内j节点处光伏提供的有功功率和无功功率; $x_{ij}$ 和 $r_{ij}$ 分别为线路ij的电抗值和电阻值; $I_{ij,\iota}$ 为时段t内支路 ij的电流值; $P_{j,\iota}^{ESSch}$ 、 $Q_{j,\iota}^{ESSch}$ 分别为时段t内j 节点处 ESS 充放电的有功功率和无功功率,其中,上 标 ch 表示充电、上标 d 表示放电; $P_{j,\iota}^{c}$ 、 $Q_{j,\iota}^{c}$ 分别为可调 节机组在时段t内节点j向配电网提供的实际有功出 力和无功出力; $Q_{j,\iota}^{SVC}$ 、 $Q_{j,\iota}^{C}$ 分别为时段t内节点j处安 装的静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、 并联电容(capacitor bank, CB)的无功调节能力; $U_{j,\iota}$ 为时段t内节点j处的电压幅值的具体数值。

2)电压电流约束。

$$U_{j,\min} \leq U_{j,t} \leq U_{j,\max}$$

$$I_{ii,t} \leq I_{ii,\max}$$
(19)

式中: U<sub>j,max</sub>、U<sub>j,min</sub>为节点 j 的允许电压上限和电压下限; I<sub>i,max</sub>为支路 ij 的安全运行最大电流值。

3)并联电容约束。

并联电容是一种可以提供无功功率的离散调节 设备。因此,并联电容的无功功率输出可以采用离 散变量表示为

$$\begin{cases} Q_{j,t}^{CB} = N_{j,t}^{CB} Q_{CBN} \\ N_{j,t}^{CB} \leq N_{j}^{CB} \\ \sum_{t=1}^{23} B_{j,t}^{CB} \leq B_{j}^{CB} \\ B_{j,t}^{CB} Q_{CBN} \leq |Q_{j,t+1}^{CB} - Q_{j,t}^{CB}| \leq B_{j,t}^{CB} N_{j}^{CB} Q_{CBN} \end{cases}$$
(20)

式中:N<sup>GB</sup><sub>j,t</sub>为时段 t 内节点 j 处投入并联电容的数量; Q<sub>GBN</sub>为并联电容运行在额定工作状态时的单位无功 功率出力;N<sup>GB</sup><sub>j</sub>为节点 j 处并联电容的最大可投入 数量;B<sup>GB</sup><sub>j,t</sub>为表示并联电容在时段 t 内节点 j 处是否 投入运行的 0-1 变量,该值为 1 表示并联电容在时 段 t 内为投入状态,反之则为断开状态;B<sup>GB</sup><sub>j</sub>为并联 电容在节点 j 处在一个完整的调度周期内符合寿命 要求的最多调节次数。

4)SVC 约束。

$$Q_{j,\min} \le Q_{j,t}^{\text{SVC}} \le Q_{j,\max} \tag{21}$$

式中: *Q<sub>j,max</sub>、Q<sub>j,min</sub>* 为节点 *j* 处的 SVC 允许发出无功功 率的上限和下限, 是连续可变的。

5)光伏设备约束。

当配电网可以完全吸收光伏发电设备发出的有 功功率,即不允许弃光时,光伏发电设备可以采用恒 功率因数控制,可表达为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{PV}} \leq P_{j,t}^{\text{PVfest}} \\ (P_{j,t}^{\text{PV}})^2 + (Q_{j,t}^{\text{PV}})^2 \leq (S_{\text{pv}})^2 \end{cases}$$
(22)

式中: $P_{j,t}^{PVfest}$ 为时段t内节点j处光伏的有功出力预测值; $S_{uv}$ 为光伏的装机容量。

6)储能约束。

储能设备的运行状态,可表达为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{j,t}^{\text{ESSch}} \leq P_{\max}^{\text{ESSch}} \delta_{j,t}^{\text{ch}} \\ 0 \leq P_{j,t}^{\text{ESSd}} \leq P_{\max}^{\text{ESSd}} \delta_{j,t}^{\text{d}} \\ -Q_{\max}^{\text{ESSch}} \delta_{j,t}^{\text{th}} \leq Q_{j,t}^{\text{ESSch}} \leq Q_{\max}^{\text{ESSch}} \delta_{j,t}^{\text{ch}} \\ -Q_{\max}^{\text{ESSch}} \delta_{j,t}^{\text{d}} \leq Q_{j,t}^{\text{ESSch}} \leq Q_{\max}^{\text{ESSch}} \delta_{j,t}^{\text{d}} \\ \delta_{j,t}^{\text{ch}} + \delta_{j,t}^{\text{d}} \leq 1 \\ E_{j,t}^{\text{ESS}} = E_{j,t-1}^{\text{ESS}} + \eta^{\text{ESSch}} P_{j,t}^{\text{ESSch}} \Delta t \\ -P_{j,t}^{\text{ESSd}} / \eta^{\text{ESSd}} \Delta t \\ 0.1 E_{j,\max}^{\text{ESS}} \leq E_{j,t}^{\text{ESS}} \leq 0.9 E_{j,\max}^{\text{ESS}} \\ E_{j,t=0}^{\text{ESS}} = E_{j,t=24}^{\text{ESS}} \end{cases}$$
(23)

式中: $\delta_{j,t}^{\text{th}} \wedge \delta_{j,t}^{\text{d}}$ 分别为时段 t 内节点 j 处储能的充电状态和放电状态; $P_{\max}^{\text{ESSet}} \vee P_{\max}^{\text{ESSet}} \vee Q_{\max}^{\text{ESSet}} \wedge Q_{\max}^{\text{ESSet}}$ 分别为储能设备充电有功功率最大值、充电无功功率最大值、放电有功功率最大值、放电无功功率最大值; $E_{j,t}^{\text{ESS}}$ 为时段 t 内节点 j 处储能设备中含有的电能; $\eta^{\text{ESSet}} \wedge \eta^{\text{ESSet}}$ 分别为储能 ESS 的充放电效率; $E_{j,\max}^{\text{ESS}}$ 为储能 ESS 中储存能量的上限值; $E_{j,t=0}^{\text{ESS}}$ 为调度周期初始时刻储能的初始储能; $E_{i,t=0}^{\text{ESS}}$ 为调度周期结束时刻储能的剩余储能。

7) 机组出力约束。

$$P_g^{\min} \le P_{g,t} \le P_g^{\max} \tag{24}$$

$$(P_g^{\text{fest}})^2 + (Q_g^{\text{fest}})^2 \le (S_g^{\text{max}})^2$$
 (25)

式中: $P_g^{\text{max}}$ 和 $P_g^{\text{min}}$ 分别为机组g的有功出力上限和下限; $S_g^{\text{max}}$ 为机组g的容量上限; $P_{g,t}$ 为时段t内机组g的实际有功出力; $P_g^{\text{fest}}$ 和 $Q_g^{\text{fest}}$ 分别为机组g的额定有功出力和无功出力。

# 3 求解方法

由于本文所提模型的约束条件中存在非线性约

束,如潮流平衡约束、光伏设备约束、机组出力约束,为 了使模型可直接基于通用数学模型系统 (general algebraic modeling system, GAMS)<sup>[24]</sup>平台调用商用求 解器求解,可将模型中的非线性部分转化为二阶锥 形式,目前,已有文献证明二阶锥形式可获得全局最 优解<sup>[25]</sup>。

以潮流约束为例,可将式(22)转化为:

$$W_j = (U_j)^2$$
 (26)

$$L_{ij} = \frac{(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2}{(U_j)^2}$$
(27)

$$L_{ij,t} \ge \frac{(P_{ij,t})^2 + (Q_{ij,t})^2}{V_{i,t}}$$
(28)

$$\begin{array}{c|c} 2P_{ij,t} \\ 2P_{ij,t} \\ L_{ij,t} - V_{j,t} \end{array} \right|_{2} \leq L_{ij,t} + V_{j,t}$$
(29)

式中: $U_j$  为节点j处电压; $V_j$  为节点j处电压的平方,为 辅助变量; $P_i$ 和 $Q_i$ 分别为支路ij的有功功率和无功功 率,为辅助变量; $L_{ij}$ 为支路ij的电流,为辅助变量; $V_{\mu}$ 为 时段t内节点j处电压的平方,为辅助变量; $L_{i\mu}$ 为比时 段t内支路ij的电流数值中最大的值,为辅助变量。

其余非线性项可类似处理为线性项,可直接使用 GAMS中的CPLEX商用求解器对模型进行直接求解。

# 4 算例分析

为验证本文所提出的平抑负荷峰谷差的配电网 协同控制技术的有效性,基于我国某县域配电网的 实际数据进行仿真验证,该配电网拓扑结构如图2 所示,该系统包括51个节点、3台可调风机、23台分 布式光伏发电设备、3台可调储能设备、49条线路。 其中低压台区1为光伏大发台区,低压台区2为负 荷重载台区。线路容量为12.5 MVA,节点电压幅值上 限和下限分别为 1.05 pu 和 0.95 pu, 节点电压相角上 下限分别为 π 和-π。采集该县域配电网 24 h 的负荷 数据,如表1和图3所示。其中,一个典型日内用户需求 负荷最大值为49.866 MW,用户需求负荷最小值为 34.836 MW, 典型日内负荷峰谷差为 15.03 MW, 该县 域配电网负荷率为85.21%。动态经济调度的时间 尺度和时间颗粒度分别为24h和1h。本文所提模 型基于 GAMS 平台编程实现,使用线性规划求解器 CPLEX 进行求解。计算机配置为 Win10 系统, Intel Core i5-11400k 系列,运行内存 16 G, CPU 主频 3.7 GHz。



图 2 县域配电网拓扑结构 Fig.2 Topology of county distribution network

表1 县域配电网24h实际负荷

Table 1 24h actual load of county distribution network

时刻	负荷/MW	时刻	负荷/MW	时刻	负荷/MW
01:00	35.50	09:00	40.93	17:00	49.21
02:00	34.90	10:00	42.46	18:00	49.87
03:00	34.80	11:00	44.88	19:00	49.22
04:00	34.84	12:00	46.91	20:00	49.63
05:00	35.32	13:00	47.59	21:00	48.64
06:00	35.31	14:00	48.24	22:00	47.31
07:00	36.79	15:00	48.66	23:00	45.66
08:00	38.84	16:00	49.06	24:00	42.78





县域配电网典型日风电出力预测值如图4所示。 县域配电网典型日光伏出力预测值如图5所示。



图4 县域配电网风电总出力曲线

Fig.4 Total output curve of wind power in county distribution network



将县域配电网的各时刻负荷减去各时刻光伏和风 电出力,得到如图6所示的县域配电网等效净负荷曲线。





利用改进的 FDWK-means 聚类算法将等效净 负荷曲线划分为峰时段、平时段和谷时段净负荷,计 算出等效净负荷曲线上各个时刻点负荷对应的峰值 相关度、谷值相关度。计算结果如表 2 所示。等效 净负荷划分结果如图 7 所示。

# 4.1 台区可调度容量分析

分别计算台区1和台区2的最大可调度容量,台 区的最大可调度容量即为上下轨迹之间的面积,量化 结果如图8、图9所示。对比两图可知,因台区1内部分 布式光伏设备及储能设备数量均比台区2多,所以可调 度容量更加充足,台区1的可调度容量为25.36 MWh, 台区2的可调度容量为11.26 MWh;但由于台区内灵 活性资源优先满足本台区安全经济运行,在白天负荷 高峰时段,两台区可调度容量均明显减少。

表 2 各个时刻等效负荷的峰谷隶属度 Table 2 Peak-valley membership of equivalent

	load at every moment						
바고	等效负	峰相	谷相	中土方山	等效负	峰相	谷相
- 11 次	荷/MW	关度	关度	时刻	荷/MW	关度	关度
01:00	15.25	0.297 1	0.702 9	13:00	31.82	0.543 7	0.456 3
02:00	16.26	0.465 4	0.534 6	14:00	27.32	0.408 7	0.591 3
03:00	12.82	0.228 6	0.771 4	15:00	26.11	0.362 5	0.637 5
04:00	11.92	0	1.000 0	16:00	28.26	0.225 5	0.774 5
05:00	17.53	0.468 9	0.531 1	17:00	35.93	0.778 6	0.221 4
06:00	21.01	0.480 6	0.519 4	18:00	35.83	0.865 8	0.134 2
07:00	25.93	0.511 8	0.488 2	19:00	39.85	0.875 7	0.124 3
08:00	28.26	0.537 0	0.463 0	20:00	43.25	1.000 0	0
09:00	30.34	0.545 7	0.454 3	21:00	39.14	0.876 6	0.123 4
10:00	30.68	0.542 1	0.457 9	22:00	29.60	0.572 7	0.427 3
11:00	29.93	0.533 9	0.466 1	23:00	19.70	0.408 1	0.591 9
12:00	32.06	0.555 4	0.444 6	24:00	16.29	0.359 7	0.640 3



图 7 等效净负荷曲线时段划分结果 Fig.7 Period division results of equivalent net load curve



Fig.8 Quantization result of dispatchable capacity of

station 1



Fig.9 Quantization result of dispatchable capacity of station 2

#### 4.2 配电网峰谷差平抑效果分析

模型优化前后的等效净负荷曲线如图 10 所示。 对比优化前等效净负荷曲线与优化后的等效净负荷 曲线可知,优化后的等效净负荷最大值降低,最小值 提高,一个典型日内等效净负荷的波动性显著减小, 证明优化后县域配电网通过合理的用户充电电价设 定,充分挖掘了县域配电网的调节灵活性,使优化后 的负荷特性更合理。





等效净负荷及峰谷差变化具体量化值如表 3 所示。通过表 3 可以看出:优化后的等效净负荷谷值 从 11.92 MW 提高为 15.82 MW,等效净负荷谷值提 高了 3.9 MW,说明所提模型促进了储能设备在谷时 段的充电;等效净负荷峰值由 43.25 MW 降低至 36.81 MW,等效负荷降低了 6.44 MW。等效净负荷 的峰谷差由 31.22 MW 降低至 20.99 MW,等效净负 荷的负荷率由 81.75% 上涨至 85.96%。通过优化, 模型显著提升了负荷曲线的平滑度,有效地减少了 负荷的极端波动。这不仅平抑了负荷的峰谷差,还 提高了电网的负荷率,表明该模型可以合理有效的 提升电网运行效率和运行的安全性。

	表3	等效净负荷及峰谷差变化
Table	3 Equ	ivalent net load and peak-valley

difference change

对比时间	等效净负荷 峰值/MW	等效净负荷 谷值/MW	峰谷差/MW	县域配电网 负荷率/%
优化前	43.25	11.92	31.22	81.75
优化后	36.81	15.82	20.99	85.96

# 5 结束语

针对现有海量光伏功率波动控制和负荷峰谷差 平抑控制技术研究难以应对分布式能源的间歇性、 波动性及其与负荷的反调峰特性的不足,计及多种 因素,研究配电网络互联互供能力的影响因素,并构 建相关的可量化指标方法。建立平抑负荷峰谷差的 配电网协同优化模型,研究如何通过协同控制技术 提升配电网的互联互供能力。依据某地实际县域配 电网算例,验证所提出模型的有效性。 在本文中,由于峰平谷电价仅分为3种电价,不 能很好地反映一天内负荷变化的动态特点,且无法 描述相对负荷的大小,因此后续可以进一步对用户 充电电价进行研究,更为细化地划分电价时段,以便 更准确地反映负荷变化的动态特征,更好地指导用 户的充电行为。

# 参考文献

- [1] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):77-81.
  CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system [J]. Power System Technology,2007,31(3):77-81.
- [2] 张宁,周天睿,段长刚,等.大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J].电网技术,2010,34(1):152-158.
   ZHANG Ning, ZHOU Tianrui, DUAN Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand [J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 152-158.
- [3] 李婷.含分布式电源的柔性配电网优化运行[D].北京:华北电力大学,2021.
- [4] 徐曼,丁然,王德胜,等.考虑风电场并网性能差异的风电集群 有功控制策略优化[J].浙江电力,2024,43(10):85-92.
  XU Man, DING Ran, WANG Desheng, et al. Optimization of an active control strategy for wind farm clusters considering their integration performance difference [J]. Zhejiang Electric Power, 2024,43(10):85-92.
- [5] 王文静,王斯成.我国分布式光伏发电的现状与展望[J].中国 科学院院刊,2016,31(2):165-172.
   WANG Wenjing, WANG Sicheng.Status and prospect of Chinese

distributed photovoltaic power generation system [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2):165-172.

- [6] REZAEI N, HAGHIFAM M R.Protection scheme for a distribution system with distributed generation using neural networks [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(4):235-241.
- [7] 黄梦旗,李勇汇,曾海燕,等. 计及高渗透率分布式电源的韧性配电网数据驱动鲁棒规划方法[J].电力建设,2023,44(6):79-90.
   HUANG Mengqi, LI Yonghui, ZENG Haiyan, et al. Data-driven robust planning method for resilient distribution networks considering high-permeability distributed generation [J]. Electric Power Construction, 2023,44(6):79-90.
- [8] 罗继东,黄汉英,王宪磊,等.光伏电源多接入点对配电网电压 分布的影响[J].电力电子技术,2017,51(5):35-38.
   LUO Jidong, HUANG Hanying, WANG Xianlei, et al. Influence of multiple access points of photovoltaic power supply on distribution network voltage distribution[J]. Power Electronics, 2017, 51(5):

35-38.

[9] 陈良耳,王恩荣,王琦,等.分布式光伏系统并网对配电网电压 的影响及电压越限治理方案[J].南京师范大学学报(工程技术 版),2017,17(3):15-21.

CHEN Lianger, WANG Enrong, WANG Qi, et al. Influence of distributed PV systems on voltage in distribution network and countermeasure of voltage beyond limits [J]. Journal of Nanjing Normal University(Engineering and Technology Edition), 2017, 17 (3):15-21.

- [10] 韩富佳,王淳.基于 Matlab 的分布式光伏并网发电系统对配电网电能质量的影响[J].电测与仪表,2015,52(14):16-21.
  HAN Fujia, WANG Chun.Influences of the distributed photovoltaic grid connected generation system on the distribution network power quality based on Matlab [J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2015,52(14):16-21.
- [11] 严霜.配电台区电能质量综合治理技术研究与应用[D].济南: 山东大学,2020.
- [12] 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题 及其对策研究[J].电网技术,2017,41(4):1035-1042.
  LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al.Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J].Power System Technology,2017,41(4):1035-1042.
- [13] 张涛,李家廷,张延峰,等.计及电网调峰约束的风电接纳调度 方法研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(21):74-80.
  ZHANG Tao, LI Jiajue, ZHANG Yanfeng, et al. Research of scheduling method for the wind power acceptance considering peak regulation[J].Power System Protection and Control,2014,42 (21):74-80.
- [14] 李海,张宁,康重庆,等.可再生能源消纳影响因素的贡献度分析方法[J].中国电机工程学报,2019,39(4):1009-1018.
  LI Hai, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Analytics of contribution degree for renewable energy accommodation factors
  [J].Proceedings of the CSEE,2019,39(4):1009-1018.
- [15] 张敏,王建学,王秀丽,等.面向新能源消纳的调峰辅助服务市 场双边交易机制与模型[J].电力自动化设备,2021,41(1): 84-91.

ZHANG Min, WANG Jianxue, WANG Xiuli, et al.Bilateral trading mechanism and model of peak regulation auxiliary service market for renewable energy accommodation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1):84-91.

- [16] 杨冬锋,周苏荃,鲍锋.风电并网系统低谷时段的调峰能力分析
  [J].电网技术,2014,38(6):1446-1451.
  YANG Dongfeng,ZHOU Suquan,BAO Feng.Analysis on peak load regulation capability of power grid integrated with wind farms in valley load period [J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1446-1451.
- [17] 邵尤国,赵洁,刘涤尘,等.考虑核电调峰的风电-核电协调优化 调度[J].中国电机工程学报,2019,39(4):1018-1029.
   SHAO Youguo,ZHAO Jie,LIU Diuchen, et al.Coordinated optimal

dispatch of wind-nuclear power considering peak load shaving of nuclear power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 1018–1029.

 [18] 崔杨,杨志文,仲悟之,等.基于成本最优的含储热光热电站与 火电机组联合出力日前调度[J].电力自动化设备,2019,39
 (2):71-77.

CUI Yang, YANG Zhiwen, ZHONG Wuzhi, et al. Day-ahead dispatch for output of combined CSP with thermal storage day-ahead dispatch for output of combined CSP with thermal storage [J].Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):71-77.

- [19] DU E S, ZHANG N, HODGE B M, et al. The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33 (6) : 6630–6641.
- [20] 陈亚博,盛戈皞,黎建,等.含光伏和风电的电力系统随机生产模拟[J].电力系统及其自动化学报,2015,27(5):1-6.
   CHEN Yabo, SHENG Gehao, LI Jian, et al. Probabilistic production simulation of power system with photovoltaic power and wind power[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2015,27(5):1-6.
- [21] 王华伟,程小虎,赵蒙蒙,等.面向分布式光伏消纳的中压配电网储能规划模型和求解方法[J].电力建设,2023,44(9):58-67.
  WANG Huawei, CHENG Xiaohu, ZHAO Mengmeng, et al. Method for energy storage planning in medium voltage distribution networks for distributed photovoltaic consumption [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 58-67.
- [22] 范美芳.分布式光伏接入农村配电网电压质量治理研究[D].北 京:北京交通大学,2021.
- [23] 陈文颖,刘蓓迪.基于粒子群算法的电动汽车有序充放电优化
   [J].山东电力技术,2023,50(1):52-58.
   CHEN Wenying, LIU Beidi. Sequential charging and discharging optimization of electric vehicles based on particle swarm optimization[J].Shandong Electric Power,2023,50(1):52-58.
- [24] BROOKE A, KENDRICK D, MEERAUS A, et al.GAMS: A user's guide.Washington D.C.; GAMS Development Corp, 1998.
- [25] FINARDI E C, DA SILVA E L.Solving the hydro unit commitment problem via dual decomposition and sequential quadratic programming [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21 (2):835-844.

收稿日期:2024-09-27

修回日期:2024-12-02

作者简介:

贾东梨(1982),女,教授级高级工程师,从事配电网仿真与分析 研究工作;

杨晓雨(1996),通信作者(yangxiaoyu1@epri.sgcc.com.cn),女,工 程师,从事配电网建模与仿真预测研究工作;

叶学顺(1985),男,高级工程师,从事配电网仿真与分析研究 工作。

(责任编辑 郑天茹)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.007

# ・人工智能・

# 基于改进 HPO-ELM 与证据推理规则的变压器状态评估方法

陈继明1,陶志雄1,沈志彬2\*,高辉3,宋军志4

(1.中国石油大学(华东)新能源学院,山东 青岛 266000;2.青岛睿能达电气技术有限公司,山东 青岛 266000; 3.山东济宁圣地电业集团有限公司,山东 济宁 272000;4.威海海源电力工程有限公司乳山分公司,山东 威海 264200)

摘要:准确的变压器状态评估可以及时发现潜在故障,保障电力系统的安全运行。针对仅以油中溶解气体数据 作为主要依据的变压器状态评估方法信息量不足以及证据理论的固有缺陷问题,提出了基于猎人猎物优化 (hunter-prey optimizer, HPO)算法改进的极限学习机(extreme learning machine, ELM)与证据推理(evidential reasoning, ER)规则相结合的状态评估方法。基于 HPO-ELM 模型分别对油中溶解气体数据、电气试验数据和油 化试验数据等三个评估指标进行初级评估,构造多源信息融合所需的概率分配矩阵,提高初级评估的准确率; 采用变异系数法确定评估指标的重要性参数,将初级评估准确率转化为评估指标的可靠性参数,保障评估过程 的客观性,然后利用 ER 规则实现融合评估。评估结果表明,本文通过提升原始概率分配精度与优化融合方法 后,状态评估准确率可达95.85%。并通过某检修公司提供的真实样本数据进行测试分析,验证了本文方法的有 效性和可靠性。

关键词:变压器状态评估;极限学习机;证据推理规则;多源信息融合 中图分类号:TM41 文献标志码:A 文章编号:1007-9904(2025)04-0058-11

# Transformer State Evaluation Method Based on Improved HPO-ELM and Evidential Reasoning Rules

CHEN Jiming<sup>1</sup>, TAO Zhixiong<sup>1</sup>, SHEN Zhibin<sup>2\*</sup>, GAO Hui<sup>3</sup>, SONG Junzhi<sup>4</sup>

(1.School of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266000, China;

2.Qingdao Ruinengda Electrical Technology Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

3.Shandong Jining Holy Land Electric Power Group Co., Ltd., Jining 272000, China;

4. Weihai Haiyuan Power Engineering Co., Ltd.Rushan Branch, Weihai 264200, China)

Abstract: Accurte transformer state assessment can promptly detect potential faults and ensure the safe operation of the power system. To address the issue of insufficient information in transformer state assessment methods that rely solely on dissolved gas analysis (DGA) data in oil as the primary basis, as well as the inherent limitations of evidence theory, state assessment method combining an improved extreme learning machine (ELM) algorithm based on the hunter-prey optimizer (HPO) with evidential reasoning (ER) rules is proposed. Based on the HPO-ELM model, primary evaluations are performed on three evaluation indicators: dissolved gas data in oil, electrical test data, and oil chemical test data. The probability allocation matrix required for multi-source information fusion is constructed to enhance the accuracy of primary evaluations. The importance parameters of the evaluation indicators are determined using the coefficient of variation method, and the accuracy of the primary evaluation is converted into the reliability parameters of the evaluation indicators to ensure the objectivity of the evaluation process. ER rules are then applied to achieve fusion evaluation. The experimental results demonstrate that by improving the accuracy of the original probability allocation and optimizing the fusion method, the state evaluation accuracy in this paper can reach 95.85%. And the effectiveness and reliability of the proposed method are verified through testing and analysis of real sample data provided by a certain maintenance company.

Keywords: transformer state assessment; extreme learning machine; evidential reasoning rules; multi-source information fusion

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME027)。

Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2021ME027).

# 0 引言

电力变压器是变电站的核心设备,但在电、热、 机械等复合应力作用下易引起绝缘老化,进而引发 设备故障。变压器状态评估是预防设备发生故障的 重要手段<sup>[1-2]</sup>,准确的变压器状态评估可以延长设备 使用寿命,提前预警潜在风险,有效保障电力系统稳 定运行。已有的变压器状态评估方法通常只考虑油 中溶解气体(dissolved gas analysis,DGA)信息<sup>[3-4]</sup>,未 能充分挖掘电气及油化试验等有效特征,因而难以 实现变压器状态的准确、全面评估。同时,变压器内 部结构复杂、工作环境恶劣,状态特征中包含大量的 不确定性和非线性信息,仅采用单一算法无法解决 评估中的不确定性问题,评估准确率较低。为了解 决这些问题,国内外学者提出了多源信息融合的方 法以提高变压器状态评估的准确率。

证据理论作为多源信息融合的经典方法,在变 压器状态评估和故障诊断领域取得了一些研究成 果[5-7]。文献[8]提出了基于数据库的概率分配方 法,并结合基于折扣因子改进的证据理论实现状态 评估;文献[9]则通过引入层次分析法与隶属度函数 确定了基本概率分配,再利用皮尔逊相关系数对基 本概率进行修正,将修正后的证据用于融合评估。 上述方法通过修正原始概率分配矩阵,构造新的证 据体用于融合评估,虽较好地解决了传统证据理论 面对高冲突证据时的合成悖论问题,但对原始证据 的修改破坏了证据所蕴含信息的完整性和特异性, 并且没有考虑不同证据的可靠性与重要性。此外, 目前常用的概率分配矩阵构造方法主要有云模 型[6]、数据库[8]、层次分析法[9]、模糊理论以及人工智 能算法等。文献[10]利用扩展模糊逻辑对变压器数 据进行了概率计算,这种方法适用于传统统计方法 难以量化的场景,但依赖专家知识定义隶属度函数, 具有较强的主观性。文献[11]则通过粗糙集理论提 取最优近似诊断规则并结合最优近似的频率分布, 计算得到了概率分配矩阵,虽然减少了人为干预,提 高了结果的准确性和可靠性,但当数据高度复杂或 数量较大时,需要更多的计算资源和时间,提取最优 规则变得十分困难。文献[12]将特征气体数据输入 到 XGBoost 算法中进行训练,将每种故障类型的节

点得分作为基本概率,这种构造方法训练速度较快, 同时也可以提供较高的准确性,但对噪声数据敏感, 容易产生波动,影响预测的稳定性。

综上所述,多源信息融合技术应用到变压器状态评估中主要有2个关键点须解决:一是在初步评估过程中,构造准确的概率分配矩阵;二是确定多源信息的融合评估方法。因此,本文将DGA数据、电气试验数据和油化试验数据共同作为特征指标,解决状态评估信息量不足的问题,并利用基于猎人猎物(hunter-prey optimizer, HPO)算法改进的极限学习机(extreme learning machine, ELM)模型进行初步评估,快速构造概率分配矩阵,提升初步评估的准确率;最后采用证据推理(evidential reasoning, ER)规则进行融合评估,克服传统证据理论面对高冲突证据时的固有缺陷,并在融合过程中设置了各特征指标的重要性与可靠性参数,保留了原始概率分配矩阵所蕴含信息的完整性,使评估过程更符合实际工作情况。

# 1 变压器状态评估体系建立

# 1.1 评估体系特征指标选取

选择科学、合理的状态特征变量,是全面、准确评 估变压器状态的基础。由于变压器状态特征众多,相 互关系复杂,特征选择不当会降低评估模型的准确性 和泛化能力,但过多的特征又会导致模型的复杂程度 成倍增加,引发过拟合问题。根据 DL/T 596—2021 《电力设备预防性试验规程》和现有研究成果<sup>[13-15]</sup>,并结 合实际样本数据获取情况,选取 DGA、电气试验、油化试 验三类状态特征变量作为评估模型的输入变量,变压器 状态评估特征指标如图 1 所示。





#### 1.2 特征指标处理

为了消除不同特征指标存在的物理意义和量化 单位对评估过程的影响,本文采用相对劣化度的方 法<sup>[16]</sup>对样本数据进行归一化处理。

对于数值越小,状态越好的样本可按照式(1) 处理。

$$u(x) = \begin{cases} 0 , x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} , x_{\min} \le x < x_{\max} \end{cases}$$
(1)

式中:u(x)为归一化后的数据;x为该指标的实际监测数据;x<sub>min</sub>和x<sub>max</sub>分别为该指标标准界限的下限值和上限值。

对于数值越大,状态越好的样本则按照式(2) 处理。

$$u(x) = \begin{cases} 0 & , x \ge x_{\max} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} & , x_{\min} \le x < x_{\max} \\ 1 & , x < x_{\min} \end{cases}$$
(2)

根据 Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修 试验规程》与本文样本集情况,各评估指标标准界限 的上限值与下限值如表1所示。

#### 表1 各评估指标的参考界限

Table 1 Reference limits for each evaluation indicator

评估指标	$x_{\min}$	$x_{\max}$
$H_2$ 含量/( $\mu$ L/L)	0	150
$C_2H_2$ 含量/( $\mu$ L/L)	0	5
总烃含量/(μL/L)	0.23	150
绕组介质损耗因数	0.003	0.008
极化指数	0.5	2
吸收比	1.3	1.57
油击穿电压/kV	35	74.4
油介质损耗因数	0.001	0.04
油中微水/(mg/L)	6.92	25

#### 1.3 状态评估等级划分

为确保最终评估结果符合实际检修工作的需要,依据DL/T1685—2017《油浸式变压器(电抗器) 状态评价导则》和已有研究成果<sup>[17-19]</sup>,将变压器状态 分为:正常状态S1、注意状态S2、异常状态S3和严 重状态 S4。4类运行状态的定义标准如表2所示。

表2 变压器状态定义标准

#### Table 2 Standard for defining transformer state

变压器状态	相对劣化度	状态描述
正常状态 S1	[0,0.2]	状态量保持稳定,变压器状态良好, 可正常运行
注意状态 S2	(0.2,0.5]	状态量有向标准界限值变化的趋势, 但设备可正常运行,需要加强监视
异常状态 S3	(0.5,0.8]	状态量变化明显,变压器存在故障隐 患,需要择机检修
严重状态 S4	(0.8,1.0]	状态量严重超过或接近标准界限值, 设备出现明显异常,需要及时检修

# 2 基于多源信息融合的状态评估模型

#### 2.1 改进的HPO-ELM算法

精准、高效地构造概率分配矩阵是提高评估准确率的关键之一。由于变压器异常状态较少且异常状态具有偶发性和隐蔽性,导致难以完整和及时的采集数据,这种局限性导致变压器的异常状态数据较少,不适合用于深度学习的大规模训练。ELM算法作为一种经典的机器学习方法,更适用于小样本训练,具有训练速度快、鲁棒性能强、训练过程简单等优点,在变压器状态评估和故障诊断领域得到了 广泛应用<sup>[20-22]</sup>。但是 ELM 算法的权值和偏置存在 过强的随机性和不合理性,在训练过程中容易陷入 局部最优解导致最终结果不理想,因此本文采用 HPO<sup>[23]</sup>算法对 ELM 的参数进行优化,提高 ELM 训 练模型的分类准确性和稳定性,HPO-ELM 模型的流 程如图 2 所示。

HPO 算法作为一种新型的智能优化算法,通过 迭代和更新猎人与猎物的位置,实现全局搜索,具有 独特的随机性和群体协作性,能够自动搜索和调整 ELM 模型的最优参数配置,从而提高模型的泛化能 力和分类能力,降低过拟合风险。

HPO 算法的原理主要是通过模拟猎人捕捉猎物的行为来寻找最优解。原始种群中每个个体在搜索空间中的位置由式(3)确定。

 $x_i = \operatorname{rand}(1, d) \cdot (b_u - b_1) + b_1 \tag{3}$ 

式中:x<sub>i</sub>为第*i*个猎人或猎物的位置;b<sub>i</sub>为问题变量的 下限;b<sub>a</sub>为问题变量的上限;*d*为问题变量的维度; rand(1,d)为一函数,表示取范围在1到d之间的正 整数。



图2 HPO-ELM模型 Fig.2 HPO-ELM model

猎人的搜索机制如式(4)所示。  $x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) +$   $0.5[(2CZP_{pos(j)} - x_{i,j}(t)) + 2(1 - C) Z\mu_j - x_{i,j}(t)]^{(4)}$ 式中: $x_{i,j}(t)$ 为第i个猎人在第j维第t次的迭代位 置; $x_{i,j}(t+1)$ 为第i个猎人在第j维第t + 1次的迭代 位置; $P_{pos(j)}$ 为猎物的第j维位置;C为平衡参数,C的 值由1递减到0.02,由式(5)表示;Z为自适应参数, 由式(6)表示; $\mu_j$ 为第j维所有猎物位置的平均值,由 式(7)表示。

$$C = 1 - m \left(\frac{0.98}{M}\right) \tag{5}$$

式中:m为当前迭代数;M为最大迭代数。

$$\begin{cases} P = \mathbf{R}_{1} < C \\ \delta_{\text{IDX}} = (P = = 0) \\ Z = \mathbf{R}_{2} \otimes \delta_{\text{IDX}} + \mathbf{R}_{3} \otimes (\sim \delta_{\text{IDX}}) \end{cases}$$
(6)

式中: $R_1$ 和 $R_3$ 均为模为[0,1]内的随机向量;P为  $R_1 < C$ 的索引值; $R_2$ 为[0,1]内的随机数; $\delta_{IDX}$ 为满足 条件(P = = 0)的向量 $R_1$ 的索引值。

$$\mu_{j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} c_{i,j}$$
(7)

式中:n为种群规模;c<sub>ij</sub>为第j维空间中第i个猎物的 位置。

计算猎物的位置,首先要计算搜索代理点的位置和平均位置点的欧几里得距离 *D*<sub>euc(i)</sub> 如式(8) 所示。

$$D_{\text{euc}(i)} = \sqrt{\sum_{j=1}^{d} (u_{i,j} - \mu_j)^2}$$
(8)

式中:u<sub>ij</sub>为第 i 个搜索代理在第 j 维空间中的位置。 猎物的位置是距离平均位置点最远位置,即欧几里 得距离最大的搜索代理点的位置。

如果每次迭代都需要考虑搜索代理与平均位置 之间的最大距离,则会影响算法的收敛速度,因此提 出如式(9)所示的递减机制。

$$K_{\text{best}} = \text{round}(C \cdot N) \tag{9}$$

式中: $K_{\text{best}}$ 为递减参数;N为搜索代理数量;round( $\cdot$ ) 为将浮点数四舍五入到最接近的整数。

考虑递减机制后,搜索代理点与平均位置点的 距离可由 $D_{(i)}$ 表示。此时,猎物的位置 $P_{pos(i)}$ 即为 $D_{(i)}$ 值最大的搜索代理点的位置。算法开始时, $K_{best} = N_{o}$ 

$$D_{(i)} = D_{\text{euc}(i)} K_{\text{best}} \tag{10}$$

在 HPO 算法中,首先选择距离平均位置最远的 搜索代理点作为猎物起始位置,当猎物受到攻击时, 猎物会试图去更安全的地方,假设最安全的位置就 是全局最优位置,猎物的更新位置可由式(11)进行 更新。

 $c_{ij}(t+1) = T_{pos(j)} + CZcos(2\pi R_4) \times (T_{pos(j)} - c_{ij}(t))(11)$ 式中: $c_{ij}(t+1)$ 为第i个猎物在第j维空间中的第t + 1次迭代位置,即猎物的下一个位置; $c_{ij}(t)$ 为第i个猎物在第j维空间中的第t次迭代位置,即猎物的当前位置; $T_{pos(j)}$ 为第j维空间的全局最佳位置; $R_4$ 为 [-1,1]范围内的随机数;cos(·)表示允许将下一个猎物位置定位在不同的角度。

综上,可以得到猎人和猎物的选择公式,如式 (12)和式(13)所示。

 $\begin{aligned} x_{ij}(t+1) &= x_{ij}(t) + \\ 0.5 \Big[ (2CZP_{\text{pos}(j)} - x_{ij}(t)) + 2(1 - C) Z\mu_j - x_{ij}(t) \Big], (12) \\ R_5 &< \beta \end{aligned}$ 

$$c_{i,j}(t+1) = T_{\text{pos}(j)} + \left[ CZ\cos(2\pi R_4) \times (T_{\text{pos}(j)} - c_{i,j}(t)) \right] R_5 \ge \beta$$
(13)

式中: $R_5$ 为[0,1]内的随机数; $\beta$ 为调节参数,其初始 值设置为0.1。如果 $R_5 < \beta$ ,则将搜索代理视为猎人, 采用式(12)更新搜索的下一个位置;如果 $R_5 \ge \beta$ ,则 将搜索代理视为猎物,采用式(13)更新搜索的下一 个位置。

为证明 HPO 算法的寻优能力,选取 Sphere 单峰 函数和 Griewank 多峰函数进行测试,并与常见的麻 雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)和粒子群 算法(particle swarm optimization, PSO)进行对比分 析,结果如表 3 所示。

测试函数的维度均设置为 10, Sphere 的变量范 围为[-100, 100],最优解为 0; Griewank 的变量范围 为[-600, 600],最优解为 0。

# 表3 HPO算法寻优能力对比分析

Table 3 Comparative analysis of the optimization capability of the HPO algorithm

寻优函数	测试函数	平均适应度
ЧРО	Sphere	1.21×10 <sup>-41</sup>
HPO	Griewank	0
	Sphere	5.38×10 <sup>-38</sup>
55A	Griewank	3.06×10 <sup>-46</sup>
PSO	Sphere	2.92×10 <sup>-39</sup>
	Griewank	0

由表3可知,在单峰函数和多峰函数的测试中, HPO算法的寻优能力相较于常见的SSA算法和PSO 算法具有一定的优势,具有较好的全局寻优能力,能 够避免陷入局部最优解。

利用 HPO-ELM 模型可以有效提升变压器状态 评估的分类准确性。同时,为了构造 ER 规则融合所 需要的概率分配矩阵,实现多源信息融合,本文利用 Softmax 函数对 HPO-ELM 模型进一步优化,将模型 的输出结果从定型的标签值优化为定量的概率值, 为决策融合提供了更为可靠和精准的基础信息,有 效解决了状态评估中的不确定性问题。

Softmax 函数的基本定义如式(14)所示。

Softmax 
$$(y_g) = \frac{e^{y_e}}{\sum_{g=1}^{s} e^{y_g}}$$
 (14)

式中: $y_s$ 为 HPO-ELM 模型输出层第g个神经元的原始输出;s为分类器中的类别数量,本文中s = 4。

### 2.2 ER规则

初步评估后,需利用信息融合算法提升评估结 果的准确率和可靠性。ER规则相较于证据理论及 其优化方法在解决多源信息融合问题时,具有显著 优势。主要体现在:1)ER规则可以综合考虑定性知 识和定量指标,较好地解决不确定性问题;2)当不同 信息源的结果高度冲突时,证据理论往往会给予违 反常理的结果,但是ER规则可以很好地解决高冲突 信息;3)对证据理论中的原始证据体的改进,会破坏 证据体的特异性,造成信息损失,对融合规则的改进 则会破坏结合律,但是ER规则可以有效保留状态数 据的有效性和完整性,同时对于不同状态特征对于 评估结果的重要性和可靠性进行了科学划分,更加 符合实际情况,提升了评估的准确率和可靠性。近 些年来,ER规则在信息融合与状态评估等方面取得 了良好的效果<sup>[24-26]</sup>。

如果集合  $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_0\}$ 包含所有假设,并且 假设之间相互独立,则  $\Theta$ 称为辨识框架, $P(\Theta)$ 或  $2^{\circ}$ 表示包含  $\Theta$ 所有子式的幂集。

ER 规则中的证据为

$$e_{k} = \left\{ \left(\theta, p_{\theta, k}\right) \middle| \forall \theta \subseteq \Theta, \sum_{\theta \subseteq \Theta} p_{\theta, k} = 1 \right\}$$
(15)

式中: $p_{\theta,k}$ 为第k个证据对命题 $\theta$ 的支持程度。

综合考虑证据的重要性 w<sub>k</sub> 和可靠性 r<sub>k</sub> 得到信度分布为

$$m_{k} = \left\{ \left(\theta, \tilde{m}_{\theta, k}\right) \middle| \forall \theta \subseteq \Theta, \left(P(\Theta), \tilde{m}_{P(\Theta), k}\right) \right\}$$
(16)

式中:m<sub>0.k</sub>为含有可靠性因子和重要性权重的第 k个 证据对命题 θ 的支持程度,其定义为

$$\tilde{m}_{\theta,k} = \begin{cases} 0 & , \quad \theta = \emptyset \\ v_k m_{\theta,k} & , \quad \theta \subseteq \Theta, \theta \neq \emptyset \\ v_k (1 - r_k) & , \quad \theta = P(\Theta) \end{cases}$$
(17)

式中: $v_k$  为第 k 个证据的归一化因子,满足  $v_k = 1/(1 + w_k - r_k); m_{\theta,k}$  为考虑重要性权重后的 信度分布,满足 $m_{\theta,k} = w_k p_{\theta,k}$ 。且当 $\sum_{\theta \in \Theta} p_{\theta,k} = 1$ 时,  $\sum_{\theta \subset \Theta} \tilde{m}_{\theta,k} \, + \, \tilde{m}_{P(\Theta),k} = 1_{_{\odot}}$ 

对于两组互相独立的证据 1 和证据 2,可以按照 如式(18)、式(19)所示的规则进行融合。以 e(2)表 示对两组证据进行关联后的结果;E、F和 G为  $\Theta$  中 的假设命题,多证据体的融合原理以此类推。

$$p_{\theta,e(2)} = \begin{cases} 0 &, \theta = \emptyset \\ \frac{\hat{m}_{\theta,e(2)}}{\sum_{E \subseteq \Theta} \hat{m}_{E,e(2)}} &, \theta \subseteq \Theta, \theta \neq \emptyset \end{cases}$$
(18)

$$\hat{m}_{\theta,e(2)} = \left[ \left( 1 - r_2 \right) m_{\theta,1} + \left( 1 - r_1 \right) m_{\theta,2} \right] + \sum_{F \cap G = \theta} m_{F,1} m_{G,2}, \forall \theta \subseteq \Theta$$
(19)

式中:r<sub>1</sub>和r<sub>2</sub>分别为证据1和证据2的可靠性参数。

2.3 状态评估模型

根据以上研究内容,提出了基于改进的 HPO-ELM 与 ER 规则的变压器状态评估模型,如图 3 所示。



#### 图3 变压器状态评估模型

Fig.3 Transformer state evaluation model

采用本文方法进行变压器状态评估的过程 如下:

1)将 DGA 数据、电气试验数据和油化试验数据

利用相对劣化度方法进行归一化处理。

2)将三类特征变量分别输入 HPO-ELM 模型中进行训练,并将分类准确率作为 ER 规则的可靠性权重。

3)利用变异系数法计算各特征指标的重要性 权重。

4) 将测试集样本数据分别输入对应的 3 个 HPO-ELM 模型,进行初步评估,构造概率分配矩阵。

5)利用 ER 规则将基本概率进行融合评估,得到 最终结果。

#### 3 评估过程与结果分析

#### 3.1 初始样本

依据山东省某电力公司近3年的容量为 180 MVA、电压等级为220 kV的油浸式变压器实测 数据和故障案例汇编,剔除记录残缺和有明显错误 的数据,搜集整理得到1108组信息明确、完整的样 本数据。样本分布情况如表4所示,设置训练集和 测试集的比例为3:1。

表 4 样本分布情况 Table 4 Sample distribution situation

变压器状态	样本数量
S1	285
S2	283
\$3	277
S4	263

#### 3.2 初步评估

基于 MATLAB 仿真环境,设置 HPO 算法最大迭 代次数 *T*=300,种群规模 *N*=50,ELM 的隐含层节点 数采用经验公式进行调试,激活函数选择 sigmoid, 输入层权值和隐含层偏置的范围设置为[-1,1],其 他参数采用默认值。

将预处理后的 DGA 数据、电气试验数据和油 化试验数据分别通过 HPO-ELM 模型进行训练。 为检验 HPO-ELM 模型的性能,加入 SSA-ELM 算 法证明 HPO 对 ELM 模型在变压器状态评估问题 的参数寻优能力;加深度信念网络(deep belief networks, DBN)作为分类算法,并组成 HPO-DBN 算 法,证明 ELM 模型的分类能力;支持向量机(support vector machine, SVM)与 PSO 构成的 PSO-SVM 模型则是较为常用的评估模型。

不同智能算法的初级评估结果如表5所示。

表 5 初级评估准确率对比 Table 5 Comparison of accuracy in primary assessment

状态特征	智能算法	评估准确率/%
	ELM	79.14
	HPO-ELM	85.47
DGA	SSA-ELM	82.81
	PSO-SVM	83.59
	HPO-DBN	81.13
	ELM	82.62
	HPO-ELM	87.65
电气试验	SSA-ELM	83.76
	PSO-SVM	84.62
	HPO-DBN	80.42
	ELM	77.86
	HPO-ELM	82.81
油化试验	SSA-ELM	80.52
	PSO-SVM	81.95
	HPO-DBN	80.86

从表 5 中可以发现,结合单一评估特征指标,本 文所提出的 HPO-ELM 模型最高评估准确率可达 87.65%。与 ELM 和 SSA-ELM 模型进行对比,体现 出 HPO 优化算法具有更强的寻优性能,可以为 ELM 寻找更准确的权值,同时提升训练的稳定性;与 PSO-SVM、HPO-DBN 等进行对比,则体现出了 HPO-ELM 模型在处理变压器状态评估的小样本问 题时,可以更准确地寻找变压器状态特征之间的潜 在关系,具有更好的分类性能。

但是,综合训练结果来看,仅依靠单一评估指标,无论采用哪种智能算法都无法取得满意的评估结果,且评估结果的说服力和可信度较差。

# 3.3 综合评估

在变压器状态综合评估的实际情况中,不同的 状态特征对于评估过程的影响程度和可信度存在差 异,ER规则通过设置重要性和可靠性参数可以很好 地解决这一问题,融合过程更符合实际情况。ER规 则中的重要性参数反映了不同状态特征对结果的影响程度,为确保评估过程的客观性,本文采用变异系数法<sup>[27]</sup>确定各状态特征的重要性权重。

变异系数法的权重评价公式为

$$R_{q} = \frac{A_{q}}{\sum_{q=1}^{h} A_{q}} = \frac{D_{q}/\bar{x}_{q}}{\sum_{q=1}^{h} (D_{q}/\bar{x}_{q})}$$
(20)

式中: $R_q$ 为第q个状态变量的重要性权重;h为状态 变量总数; $A_q$ 为第q个状态变量的变异系数; $D_q$ 为第 q个状态变量的标准差; $\bar{x}_q$ 为第q个状态变量的 均值。

利用变异系数法可得到三类状态特征各子变量 的重要性权重,对于各子变量重要性权重进行线性 聚合,可以得到 DGA、电气试验和油化试验对于状态 评估的重要性权重,计算结果如表6所示。

#### 表6 各评估指标的重要性权重

#### Table 6 The importance weight of each evaluation indicator

评估指标	重要性权重	子变量	权重
DGA		H <sub>2</sub>	0.14
	0.37	$C_2H_2$	0.12
		总烃含量	0.11
电气试验	0.33	绕组介质损耗因数	0.11
		极化指数	0.12
		吸收比	0.10
油化试验	0.30	介质损耗因数	0.12
		油击穿电压	0.09
		油中微水	0.09

ER 规则中的可靠性反映了各特征指标对于变 压器状态正确评估的能力,由表5可知DGA、电气试 验和油化试验通过 HPO-ELM 模型进行训练后的评 估准确率分别为 85.47%、87.65% 和 82.81%,由此可 以得到对应的可靠性参数分别为 0.85、0.87 和 0.82。

综上,各评估指标的重要性参数和可靠性参数 如表7所示。

考虑各状态特征的重要性参数与可靠性参数 后,将初步评估得到的概率分配矩阵利用 ER 规则进 行融合得到最终评估结果。本文所提方法的评估结 果与证据理论、模糊理论综合评价等传统方法的评 估结果对比情况如表 8 所示。

	表7	ER规则中各评估指标参数设置		
Table	7 Par	ameter settings for various evaluation		
indicators in ER rules				

评估指标	重要性参数	可靠性参数
DGA	0.37	0.85
电气试验	0.33	0.87
油化试验	0.30	0.82

#### 表8 不同方法融合评估结果对比

Table 8 Comparison of fusion evaluation results of

different methods			
状态特征	评估方法	评估准确率/%	
	本文方法	93.35	
	证据理论	90.55	
DGA+ 由与讨论	Pignistic 概率改进的证据理论	91.51	
电气风速	基于经验和导则	76.85	
	模糊理论综合评价	80.36	
	本文方法	90.77	
	证据理论	89.75	
DGA+	Pignistic 概率改进的证据理论	89.86	
间凡风型	基于经验和导则	77.38	
	模糊理论综合评价	79.65	
	本文方法	91.85	
	证据理论	89.21	
油化试验+ 电气试验	Pignistic 概率改进的证据理论	90.65	
	基于经验和导则	73.25	
	模糊理论综合评价	75.89	
DGA+	本文方法	95.85	
	证据理论	91.43	
电气试验+	Pignistic 概率改进的证据理论	91.66	
油化试验	基于经验和导则	80.15	
	模糊理论综合评价	83.95	

根据表8所示的训练结果,可以得到以下结论:

1)相较于证据理论等融合方法,本文方法通过 确定各证据体的重要性与可靠性参数,评估准确率 可达 95.85%,同时克服了传统证据理论的固有缺 陷,保证了原始证据体所蕴含特征信息的完整性与 特异性,评估结果更符合实际情况。 2)采用单一指标进行评估时,最高准确率仅为 87.65%,而将双指标或三指标进行融合评估后的准 确率均高于单一评估指标。因此,多源信息融合评 估有助于提升评估的准确率,但也要防止过多的评 估指标造成过拟合现象。

# 3.4 实例分析

1)为进一步验证本文方法的准确性和实用性, 选取山东某变电站的2号主变压器的某次检修相关 数据,该主变压器为180 MA、220 kV 油浸式变压器, 2020年投运。变压器的部分实测数据如表9—表11 所示。

# 表9 DGA数据

#### Table 9 DGA data

状态变量	数值	
$H_2/(\mu L/L)$	160	
$C_2H_2/(\mu L/L)$	4	
总烃/(μL/L)	162	
表10 电气i	试验数据	
Table 10 Electric	cal test data	
状态变量	数值	
绕组介质损耗因数/%	0.82	
极化指数	1.5	
吸收比	1.32	
表11 油化i	试验数据	
Table 11 Oil chen	nical test data	
状态变量	数值	
油介质损耗因数	4.2	
油击穿电压/kV	33	
油中微水/(mg/L)	26.2	

首先,将 DGA 数据、电气试验和油化试验数据 通过相对劣化度方法进行归一化处理,然后分别输 入训练好的 HPO-ELM 模型,对应变压器 S1—S4 的 四种状态,得到原始概率分配矩阵 **P**<sub>y</sub> 为

	0.05	0.11	0.23	0.61
$P_{\rm Y}$ =	0.02	0.08	0.37	0.53
	0.06	0.08	0.41	0.45/

结合 3.3 节所设置的重要性与可靠性参数,计算 得到折算后的概率分布  $P'_{Y}$  为

	0.04	0.08	0.16	0.43	0.29
$P'_{\rm Y} =$	0.01	0.06	0.27	0.38	0.28
	0.04	0.05	0.27	0.28	0.36

利用 ER 规则对三种状态特征进行融合,得到融合后的概率分布 **P**<sub>R</sub>为

 $P_{\rm B} = (0.023 \quad 0.046 \quad 0.275 \quad 0.6536)$ 

根据最终融合结果 *P*<sub>R</sub>的概率分配,S4的概率值 最大为 0.653 6,可以判断该变压器为严重状态,变压 器运行受到严重影响,需要及时检修排除故障。实际 情况中,该变压器经停机检修发现线圈有过热情况, 同时内部绝缘有被击穿的痕迹,故障如图 4 所示。因 此本文对该台变压器的评估结果与实际情况相符。



图 4 铁轭垫板绝缘故障 Fig.4 Insulation fault of iron yoke pad

2)根据文献[28]所提供的一组变压器实测案例数据,通过本文模型进行仿真验证,原始概率分配矩阵 **P**<sub>T</sub>为

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{T}} = \begin{pmatrix} 0.06 & 0.10 & 0.12 & 0.72 \\ 0.09 & 0.32 & 0.13 & 0.46 \\ 0.03 & 0.02 & 0.06 & 0.89 \end{pmatrix}$$

融合后各状态的概率为(0.0220 0.1031 0.0217 0.8532)。综合评估为严重状态,文献中该变压器实际为绝缘故障。因此,变压器状态评估结果与实际情况保持一致,具有一定的参考价值。

#### 4 结论

本文将 DGA、电气试验和油化试验作为状态评估的关键特征,利用改进的 HPO-ELM 模型进行训练,并结合 ER 规则实现了信息融合,取得了较为准确和全面的变压器状态评估结果,并得出以下结论:

1)通过与 ELM、SSA-ELM、PSO-SVM 和 HPO-DBN 等模型的对比分析,本文所提出的 HPO-ELM 模型在初步评估过程中具有更强的分类能力,可以 构造更为准确的概率分配矩阵以提高整体评估的准确率。

2)采用单一特征指标结合多种先进智能算法, 评估准确率最高仅为87.65%,不能满足实际工作的 需要。将多个特征指标进行融合评估后,采用本文 方法最高评估准确率可达95.85%,有效提升了状态 评估的准确率。

3)本文通过合理分配评估指标的重要性与可靠 性参数,既克服了传统证据理论面对高冲突证据时 的固有缺陷问题,又增加了证据的客观性,使得证据 在变压器评估的应用场景中具有与实际情况相符的 特性。

#### 参考文献

- [1] 刘云鹏,刘一瑾,刘刚,等.电力变压器智能运维的数字孪生体构想[J].中国电机工程学报,2023,43(22):8636-8652.
   LIU Yunpeng, LIU Yijin, LIU Gang, et al. Digital twin conception of intelligent operation and maintenance of power transformer[J].
   Proceedings of the CSEE,2023,43(22):8636-8652.
- [2] 刘磊,李龙飞,韩雪峰,等.基于SMOTE和随机森林的变压器故 障诊断研究[J].山东电力技术,2023,50(11):11-19.
   LIU Lei, LI Longfei, HAN Xuefeng, et al. Research on transformer fault diagnosis based on SMOTE and random forest [J]. Shandong Electric Power,2023,50(11):11-19.
- [3] 张若愚,齐波,张鹏,等.面向电力变压器状态评价的油中溶解
   气体监测数据补全方法[J].电力自动化设备,2019,39(11):
   181-187.

ZHANG Ruoyu, QI Bo, ZHANG Peng, et al. Method for interpolating monitoring data of dissolved gas in oil for power transformer state assessment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11); 181–187.

- [4] 康佳宇,张沈习,张庆平,等.基于 ANOVA 和 BO-SVM 的变压器 故障诊断方法[J].高电压技术,2023,49(5):1882-1891.
  KANG Jiayu, ZHANG Shenxi, ZHANG Qingping, et al. Fault diagnosis method of transformer based on ANOVA and BO-SVM
  [J].High Voltage Engineering,2023,49(5):1882-1891.
- [5] 刘智超,吐松江·卡日,马小晶,等.基于云相似度与证据融合的
   电力变压器状态评价方法[J].电力系统保护与控制,2023,51
   (20):79-90.

LIU Zhichao, TUSONGJIANG Kari, MA Xiaojing, et al. Condition assessment method for power transformers based on cloud similarity and evidence fusion [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20):79-90.

[6] 禹洪波,袁婉玲,汪敏,等.基于非对称贴近度证据云物元模型 的电力变压器综合状态评估方法[J].电网技术,2021,45(9):
3706-3713.

YU Hongbo, YUAN Wanling, WANG Min, et al. Comprehensive condition assessment of power transformer based on asymmetric nearness degree evidence cloud matter-element model [J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3706-3713.

- MA R, ZHU D G, YAN Z H, et al. Intelligent maintenance decision model of distribution transformer based on multivariate data fusion
   [J]. Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics, 2022, 17(6): 967–973.
- [8] 邹阳,何津,金涛.基于NRS和D-S证据理论的变压器油纸绝缘 状态评估模型[J].电机与控制学报,2021,25(10):89-96. ZOU Yang, HE Jin, JIN Tao. Evaluation model of transformer oilpaper insulation based on neighborhood rough set and dempstershafer evidence theory[J].Electric Machines and Control, 2021,25 (10):89-96.
- [9] 石宜金,谭贵生,赵波,等.基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J].电力系统保护与控制,2022, 50(21):167-176.

SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J].Power System Protection and Control, 2022, 50(21):167–176.

- [10] 詹仲强,陈文涛,郝建,等.基于模糊逻辑和D-S证据理论的变 压器故障诊断方法[J].高压电器,2022,58(11):160-166.
  ZHAN Zhongqiang, CHEN Wentao, HAO Jian, et al. Fault diagnosis method of transformer based on fuzzy logic and D-S evidence theory [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58 (11): 160-166.
- [11] XU Y Y, LI Y, WANG Y J, et al. Integrated decision-making method for power transformer fault diagnosis via rough set and DS evidence theories [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(24): 5774-5781.
- [12] GUO R Y, PENG M F, CAO Z Q, et al. Transformer graded fault diagnosis based on neighborhood rough set and XGBoost [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 243:01002.
- [13] 李思远,国力,许志元,等.基于多源报警信息贝叶斯网络与关 联离散系数的配电网故障台区定位方法[J].山东电力技术, 2024,51(3):45-54.

LI Siyuan, GUO Li, XU Zhiyuan, et al. Fault section location method of distribution network based on multi-source Bayesian network and associated discrete coefficient [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(3):45-54.

[14] 向小民,盛刘宇,刘谦,等.基于特征选择和ICOA-LSSVM的变 压器故障诊断[J/OL].电气工程学报:1-9[2024-11-03].http:// kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20231027.1033.002.html. XIANG Xiaomin, SHENG Liuyu, LIU Qian, et al.Transformer fault diagnosis based on feature selection and ICOA-LSSVM [J/OL]. Journal of Electrical Engineering: 1-9[2024-11-03].http://kns. cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20231027.1033.002.html.

- [15] 刘亚东,严英杰,严波,等.电力装备内部状态反演重构研究框架与应用展望[J].高电压技术,2022,48(8):2883-2896.
  LIU Yadong, YAN Yingjie, YAN Bo, et al. Framework and application prospect of internal state inversion and reconstruction of power equipment[J].High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 2883-2896.
- [16] 罗春辉,瞿纲举,邹同华,等.基于层次分析法和云模型的风电场运行性能多维评价模型[J].现代电力,2021,38(6):601-609.
  LUO Chunhui,QU Gangju,ZOU Tonghua, et al.Multi-dimensional evaluation model of wind farm operation performance based on AHP and cloud model[J].Modern Electric Power, 2021, 38(6): 601-609.
- [17] WANG J, ZHANG X H, ZHANG F F, et al. Review on evolution of intelligent algorithms for transformer condition assessment [J].
   Frontiers in Energy Research, 2022, 10:904109.
- [18] 齐波,张鹏,张书琦,等.数字孪生技术在输变电设备状态评估 中的应用现状与发展展望[J].高电压技术,2021,47(5):1522-1538.
   QI Bo,ZHANG Peng,ZHANG Shuqi, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition

development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment [J].High Voltage Engineering, 2021, 47(5):1522-1538.

- [19] 龚俊祥,徐有琳,张菁,等.新型电力系统下配电网网络结构研究[J].山东电力技术,2024,51(1):45-51.
  GONG Junxiang, XU Youlin, ZHANG Jing, et al. Research on the network structure of new power system distribution network [J].
  Shandong Electric Power,2024,51(1):45-51.
- [20] 王艳,王寅初,赵洪山,等.基于AdaBoost.M2-ISSA-ELM算法的 电力变压器故障诊断方法[J].电力自动化设备,2024,44(9): 205-211.

WANG Yan, WANG Yinchu, ZHAO Hongshan, et al. Power transformer fault diagnosis method based on AdaBoost.M2-ISSA-ELM algorithm [J].Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9):205-211.

[21] 谢明浩,张林鍹,董小刚,等.基于OVMD-HWOA-KELM模型 的变压器油中溶解气体体积分数预测方法[J].高电压技术, 2024,50(8):3793-3804.

XIE Minghao, ZHANG Linxuan, DONG Xiaogang, et al. Prediction method of dissolved gas volume fraction in transformer oil based on OVMD – HWOA – KELM model [J]. High Voltage Engineering, 2024,50(8):3793–3804.

[22] 唐晓,陈芳,许强,等.改进鲸鱼算法优化的多维度深度极限学 习机短期负荷预测[J].山东电力技术,2023,50(1):1-7. TANG Xiao, CHEN Fang, XU Qiang, et al. Short - term load forecasting based on multi - dimensional deep extreme learning machine optimized by improved whale algorithm [J]. Shandong Electric Power,2023,50(1):1-7.

- [23] NARUEI I, KEYNIA F, SABBAGH MOLAHOSSEINI A. Hunterprey optimization: algorithm and applications [J]. Soft Computing, 2022, 26(3): 1279-1314.
- [24] 丘伟兴,赵炼恒,吴波,等.基于证据推理的隧道坍塌多源信息 融合评估[J].湖南大学学报:自然科学版,2024,51(1): 190-200.

QIU Weixing, ZHAO Lianheng, WU Bo, et al. A multi – source information fusion assessment for the tunneling collapse disaster based on evidential reasoning [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2024, 51(1):190-200.

- [25] 王永贵,张鉴.融合概率矩阵分解与ER规则的群组推荐方法
  [J].计算机工程与应用,2023,59(5):252-261.
  WANG Yonggui, ZHANG Jian. Group recommendation method integrating probability matrix decomposition and ER rules [J].
  Computer Engineering and Applications,2023,59(5):252-261.
- [26] 徐宏东,高海波,徐晓滨,等.基于证据推理规则CS-SVR模型的锂离子电池SOH估算[J].上海交通大学学报,2022,56(4): 413-421.

XU Hongdong, GAO Haibo, XU Xiaobin, et al. State of health estimation of lithium-ion battery using a CS-SVR model based on evidence reasoning rule [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2022,56(4):413-421.

[27] 李源,李凤婷,王森,等.基于改进变异系数法与BP神经网络的 售电公司信用评估[J].电网技术,2022,46(11):4228-4237. LI Yuan, LI Fengting, WANG Sen, et al. Credit evaluation of electricity sales companies based on improved coefficient of variation method and BP neural network [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4228-4237.

[28] 代泽荟,经权,孟颖,等.基于多维信息融合的电力变压器故障 诊断方法研究[J].电测与仪表,2024,61(10):67-73.

DAI Zehui, JING Quan, MENG Ying, et al. Research on fault diagnosis method of power transformer based on multi-dimensional information fusion [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024,61(10):67-73.

收稿日期:2024-11-03

修回日期:2025-01-21

作者简介:

陈继明(1970),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统自动 控制、电力系统过电压与新能源发电;

陶志雄(1998),男,硕士,主要研究方向为电力设备智能诊断;

沈志彬(1990),通信作者(1181592715@qq.com),男,工程师,从 事电力电缆故障检测与运维工作;

高 辉(1985),男,工程师,从事电力系统规划、电力设备运维等 工作;

宋军志(1987),男,工程师,从事电力建设、电力系统继电保护等 工作。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.008

# 基于神经网络的分布式光伏故障外特性聚合等值建模

范荣奇1,李 宽2.3\*,王安宁1,高 帅4,黄 涛4

(1.国网山东省电力公司,山东 济南 250001;2.国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250003;
 3.山东省智能电网技术创新中心,山东 济南 250003;4.南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

**摘要:**提出一种基于LSTM 神经网络的分布式光伏故障外特性聚合等值建模方法。该方法可以输出任意出力下等值 光伏系统并网点的*I-V*曲线,在并网点电压跌落后能够预测等值系统的故障特性。相比传统机理建模,该方法无须 对复杂物理系统进行具体建模,能够精确映射配电网的强非线性输入输出。所建立的LSTM 模型首先使用一维卷积 层对光伏出力系数进行特征提取,然后利用两层隐藏层处理序列数据,在全连接层中将向量映射为外特性曲线序 列。基于传统光伏电源模型搭建典型的配电网网络,选择大量不同出力组合进行仿真,为LSTM 模型训练提供有效 的训练集和验证集数据,同时建立独立的测试集测试最优模型的准确性。最后利用最佳模型建立等值配电网系统, 在并网点设置不同程度电压跌落,将故障特性与完整模型的故障特性进行对比,仿真结果可以证明所提方法的可靠 性和实用性。

关键词:分布式光伏;LSTM;神经网络;聚合建模;故障特性 中图分类号:TM743 **文献标志码**:A

文章编号:1007-9904(2025)04-0069-12

# A Neural Network-based Aggregated Modelling Approach for Distributed Photovoltaic Fault External Characteristics

FAN Rongqi<sup>1</sup>, LI Kuan<sup>2,3\*</sup>, WANG Anning<sup>1</sup>, GAO Shuai<sup>4</sup>, HUANG Tao<sup>4</sup>

(1.State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China;
2.State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;
3.Shandong Smart Grid Technology Innovation Center, Jinan 250003, China;
4.Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In this paper, we propose a method for modelling distributed PV power fault output aggregation based on the LSTM neural network. The method can provide the I-V curves of equivalent PV system parallel points under any output and can predict the fault characteristics of the equivalent system after a voltage drop at the parallel point. Compared to traditional mechanism modelling, this method does not require specific modelling of complex physical systems and is able to accurately represent the highly non-linear inputs and outputs of distribution networks. The LSTM model established in this paper first uses a one-dimensional convolutional layer for feature extraction of PV power coefficients, and then two hidden layers are used to process the sequence data, and the vectors are mapped into a sequence of external characteristic curves in the fully connected layer. In this paper, a typical distribution network is constructed based on the traditional PV power model, and a large number of different output combinations are selected for simulation to provide effective training set and validation set data for the LSTM model training, and at the same time, an independent test set is established to test the accuracy of the optimal model. Finally, the optimal model is used to construct an equivalent distribution network system, and different degrees of voltage drops are set at the network connection points to compare the fault characteristics with those of the full model, and the simulation results can prove the reliability and practicality of the proposed method.

Keywords: distributed PV; LSTM; neural networks; aggregation modelling; fault characterization

基金项目:国网山东省电力公司科技项目"高密度、高比例电力电子化区域电网仿真建模及控保协同技术研究"(52062623000W)。 Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company "Research on Simulation Modeling and Cooperative Technology of

Control and Protection for High-Density, High-Proportion Power Electronics-Based Regional Power Grid" (52062623000W).

## 0 引言

随着分布式发电系统的迅速发展,区域配电网 逐渐呈现高密度和高渗透率电力电子化特征<sup>[1]</sup>,馈 入电网的故障电流特性与传统同步发电机相比存在 较大差异,可能会影响现有保护的选择性、速动性、 灵敏性和可靠性<sup>[2]</sup>。另外,配电网的集群化控制通 常采取多种并网运行控制方式,会影响故障隔离以 及重合闸动作,导致故障隔离范围变大、重合闸时间 变长甚至重合失败<sup>[3-4]</sup>。

新能源为主体的新型配电网系统中,高渗透率 分布式电源接入配电网使输配网之间产生了双向功 率流动<sup>[5]</sup>,并且分布式能源受电网调频调峰需求响 应、环境、国家政策等外界因素影响而调整,设备的 供电路径也可能会因消除上级设备过载、故障自愈 等原因进行人工调整或自动控制发生变化,难以准 确整定和计算相关继电保护定值<sup>[6-7]</sup>。

针对上述问题,需要对面向高密度、高比例分布 式光伏接入的区域电网进行聚合等值建模,并分析 分布式光伏的故障特征,提升保护适应能力<sup>[8]</sup>。目 前对分布式光伏电源的建模思路包括传统的机理建 模方法和非机理建模方法<sup>[9-10]</sup>。

传统的机理建模方法需要综合考虑复杂的电力 电子控制特性、电网拓扑结构、线路压降问题以及运 行条件等因素<sup>[11-12]</sup>,其建模过程繁琐且耗时。此外, 由于电力电子设备的高度非线性,机理建模方法很 难准确地捕捉到系统的相互作用效应<sup>[13]</sup>。

因此,采用非机理建模方法对配电网系统进行 等值逐渐成为目前的热门方向<sup>[14-15]</sup>。该方法针对机 理建模过于复杂的问题,采用非机理建模方法,通过 数据获取、处理、模型训练和测试评价步骤,建立了 从分布式发电系统出力系数到聚合外特性曲线的映 射关系。相对于机理建模方法,非机理建模方法能 够更好地处理复杂的非线性关系,并且能够适应不 同的系统和工况条件<sup>[16]</sup>。

神经网络训练由于其强大的非线性拟合能力和 良好的泛化能力逐渐成为目前最热门和最成熟的非 机理建模方法之一。目前常见的神经网络模型主要 包括循环神经网络(recurrent neural network, RNN)<sup>[17]</sup>、长短时记忆网络(long short term memory network, LSTM)<sup>[18]</sup> 以及门控循环网络(gated recurrent unit, GRU)<sup>[19]</sup>等。

LSTM 是一种改进的循环神经网络, 原始的 RNN 仅包含隐藏层(hidden state), 对于短期输入非 常敏感,并且由于梯度消失和梯度爆炸难以处理长 期依赖关系。LSTM 目前已在各种领域证明了在时 间序列模型预测的卓越性能<sup>[20-25]</sup>, 在电力领域方面, LSTM 训练模型被证明可以有效降低短期负荷预测 误差<sup>[26-27]</sup>。相比 LSTM 模型, GRU 的结构更为简单, 计算效率也更高, 但在某些情况下可能会损失一些 长期时序信息。

基于 LSTM 神经网络,提出一种适用于继电保 护分析的分布式电源故障外特性聚合等值建模方 法。首先对目前光伏系统的物理特性、控制策略以 及暂态输出特性展开介绍,并基于此搭建完整的仿 真模型;然后分析LSTM 神经网络前向计算和反向 传播等环节的基本原理,并构建相应的 LSTM 神经 网络模型;利用仿真模型得到的训练集和验证集数 据训练最优的 LSTM 模型,该模型可以预测等效分 布式电源的故障输出外特性。最后利用测试集数据 验证最佳模型的准确性,同时还基于最佳模型搭建 等效物理模型,并将其故障特性与包含完整模型的 仿真模型数据进行对比,验证本文所提方法的可靠 性。通过该方法,可以高效地计算故障后等值系统 的电流输出特性,从而可以有效评估继电保护在高 密度、高渗透率电力电子化特征的配电网中的有效 性和可靠性,为电网的稳定运行提供有效保障。

## 1 光伏系统建模技术

#### 1.1 光伏组件建模

目前太阳能电池的电压电流关系取决于辐照强 度和电池背板温度,其等效电路如图1所示。



图 1 光伏电池组件等效电路 Fig.1 Equivalent circuit of photovoltaic module

由图 1 可得相应光伏电池组件的 I-V 特性方程为

$$I = I_{\rm L} - I_0 \left\{ \exp\left[\frac{q(V + IR_{\rm s})}{AKT}\right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_{\rm s}}{R_{\rm sh}}$$
(1)

式中: $I_L$ 为光生电流; $I_0$ 为二极管反向饱和电流;q为电子电荷,取值为 1.6×10<sup>-19</sup> C;K为玻尔兹曼常数,取值为 1.38×10<sup>-23</sup> J/K;T为绝对温度;A为二极管因子,取值范围 1~5; $R_s$ 为串联电阻; $R_{sh}$ 为并联电阻。

式(1)中 *I*<sub>L</sub>, *I*<sub>0</sub>, *R*<sub>s</sub>, *R*<sub>sh</sub>和 *A* 等参数取值方法复杂, 难以直接利用构造相应的光伏电池模型。目前在仿 真研究中普遍使用技术参数,如短路电流 *I*<sub>se</sub>、开路电 压 *V*<sub>ee</sub>、最大功率点电流 *I*<sub>m</sub>、最大功率点电压 *V*<sub>m</sub>和最 大功率 *P*<sub>m</sub>等。此时相应的光伏组件工程 *I*-*V* 特性方 程为

$$\begin{cases} I = I_{\rm SC} [1 - C_1 (e^{C_{\rm S}V} - 1)] \\ C_1 = (\frac{I_{\rm SC} - I_{\rm m}}{I_{\rm SC}})^{\frac{V_{\rm m}}{V_{\rm m} - V_{\rm m}}} \\ C_2 = \frac{1}{V_{\rm oc}} \ln(\frac{1 + C_1}{C_1}) \end{cases}$$
(2)

#### 1.2 光伏逆变器数学模型

光伏并网逆变器是光伏并网系统的主要控制设备,实现正弦电流并网。光伏逆变器主电路结构如图2所示。



图 2 光伏逆变器主电路结构 Fig.2 The structure of PV inverter

根据图中电压电流参考方向可得出网侧电压电流关系为

$$\begin{bmatrix} e_{a} \\ e_{b} \\ e_{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{a} \\ u_{b} \\ u_{c} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{b} \\ i_{c} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{b} \\ i_{c} \end{bmatrix}$$
(3)

式中:e<sub>a</sub>、e<sub>b</sub>、e<sub>c</sub>为网侧三相电压瞬时值;u<sub>a</sub>、u<sub>b</sub>、u<sub>c</sub>为逆 变器输出三相电压瞬时值;i<sub>a</sub>、i<sub>b</sub>、i<sub>c</sub>为三相电流瞬时 值;L和R分别为滤波电感和电阻。

现有光伏发电系统一般采用基于电网电压定向 的控制技术,为基于 dq 坐标系的双闭环控制。使用 Park 变换可获得 dq 坐标系下逆变器的数学模型,其 中从三相 abc 变换到两相静止坐标系的变换矩阵如 式(4)所示;从两相静止坐标系变换到两相旋转 dq 坐标系的变换矩阵如式(5)所示。

$$C_{3s/2s} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$
(4)

$$\boldsymbol{T}_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}$$
(5)

式中:ω为电网电压角频率。

于是将式(3)变换为 dq 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_{d} = e_{d} + \omega Li_{q} - L \frac{\mathrm{d}i_{d}}{\mathrm{d}t} - Ri_{d} \\ u_{q} = e_{q} - \omega Li_{d} - L \frac{\mathrm{d}i_{q}}{\mathrm{d}t} - Ri_{q} \end{cases}$$
(6)

式中: $e_{a}$ 和 $e_{q}$ 为网侧电压的dq轴分量; $u_{a}$ 、 $u_{q}$ 、 $i_{a}$ 和 $i_{q}$ 分别为逆变器输出电压和电流的dq轴分量。

为消除静差,引入积分环节,可得逆变器输出电 压参考值为

$$\begin{cases} u_{d}^{*} = (k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{d}^{*} - i_{d}) + e_{d} + \omega Li_{q} - Ri_{d} \\ u_{q}^{*} = (k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{q}^{*} - i_{q}) + e_{q} - \omega Li_{d} - Ri_{q} \end{cases}$$
(7)

式中: $u_{a}^{*}$ 、 $u_{q}^{*}$ 分别为 $d_{q}$ 轴电压参考值; $i_{a}^{*}$ 、 $i_{q}^{*}$ 分别为 $d_{q}$ 轴电流参考值; $k_{ip}$ 、 $k_{ii}$ 分别为电流控制器的比例、积分系数;s为拉普拉斯变换中的算子变量。

由式(7)可以得到其控制如图 3 所示。图中,  $U_{PV}$ 、 $I_{PV}$ 分别为光伏阵列的输出电压、电流,经过最大 功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模块 后,获得其直流电压参考值  $u^*_{de}$ ;直流电压参考值  $u^*_{de}$ 与反馈值  $u_{de}$ 作差后经过比例-积分(proportional integral, PI)调节器后作为 d 轴电流分量(有功电流 分量)的参考值  $i^*_d$ ,因变频器一般工作于单位功率 因数状态,所以 q 轴电流(无功电流分量)的参考值  $i^*_q=0$ 。 $i^*_d$ 、 $i^*_q$ 分别与反馈值  $i_d$ 、 $i_q$ 比较后的差值经过 PI 调节器后,并计及相应的耦合项- $Ri_d+\omega Li_q$ 、- $Ri_q \omega Li_d$ 和扰动项  $e_d$ 、 $e_q$ ,便可得到逆变器参考电压  $u^*_d$ 、





 $u_{a}^{*}$ ;再将 $u_{a}^{*}$ , $u_{q}^{*}$ 经过2r/3s变换就可得到三相坐标 系下的电压调制波 $u_{a}^{*}$ , $u_{b}^{*}$ ,其与高频三角波载 波比较后产生脉冲宽度调制(pulse width modulaion, PWM)信号,从而控制逆变器开关管的通断。

### 1.3 光伏逆变器故障穿越控制策略

光伏电源接入 10 kV 及以上母线时,当电网发 生暂态故障引起并网点电压波动后,光伏电源不当 的暂态控制策略将加剧电网的暂态波动,因此要求 其必须具备一定的电网支撑能力。如图 4 所示,在 故障后要求光伏电源提供一定的无功功率支撑,相 应的电流应满足式(8)和式(9)条件。





$$i_{q} = \begin{cases} 1.5(0.9 - U_{T})I_{N}, & 0.2 \le U_{T} \le 0.9 \\ 1.05I_{N}, & U_{T} < 0.2 \\ 0, & U_{T} > 0.9 \end{cases}$$
(8)

$$i_d = \min\left(\sqrt{i_{\max}^2 - i_q^2}, \frac{P}{\sqrt{3} U_{\mathrm{T}}}\right) \tag{9}$$

式中:U<sub>r</sub>为光伏电站并网点电压标幺值;I<sub>N</sub>为逆变器额定并网电流;*i<sub>max</sub>为逆变器*最大输出电流;*P*为逆变器额定输出有功。

对于更低的 10 kV 及以下电压等级,光伏电 源可以具备故障脱离能力。此时,相应的电流 满足:

$$i_{q} = \begin{cases} 1.5(0.9 - U_{\rm T})I_{\rm N}, & 0.2 \leq U_{\rm T} \leq 0.9 \\ 0 & , & U_{\rm T} < 0.2 \\ 0 & , & U_{\rm T} > 0.9 \end{cases}$$
(10)  
$$i_{d} = \begin{cases} 0 & , & U_{\rm T} < 0.2 \\ \min\left(\sqrt{i_{\rm max}^{2} - i_{q}^{2}}, \frac{P}{\sqrt{3} U_{\rm T}}\right), & U_{\rm T} \geq 0.2 \end{cases}$$
(11)

对于配电网中更为常见的屋顶光伏模块,其在 故障时并不要求其输出无功,电流计算式为

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\rm T}} \tag{12}$$

#### 2 分布式电源聚合等值建模

#### 2.1 LSTM网络

基于 LSTM 神经网络对分布式电源故障输出 进行聚合等值建模。相比 RNN, LSTM 可以稳定处 理长期时序关系,其主要区别在于 LSTM 增加了单 元状态(cell state)。 LSTM 的基本原理如图 5 所 示,可以看出, LSTM 在 t 时刻的输出不仅要参考 t--1 1 时刻的隐层输出  $h^{t-1}$ ,同时也需要参考 t--1 时刻 的单元状态  $c^{t-1}$ 。同时,在 LSTM 中又引入遗忘 门、输入门、新记忆门和输出门来控制长期单元 状态 c。

2.1.1 LSTM的前向计算

具体而言,LSTM 的遗忘门将"遗忘"上一时刻的部分单元状态,决定上一时刻的单元状态 c<sup>-1</sup>保 留到当前时刻 c<sup>i</sup>的信息含量,其相应函数可以表 示为

$$f^{t} = \sigma(\boldsymbol{W}_{f}\boldsymbol{h}^{t-1} + \boldsymbol{U}_{f}\boldsymbol{x}^{t} + \boldsymbol{b}_{f})$$
(13)

式中: $W_{f}$ 和 $U_{f}$ 分别为遗忘门对隐藏层输入和直接 输入的权重矩阵; $b_{f}$ 为遗忘门的偏置项; $\sigma$ 为 Sigmoid 函数,是一种常见的激活函数,其作用是引 入非线性映射,提高神经网络的表达能力和泛化 能力。

LSTM 的输入门决定了当前时刻的输入 x'保留 到单元状态 c'的信息含量,其相应函数可以表示为  $\mathbf{i}^{t} = \tanh(\mathbf{W}_{i}\mathbf{h}^{t-1} + \mathbf{U}_{i}\mathbf{x}^{t} + \mathbf{b}_{i})$ (14)

式中: W<sub>i</sub>和 U<sub>i</sub>分别为输入门对隐藏层输入和直接输入的权重矩阵; b<sub>i</sub>为输入门的偏置项; tanh 为双曲正切函数, 也是一种常见的激活函数, 其作用与Sigmoid函数类似。

接下来,计算描述当前输入的单元状态 g<sup>4</sup>,这一 过程有时也被称为 LSTM 的新记忆门,其相应函数 可以表示为

 $g' = \tanh(W_{g}h'^{-1} + U_{g}x' + b_{g})$  (15) 式中: $W_{g}$ 和 $U_{g}$ 分别为新记忆门对隐藏层输入和直接 输入的权重矩阵; $b_{g}$ 为新记忆门的偏置项;根据图 5 可以得到当前时刻的单元状态c'为

$$\boldsymbol{c}^{t} = \boldsymbol{c}^{t-1} \odot \boldsymbol{f}^{t} + \boldsymbol{i}^{t} \odot \boldsymbol{g}^{t}$$
(16)

式中: ① 为矩阵的哈达玛积。

这样,单元状态 c<sup>+</sup>即包含当前的记忆和长期的 记忆,然后由输出门决定 c<sup>+</sup>输出到 h<sup>+</sup>的信息含量,其 相应函数可以表示为

$$\boldsymbol{o}^{t} = \boldsymbol{\sigma} \left( \boldsymbol{W}_{o} \boldsymbol{h}^{t-1} + \boldsymbol{U}_{o} \boldsymbol{x}^{t} + \boldsymbol{b}_{o} \right)$$
(17)

式中:W。和U。分别为输出门对隐藏层输入和直接输入的权重矩阵;b。为输出门的偏置项;LSTM的最终输出由输出门和当前时刻的单元状态共同决定,即为

$$\boldsymbol{h}^{t} = \boldsymbol{o}^{t} \odot \tanh(\boldsymbol{c}^{t}) \tag{18}$$

2.1.2 LSTM 的反向传播

LSTM 在训练过程中首先通过前向计算得到每



Fig.5 Basic principles of the LSTM algorithm

个神经元的输出值,即图 5 中的 f'、i'、o'、c' 以及 h',进 而反向计算每个神经元的误差,计算误差时从当前 时刻出发,反向计算出每一时刻的误差;同时将误差 项向上一层传播,得到每一层的误差。

首先由当前时刻的误差项反向计算上一时刻的 误差项,定义*t*时刻的误差项δ<sup>+</sup> 为

$$\boldsymbol{\delta}^{t} \doteq \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \boldsymbol{h}^{t}} \tag{19}$$

式中: *E* 为损失函数,可以根据定义选择不同的损失 函数,使用均方误差(mean square error, MSE)作为损 失函数,即为

$$\delta_{\rm MSE} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left| y_n - \hat{y}_n \right|^2$$
(20)

式中:N为采样点总个数; $y_n$ 和 $\hat{y}_n$ 分别为第n个采样 点的真实值和LSTM模型估计值。

则t-1时刻的误差项 $\delta^{t-1}$ 为

$$\boldsymbol{\delta}^{t-1} = \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \boldsymbol{h}^{t-1}} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{h}^{t}}{\partial \boldsymbol{h}^{t-1}}\right)^{\mathrm{T}} \frac{\partial \mathrm{E}}{\partial \boldsymbol{h}^{t}} = \left(\frac{\partial \boldsymbol{h}^{t}}{\partial \boldsymbol{h}^{t-1}}\right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\delta}^{t} \quad (21)$$

结合式(16)和式(18),式(21)可以进一步计 算为

$$\delta^{t^{-1}} = \left(\frac{\partial h^{t}}{\partial o^{t}} \frac{\partial o^{t}}{\partial h^{t^{-1}}}\right)^{\mathrm{T}} \delta^{t} + \left(\frac{\partial h^{t}}{\partial c^{t}} \frac{\partial c^{t}}{\partial f^{t}} \frac{\partial f^{t}}{\partial h^{t^{-1}}}\right)^{\mathrm{T}} \delta^{t} + \left(\frac{\partial h^{t}}{\partial c^{t}} \frac{\partial c^{t}}{\partial f^{t}} \frac{\partial f^{t}}{\partial h^{t^{-1}}}\right)^{\mathrm{T}} \delta^{t} + \left(\frac{\partial h^{t}}{\partial c^{t}} \frac{\partial c^{t}}{\partial g^{t}} \frac{\partial g^{t}}{\partial h^{t^{-1}}}\right)^{\mathrm{T}} \delta^{t} + \left(\frac{\partial h^{t}}{\partial c^{t}} \frac{\partial c^{t}}{\partial g^{t}} \frac{\partial g^{t}}{\partial h^{t^{-1}}}\right)^{\mathrm{T}} \delta^{t} \right)^{\mathrm{T}} \delta^{t}$$

$$= W_{o}^{\mathrm{T}} \delta_{o}^{t} + W_{f}^{\mathrm{T}} \delta_{f}^{t} + W_{i}^{\mathrm{T}} \delta_{i}^{t} + W_{g}^{\mathrm{T}} \delta_{g}^{t} + V_{g}^{\mathrm{T}} \delta_{g}^{t} + V_{g}^{\mathrm{T}}$$

 $\left[ (\boldsymbol{\delta}_{g}^{t})^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{\delta}^{t})^{\mathrm{T}} \odot \boldsymbol{o}^{t} \odot (1 - \tanh(\boldsymbol{c}^{t})^{2}) \odot \boldsymbol{g}^{t} \odot \boldsymbol{i}^{t} \odot (1 - (\boldsymbol{g}^{t})^{2}) \right]$ 

向上一层传播的误差项可以类似得到,在此不 再赘述。

得到误差项后,可以方便地计算出损失函数对 每个门权重矩阵和偏置项的权重梯度 ∂E/∂W<sub>tride</sub>, ∂E/∂U<sub>tride</sub>,和 ∂E/∂b<sub>tride</sub>,在训练过程中使用自适应矩 估计(adaptive moment estimation, Adam)梯度下降优 化算法。Adam 是一种随机目标函数自适应优化算 法,计算时基于一阶梯度,计算方便,并且可以加速 模型参数的更新。LSTM 根据梯度在损失函数梯度 的相反方向上实时更新每个门的权重矩阵和偏置 项,然后再次输入数据进行前向计算,如此循环不断 进行训练。

### 2.2 聚合等值建模过程

利用 LSTM 模型建立从分布式发电系统出力系 数到聚合外特性曲线的映射关系。基于 LSTM 模型 的神经网络训练模型如图 6 所示。LSTM 模型主要 由输入层、隐含层、全连接层和输出层组成。首先使 用一维卷积层对输入模型的光伏出力数据进行特征 提取,并利用 Tanh 函数进行激活。然后建立两层 LSTM 隐含层对卷积层的输出进行处理,最后使用全 连接层将 LSTM 的输出映射为外特性曲线序列,并 使用 Sigmoid 激活后作为输出。图 6 中,将隐含层模 块详细展开即为图 5 的 LSTM 原理图,其中隐层输出 h(t)和单元状态 c(t)沿时间链传递,隐含层 1 的输 出 h(t)作为隐含层 2 的输入 x(t),隐含层 2 的输出 作为全连接层的数据输入。



基于以上理论分析,对分布式电源故障输出聚 合建模的过程进行详细介绍,其具体的建模、训练以 及评价过程如图7所示。图7中,第1)、2)步根据第 1节的理论,在仿真软件上建立相应物理模型并多 次仿真获得神经网络训练所需的输入和输出数据; 第3)步基于图6建立相应的LSTM神经网络;第4)、 5)、6)步表示神经网络训练的3个过程,即训练模 型,获取最佳模型以及测试模型;第7)步则利用真实 物理模型检验训练模型的可靠性。

第2)步在仿真模型获取数据集后,为防止数据 分布过于分散,同时加速网络收敛,通常需要对输入 输出数据进行归一化操作。具体公式为

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$
(24)

式中:x、x<sub>nom</sub>分别为归一化前后的值;x<sub>max</sub>、x<sub>min</sub>分别为 样本的最大值和最小值。



Fig.7 Logical block diagram of distributed power output aggregation modelling

第6)步采用常见的模型评价指标,包括平均绝 对误差(mean absolute error, MAE)、平均相对误差 (mean relative error, MRE)、峰值绝对误差(peak absolute error, PAE)和峰值相对误差(peak relative error, PRE),其计算公式分别为

$$\begin{cases} \delta_{\text{MAE}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} |y_n - \hat{y}_n| \\ \delta_{\text{MRE}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} \left| \frac{y_n - \hat{y}_n}{\hat{y}_n} \right| \\ \delta_{\text{PAE}} = \max |y_n - \hat{y}_n|, n = 1, 2, ..., N \\ \delta_{\text{PRE}} = \max \left| \frac{y_n - \hat{y}_n}{\hat{y}_n} \right|, n = 1, 2, ..., N \end{cases}$$
(25)

## 3 仿真算例

#### 3.1 建立物理模型

以一典型的分布式电源配电网网络为例,利用 LSTM 神经网络对其等效输出特性进行等值,利用测 试集数据检验训练结果,并和真实物理模型进行对 比验证所提算法的有效性。光伏配电网的网络拓扑 如图 8 所示。考虑 5 台分布式电源,其中 3 台具有 低电 压穿越能力 PV1, PV2 和 PV3,容量分别为 2 MW,4 MW 和 6 MW,对应图 8 中的蓝色 PV。PV1 和 PV2 在端电压低于 0.2 pu 时会脱网, PV3 在端电 压低于 0.2 pu 时仍保持并网能力。PV4 和 PV5 为屋 顶式光伏电源,不具低电压穿越能力,容量分别为 30 kW 和 50 kW,对应图 8 中的绿色 PV。线路总阻 抗为 1.92+j2.073 Ω,对应线路长度约为 6 km。线路 负载分散在两个节点,总负载为 5 MW,功率因数 为 0.95。



图 8 分布式电源网络拓扑图 Fig.8 Distributed power source network topology

在 PSCAD 中搭建上述模型,每次仿真时 5 台 PV 设置不同出力,分别得到每次出力情况下分布式 电源聚合等值系统的 *I-V* 外特性曲线。为此,将系 统等值点电压源设置为仿真时间的函数为

$$U = \begin{cases} 1 & , t \le 0.4 \text{ s} \\ 1.4 - t & , 0.4 \text{ s} < t < 1.4 \text{ s} \\ 0 & , t \ge 1.4 \text{ s} \end{cases}$$
(26)

仿真开始时,由于需要初始化数值,仿真在一定 时间后计算才能稳定,因此设置0.4s后电压逐渐下 降。仿真1.4s后即可得到输出电流随线路电压的 变化情况。

图 9 和图 10 分别展示了当并网点电压如式 (26)变化时,5 台 PV 选择不同出力的线路电流有效

值和相位变化曲线。图中,由于 PV4 和 PV5 的容量 较小,当其减少出力后,电流变化并不明显。实际仿 真时将随机设置大量不同的 PV 出力组合,将相应的 线路电流有效值和相位作为训练集和测试集的样本 数据。

#### 3.2 神经网络模型训练和测试

得到样本数据后,需要将数据处理为适合神经 网络学习的形式。对电流有效值序列,采用滑动平 均滤波法进行平滑处理;对于电流相位序列,将相位 数据统一在(-180°,180°)区间。然后利用式(24)进 行归一化处理。



Fig.9 Curves of current RMS for different PV outputs





仿真模型中各分布式电源出力系数在 0~1 范围 内均匀采样,随机生成多组样本。训练集数据包含 3 125 组样本,验证集由从前述训练集样本中随机抽 取的 64 组数据构成,测试集由重新仿真 PV 出力随 机变化生成的 64 组数据构成。测试集可测试 LSTM 模型训练的准确程度。

搭建 LSTM 神经网络模型,输入是光伏出力系 数序列,输出是光伏外特性数据序列,外特性数据序 列中的前 N 个数据点代表电流相位序列,后 N 个数 据点代表电流有效值序列。具体而言,使用通道数 为 64 的一维卷积层(Tanh 激活)对输入模型的光伏 出力系数矩阵进行特征提取,输出形状为(*B*,64)的 特征图,其中 *B* 为批量大小;使用两层隐藏层特征数 分别为 256 和 512 的 LSTM 网络对序列数据进行处 理,输出形状为(*B*,64)的向量;使用全连接层将向量 映射为外特性曲线序列,并使用 Sigmoid 激活后输出 形状为(*B*,2*N*)的向量,其中 N 为采样点总个数。

利用训练集和验证集训练并优化 LSTM 神经网络的各层权重,得到损失函数最小模型,即最优模型。在测试集中随机选取两组不同的出力组合,利用最优模型预测其输出电流有效值和相位,并与PSCAD 仿真结果相比较,相应的对比曲线图如图 11和图 12 所示。图中可以看出,在不同出力组合情况下,LSTM 模型的预测数据和 PSCAD 仿真数据均基本吻合,证明经过训练的最佳模型能够在电压跌落后预测并网点的输出电流。



进一步利用所有测试集的 64 组数据综合评价 最佳模型的准确性,评价指标选取式(25)所列方程, 得到电流有效值的 MAE、MRE、PAE、PRE 分别为 2.54 A、0.51%、15.15 A、2.55%,电流相位 MAE、PAE 分别为 0.55°、21.70°。可知基于 LSTM 训练的等效 模型可以很好地拟合包含大量光伏电源配电网的输 出外特性。

## 3.3 训练模型和测试真实模型对比

为进一步检验 LSTM 训练模型的可靠性,在 MATLAB/Simulink 中搭建电力系统,完整搭建模型 如图 13 所示。

该模型首先需要输入5台PV的出力,利用最 佳模型预测当前出力下并网点的*I-V*特性。之后 在模型中对并网点置不同程度的电压跌落来模拟 电网三相故障,本案例中并网点电压随时间的变化 函数为

$$U = \begin{cases} 1.0 , 0 < t \le 0.2 \text{ s} \\ 0.8 , 0.2 < t \le 0.4 \text{ s} \\ 0.5 , 0.4 < t \le 0.6 \text{ s} \\ 0.1 , 0.6 < t \le 0.8 \text{ s} \end{cases}$$
(27)





在仿真系统图中,黄色框内采集并网点电压,基 于最佳模型得到的 I-V 特性输出相应的电流幅值和 相位。蓝色框内则根据电流幅值和相位向电网输出 三相对称电流,频率跟踪电网频率。

分别选择 PV 出力系数为[1.0,0.8,0.4,0.9,0.7]





和[0.3,0.2,0.1,0.6,0.5],将线路电流波形与 PSCAD 完整模型仿真结果进行对比。图 14 展示了两种出力情况下基于 LSTM 模型的电力系统与仿真模型电流有效值的波形对比。

由图 14 中可以看出,基于 LSTM 模型的电力系 统在电压跌落后能立即达到稳定值,而仿真模型则 需要经历短期的暂态过程。这是由于基于 LSTM 的 模型完全等效为一个理想的压控电流源,当并网点 电压发生突变后,输出电流也立即跟踪到相应值。 而在实际系统中由于线路电感等影响线路电流无法 发生突变。



另外,在不同的出力情况下,两种模型在电压跌 落不同程度后稳态值非常接近。表1总结了两种模 型在不同出力下的稳态误差,表1中同样证明,基于 LSTM 的等效模型能够比较精准地预测实际系统并 网点在发生三相故障后的稳态特性。 表 1 基于LSTM等效模型与完整仿真模型故障稳态误差 Table1 Fault steady state errors between LSTM equivalent models and complete simulation models

PV出力	稳态误差/%				
	U=1.0	<i>U</i> =0.8	<i>U</i> =0.5	U=0.1	
[1.0,0.8,0.4,0.9,0.7]	0.18	0.16	0.26	0.36	
[0.3,0.2,0.1,0.6,0.5]	-1.27	1.48	-0.23	-0.65	

#### 4 结论

提出一种适用于继电保护分析的分布式电源故 障外特性聚合等值建模方法,主要结论如下:

1)所提方法不依赖于特定的物理机理,而是通 过数据驱动的方式建立模型,利用神经网络捕捉复 杂系统的非线性关系,提高了故障特性聚合等值的 效率、准确性与灵活性。

2)所提方法适用于线路、母线、区域电网等各层级的分布式电源故障特性聚合建模,具有一定普适性。

3)所提方法可实现任意出力场景的分布式电源 聚合故障特性建模,能够适应新能源发电出力存在 波动的实时建模需求。

4)所提方法为继电保护分析和决策提供了准确 可靠的参考,有助于优化和改进继电保护策略,有利 于保护定值的整定计算,提高电网的稳定性和可 靠性。

未来,将进一步丰富和扩展所提方法,主要的研 究方向包括:

1)目前所提方法可以得到故障后的电气稳态 量,但对暂态过程尚无法进行等效,未来将尝试利用 LSTM 训练预测故障后的完整暂态过程。

2)所提方法目前适用于稳态和三相故障后的聚 合建模,对于不对称故障下的训练建模可以类比进 行处理。

#### 参考文献

[1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展 望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.

ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J].Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.

- [2] SUN H B, GUO Q L, QI J J, et al. Review of challenges and research opportunities for voltage control in smart grids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4):2790-2801.
- [3] 宋健,许喆,翟爽,等.分布式电源接入配电网的继电保护研究
   [J].山东电力技术,2018,45(10):27-31.
   SONG Jian, XU Zhe, ZHAI Shuang, et al. Study on relay protection of distributed generation accessing distribution network [J].
   Shandong Electric Power, 2018,45(10):27-31.
- [4] 张海春,陈望达,沈浚,等.计及灵活性资源的配电网韧性研究 评述[J].电力建设,2023,44(12):66-84.
   ZHANG Haichun, CHEN Wangda, SHEN Jun, et al. Review of power distribution network resilience studies considering flexibility resources[J].Electric Power Construction,2023,44(12):66-84.
- [5] ZHEN Z J, LIU Z, WANG L M, et al. Design of distributed intelligent terminal system of electric distribution network based on blockchain technology [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1626(1):012066.
- [6] 高玉雅,王佳玉,孙宇笛,等.考虑分布式电源与随机负荷的主动配电网继电保护新方法[J].电力与能源,2021,42(1):14-19.
   GAO Yuya, WANG Jiayu, SUN Yudi, et al. A new relay protection method for active distribution networks considering distributed power sources and stochastic loads [J]. Power & Energy, 2021, 42 (1):14-19.
- [7] 黄强,李宽,丁敬明,等.含分布式光伏接入的有源配电网故障 区段定位新方法[J].山东电力技术,2023,50(11):68-74.
   HUANG Qiang, LI Kuan, DING Jingming, et al. A novel fault section location method of active distribution network with the integration of distributed photovoltaic [J]. Shandong Electric Power,2023,50(11):68-74.
- [8] 肖繁,夏勇军,张侃君,等.含新能源接入的配电网网络化保护 原理研究[J].电工技术学报,2019,34(增刊2):709-719. XIAO Fan, XIA Yongjun, ZHANG Kanjun, et al. Research on network protection principle of distribution network with new energy access[J].Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,34(S2):709-719.
- [9] 李晶,许洪华,赵海翔,等.并网光伏电站动态建模及仿真分析
  [J].电力系统自动化,2008,32(24):83-87.
  LI Jing, XU Honghua, ZHAO Haixiang, et al. Dynamic modeling and simulation of the grid connected PV power station [J].
  Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24):83-87.
- [10] 刘东冉,陈树勇,马敏,等.光伏发电系统模型综述[J].电网技 术,2011,35(8):47-52.

LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al.A review on models for photovoltaic generation system [J].Power System Technology, 2011,35(8):47-52.

[11] 秦岭,谢少军,杨晨,等.太阳能电池的动态模型和动态特性[J].
 中国电机工程学报,2013,33(7):19-26.
 QIN Ling, XIE Shaojun, YANG Chen, et al. Dynamic model and

dynamic characteristics of solar cells [J].Proceedings of the CSEE , 2013, 33(7): 19-26.

- [12] TABONE M D, CALLAWAY D S. Modeling variability and uncertainty of photovoltaic generation: a hidden state spatial statistical approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):2965-2973.
- [13] 于鸿儒,苏建徽,王一丁,等.并网逆变器降阶模型及其构建方法的分析与对比[J].电力系统自动化,2020,44(10):155-165.
  YU Hongru, SU Jianhui, WANG Yiding, et al. Analysis and comparison of reduced-order model and modeling method for grid-connected inverter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(10):155-165.
- [14] 寇凌峰,徐毅虎,侯小刚,等.一种大规模分散光伏接入配电网的集群划分方法[J].可再生能源,2019,37(4):525-530.
  KOU Lingfeng, XU Yihu, HOU Xiaogang, et al. Cluster partition method for large scale distributed photovoltaic in distribution network[J].Renewable Energy Resources,2019,37(4):525-530.
- [15] 兰天楷,孙华东,王琦,等.考虑分布式新能源的有源综合负荷 模型[J/OL].电工技术学报:1-15.http://doi.org/10.19595/j. cnki.1000-6753.tces.231901.
  LAN Tiankai, SUN Huadong, WANG Qi, et al. Active synthesis load model considering distributed renewable energy source [J/ OL].Transactions of China Electrotechnical Society,:1-15,http:// doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231901.
- [16] WU H B, ZHANG J J, LUO C, et al. Equivalent modeling of photovoltaic power station based on canopy-FCM clustering algorithm[J].IEEE Access, 2019, 7:102911-102920.
- [17] ELMAN J.Finding structure in time[J].Cognitive Science, 1990, 14(2):179-211.
- [18] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J.Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735–1780.
- [19] CHUNG J, GULCEHRE C, CHO K, et al. Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling [EB / OL].2014:1412.3555.https://arxiv.org/abs/1412.3555v1.
- [20] YU Y, SI X S, HU C H, et al. A review of recurrent neural networks: lstm cells and network architectures [J]. Neural Computation, 2019, 31(7):1235–1270.
- [21] SHERSTINSKY A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network [J]. Physica D:Nonlinear Phenomena, 2020, 404:132306.
- [22] DIPIETRO R, HAGER G D.Deep learning: RNNs and LSTM[M]// Handbook of Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention.Amsterdam:Elsevier, 2020:503-519.
- [23] 李冬辉,尹海燕,郑博文,等.改进的LSTM方法在冷水机组传感 器故障检测中的应用[J].电工技术学报,2019,34(11):2324-2332.

LI Donghui, YIN Haiyan, ZHENG Bowen, et al. Application of improved LSTM method in sensor fault detection of the chiller[J].

Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (11) : 2324-2332.

- [24] WANG T, ZHANG L, WANG X F.Fault detection for motor drive control system of industrial robots using CNN-LSTM-based observers [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2023, 7(2):144-152.
- [25] 苏宁,李亚锦,张婉莹,等.基于LSTM算法的变电设备发热预测 技术研究[J].山东电力技术,2021,48(6):10-14.
  SU Ning, LI Yajin, ZHANG Wanying, et al. Researc on heating defect prediction of substation equipment based on LSTM [J].
  Shandong Electric Power,2021,48(6):10-14.
- [26] 陆继翔,张琪培,杨志宏,等.基于CNN-LSTM 混合神经网络模型的短期负荷预测方法[J].电力系统自动化,2019,43(8): 131-137.

LU Jixiang, ZHANG Qipei, YANG Zhihong, et al.Short-term load forecasting method based on CNN-LSTM hybrid neural network model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (8) : 131-137.

[27] 杨少波,刘道伟,安军,等.基于长短期记忆网络的电网动态轨

迹趋势预测方法[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2854-2865.

YANG Shaobo, LIU Daowei, AN Jun, et al. Trend prediction method of power network dynamic trajectory based on long short term memory neural networks[J].Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9):2854-2865.

收稿日期:2024-04-19

#### 修回日期:2024-06-20

#### 作者简介:

范荣奇(1985),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为继电保护;

李 宽(1988),通信作者(lk\_0313@sina.com),男,博士,正高级 工程师,主要研究方向为继电保护;

王安宁(1980),女,博士,正高级工程师,主要研究方向为继电保护;

高 帅(1994),男,博士,工程师,从事线路继电保护工作;

黄 涛(1988),男,博士,高级工程师,从事线路继电保护工作。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.009

## ·输变电·

# 不同运行年限高压电缆 XLPE 绝缘特性及温度场仿真研究

段玉兵1,徐庆文1,罗 文2,兰 锐2,李国倡2\*

(1.国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250003;

2. 青岛科技大学先进电工材料研究院高压绝缘系统与先进电工材料山东省工程研究中心,山东 青岛 266042)

摘要:高压交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)电缆广泛应用于电力输电网络中,随着电缆运行年限增加, XLPE绝缘会在电、热、环境等应力作用下发生老化。针对此问题,收集了山东多根不同年限退运110 kV XLPE电缆,通过对电缆绝缘层进行电气和理化性能分析,研究总结了 XLPE绝缘性能变化规律,并对电缆的实际运行的温度场状况进行有限元仿真。结果表明:110kV高压电缆随着服役年限增加,XLPE绝缘试样的工频击穿场强和体积电阻率明显降低,服役20年后分别降低了31.09%和近两个数量级,相对介电常数及介质损耗角正切值显著增大,服役20年后分别增大了16.73%和1457.34%;运行20年电缆绝缘副产物的含量相较于新电缆试样明显增加;随着服役年限增加,稳态下电缆内部温度分布逐渐增长,服役20年后电缆内部最高温度增长了6.66%,绝缘层温差增长了19.92%,且外护套表面的温度明显增长。

文章编号:1007-9904(2025)04-0081-08

# Simulation Study of XLPE Insulation Characteristics and Temperature Field of High-voltage Cables With Different Operating Ages

DUAN Yubing<sup>1</sup>, XU Qingwen<sup>1</sup>, LUO Wen<sup>2</sup>, LAN Rui<sup>2</sup>, LI Guochang<sup>2\*</sup>

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

2.Shandong Province Engineering Research Center for High Voltage Insulation Systems and Advanced Electrotechnical Materials, Advanced electrical Materials Research Institute, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: High-voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cables are widely used in power transmission networks. With the increasing operating ages of the cable, the XLPE insulation will be aging under the stress of electric, thermal, environmental and other stresses. To solve the issue, a number of retired 110 kV XLPE cables of different ages in Shandong area were collected, and the change rule of XLPE insulation performance was analyzed through the electrical, physical and chemical property analysis of the cable insulation layer. Then, the temperature field condition of the actual operation of the cable was simulated by finite element simulation. The results show that: for 110 kV high-voltage cable, with the increase of service life, frequency breakdown field strength and volume resistivity of XLPE insulation specimen decreased significantly by 31.09% and nearly two orders of magnitude, respectively, after 20 years of service. While, relative dielectric constant and dielectric loss angular tangent value increase significantly by 16.73% and 1457.34%, respectively. In addition, the content of cable insulation by-products increase significantly with 20 years of service compared to new cable specimen. With the increase of service, the maximum internal temperature distribution of the cable in steady state increase gradually. After 20 years of service, the maximum internal temperature of the cable increases by 6.66%, the temperature difference of the insulation layer increases by 19.92%, and the temperature on the surface of the outer sheath increases significantly.

Keywords: retired cable; XLPE insulation; electrical property; physical and chemical properties; finite element simulation

基金项目:国网山东省电力公司科技项目"高压电缆主绝缘层-半导电屏蔽层同步老化特性研究"(52062621N003)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company "Study on the Synchronous Aging Characteristics of the Primary Insulation Layer and the Semi-conductive Shielding Layer of High-voltage Cables" (52062621N003).

## 0 引言

交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)电缆由于其绝缘性能优异、敷设不受地势影响、附件制作安装简便、应用场合广等优点而被广泛应用于输电系统中<sup>[1-4]</sup>。运行中的电缆绝缘劣化状况一直是电网运行单位关注的重点,随着电缆线路运行年限的不断增加,电缆绝缘老化将成为影响电缆线路故障率的一个重要因素<sup>[5-7]</sup>。

高压 XLPE 电缆线路运行环境错综复杂,其绝 缘老化特性受电、热、机械、化学等多重应力的长期 影响<sup>[8-11]</sup>。随着电缆线路运行年限的增加,在电、热 应力的长期作用下,XLPE 绝缘的化学成分、结晶结 构以及热力学性能等微观层面出现劣化,进而对介 电特性以及空间电荷分布等介观层面造成消极影 响<sup>[12-14]</sup>,最终可能导致电缆绝缘性能在宏观层面上 的失效,引发严重的停电事故。

对电缆进行长期服役后的绝缘特性评估并对电 缆实际运行的温度场状况进行模拟仿真,是判定其 安全性和可靠性的关键[15-17]。赵艾萱等[18]对退运 XLPE 电缆进行了极化去极化电流测试,给出了电缆 老化程度与运行年限、长度、敷设方式、负荷类型等 台账参数之间的关系,并采用反映介质内部陷阱的 参数A和老化因子 Q 对电缆整体老化状态进行评 估。罗潘等人<sup>[19]</sup>对多根退役电缆的 XLPE 绝缘进行 分析,研究发现 XLPE 绝缘内部交联点处某些化学 键的断裂,分子链段活动性的增强,导致其弹性模量 和断裂能等力学性能的降低。Nedjar M. 等人<sup>[20]</sup>对高 压电缆绝缘的介电特性进行研究,发现 XLPE 绝缘 的介电损耗和电导率在发生热氧老化后出现明显增 大。但也存在许多不足,如由于高压电缆主绝缘层 具有较大的厚度,而加速老化实验的研究对象一般 为 XLPE 绝缘切片或小段电缆试样,未充分考虑到 由电缆结构特性引起的温度场分布变化以及不同绝 缘层位置之间的联系对 XLPE 绝缘老化特性的影 响[21-23],研究结果与电缆实际运行情况存在差异。

因此,为充分研究不同年限退运高压 XLPE 电缆主绝缘的绝缘老化特性,选取 110 kV 新电缆的 XLPE 绝缘和服役运行 10 年、20 年后退运 110 kV 电缆的 XLPE 绝缘为实验对象,对比分析不同年限退

运电缆在电气性能和理化性能的差别,进而获得高 压电缆 XLPE 绝缘在服役过程中的性能变化规律, 并对电缆实际运行的温度场状况进行有限元仿真。 该工作可以对退役规划提供重要参考依据。

## 1 试样制备及实验方法

#### 1.1 试样制备

实验中采用的试样取样于不同运行年限的退运 电缆,将所有试样按运行年限不同分为四类:新电缆、运行5年电缆、运行10年退运电缆和运行20年 退运电缆。

退运电缆试样制备过程如图 1 所示,参照 IEC 60243-1-2013标准,采用切片机对电缆绝缘层 分层进行规范化切片制样,获取厚度 1 mm 的长条 形试样,以便进行后续性能检测。长条试样的宽度 20 mm 用于测试介电性能和理化性能,25 mm 用于 测试击穿性能,50 mm 用于测试体积电阻率。



(a)收集电缆
 (b)横向切片
 图1 试样制备
 Fig.1 Sample preparation

#### 1.2 实验方法

1.2.1 红外光谱测试

傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectrometer, FTIR)广泛用于研究各种材料的结构, 对识别各种官能团的种类非常敏感。红外光谱仪的 测试实际上是分析计算了老化试样对红外光的吸收 程度与发射波长的关系。波长与波数之间的关系为

$$\gamma = \frac{10^4}{n_1} \tag{1}$$

式中:γ为波数,cm<sup>-1</sup>;n<sub>1</sub>为波长,μm。实验前将试样 置于 60 ℃烘箱中 2 h,除去试样中的水分。扫描波 数设为 4 000 ~ 5000 cm<sup>-1</sup>。对比分析不同运行年限 下 XLPE 老化试样的官能团变化规律。

#### 1.2.2 击穿场强测试

采用高压击穿测试仪,测试不同年限下退运电缆试样的击穿场强。根据标准 GB/T 1408—2006,采用圆柱形电极,电极直径为 25 mm,为了避免发生闪络现象,采用硅油作为液体介质,试样厚度为 1 mm,采用交流升压方式,升压速率为 1 000 kV/s。

实验采用弱点击穿理论对老化和未老化绝缘层 进行 Weibull 分布分析, Weibull 公式为

$$P(E) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E}{\alpha}\right)^{\beta}\right]$$
(2)

式中:*P*(*E*)为击穿的累计概率;*E*为击穿强度的实验 值;α为累计击穿概率为63.2%时的特征击穿强度; β为形状系数。

对实验获取的击穿强度进行概率计算,其公式为

$$F(i,n_2) = \frac{i - 0.44}{n_2 + 0.25} \times 100\%$$
(3)

式中:*i*为试样的序号;*n*<sub>2</sub>为试样的样本总容量; *F*(*i*,*n*<sub>2</sub>)为 XLPE 老化试样击穿场强从小到大排列 后的计算结果。

### 1.2.3 体积电阻率测试

不同年限下退运电缆试样采用三电极电阻测试 系统,测试系统如图2所示,电极包括高压电极、环 形电极、背电极。其中绝缘层的体积电阻率为

$$\rho_{\rm v} = \frac{R_{\rm x} \cdot S}{L} \tag{4}$$

式中: $\rho_v$ 为绝缘层体积电阻率, $\Omega \cdot \text{cm}$ ; $R_x$ 为绝缘电阻测量值, $\Omega$ ;L为试样的平均厚度,cm;S为内电极圆柱有效面积,取S=21.24 cm<sup>2</sup>。



将不同老化时间下绝缘层的试样裁剪成圆形试 样,试样直径大小为10 cm。测试前将不同时间下的 老化试样置于60℃烘箱中2h,以除去试样中的水 分,并将测试仪预热60 min,有利于进行仪器校准。 每次实验结束后须经过30 s 放电时间,且为了降低 前一次测试时残余的电荷,测量时间间隔 10 min。 测试时,电压设为直流 1 000 V,实验温度设为 25 ℃。 1.2.4 宽频介电谱测试

当绝缘材料受到外加电场时,其材料内部的电荷就会进行一定程度的位移,从而导致绝缘介质的 表面产生束缚电荷,即出现极化的现象。绝缘材料 中的极化与电导的现象会产生一定的损耗,称为介 质损耗。

根据功率三角形可知,介质损耗为

$$P = Q \tan \delta \tag{5}$$

式中:*P*为被测试品的有功功率;*Q*为被测试品的无 功功率;δ为电介质内流过的电流相量和电压相量之 间的夹角的余角。

因此,可以采用介质损耗角正切值表示介质损耗。

将不同年限下退运电缆试样裁剪成圆形试样, 采用无水乙醇擦拭试样表面杂质与油污,放入60℃ 烘箱中2h,以除去试样中的水分。其次采用真空镀 膜机蒸镀一层金属薄膜保证老化试样与金属电极接 触良好。最后采用宽频介电谱仪测试不同年限下退 运电缆绝缘层试样的介电性能,频率为10<sup>-1</sup>~10<sup>6</sup>Hz。

#### 2 实验结果

### 2.1 红外光谱分析

不同年限退运电缆 XLPE 红外光谱如图 3 所示, 可知 2 914 cm<sup>-1</sup>、1 464 cm<sup>-1</sup>以及 718 cm<sup>-1</sup>为交联聚乙 烯特征峰。在退运电缆的 XLPE 一致出现了 5 个主特 征峰外,在 1 610 cm<sup>-1</sup>、1 730 cm<sup>-1</sup>和 3 100~3 500 cm<sup>-1</sup> 中出现了新的吸收峰,分别对应为 C=C 键、羰基 (C=O)和羟基(-OH)键的振动吸收峰。

随着老化的时间的增加,1735 cm<sup>-1</sup>附近的羰基 (-C=O)、3412 cm<sup>-1</sup>附近的羟基(-OH)、1096 cm<sup>-1</sup>附 近的醚基(C-O-C)峰强增大。这表明在老化的过程 中XLPE分子结构发生了变化,产生了新官能团。 运行20年电缆绝缘副产物的含量相较于新电缆试 样明显增加,其羰基和苯乙烯基的平均含量高于新 电缆试样,其中羰基含量明显增加,表明电缆在高温 运行下绝缘发生氧化反应产生大量羰基产物,从而 推测出异常电缆在运行过程中遇到过高温,使其中 残余的过氧化二异丙苯(dicumyl peroxide, DCP)继续 发生交联反应,产生大量交联副产物。



different aging times

### 2.2 介电性能分析

由于绝缘老化会影响介质的极化强度,老化后的绝缘性能在整个频域都有体现。采用 Novocontrol CONCEPT 80 宽频介电阻抗谱仪测试 XLPE 绝缘试 样不同频率下的相对介电常数和介质损耗。

#### 2.2.1 相对介电常数

相对介电常数是一个无量纲的参数,其物理意 义是电介质电容器储电能力的大小,是反映电介质 极化能力的宏观参数。不同年限退运电缆 XLPE 相 对介电常数如图 4 所示。



different aging times

由图4可知,新电缆相对介电常数为2.51;随着 年限增加,到第10年,相对介电常数为2.75,增加了 9.56%;第20年时,相对介电常数为2.93,增加了 16.73%。相对介电常数增大XLPE绝缘在运行过程 中电、热等应力和氧的长期影响下,断链和氧化形成 的极性杂质易在外加电场作用下发生极化现象,使 得其介电常数出现增大,在介观层面上对其介电特 性产生影响。介电常数的变化会直接影响电缆的电 气性能。例如,如果介电常数增大,可能会导致电缆 的电容值增加,进而影响信号的传输速度和质量。 此外,介电常数的变化还可能引起电缆内部电场分 布的不均匀,加速绝缘材料的老化过程,从而缩短电 缆的使用寿命。

2.2.2 介质损耗角正切值(tan δ)

不同年限退运电缆 XLPE 介质损耗角正切值如 图 5 所示,随退运电缆运行年限时间的增加,绝缘试 样在低频区的 tan δ 增大;在高、中频带时,各老化程 度试样的 tan δ 幅值重合性较好,而在低频段时是分 开的。因此提取工频 50 Hz 下介质损耗角正切值, 观察到退运电缆试样在 50 Hz 的频率下介质损耗 正切角测量曲线呈明显递增趋势,新电缆介质损 耗角正切值为 4.36×10<sup>-4</sup>;随着年限增加,到第 10 年, 介质损耗角正切值为 0.001 39,增加了 218.81%; 第 20 年时,介质损耗角正切值为 0.006 79,增加了 1 457.34%。介质损耗正切角的增大会导致电缆在 运行过程中产生更多的热量和能量损失。这不仅会



Fig.5 XLPE dielectric loss angle tangent of retired cables with different aging times

增加电缆的能耗和运行成本,还会加速绝缘材料的 老化和劣化过程。当介质损耗正切角增大到一定程 度时,电缆的绝缘性能将无法满足正常运行的要求, 从而导致电缆故障甚至报废。

#### 2.3 体积电阻率分析

不同使用年限退运电缆体积电阻率趋势图如图 6所示。由图 6 可知,随着使用年限增加,电阻率明 显下降,即绝缘性能明显降低。新电缆体积电阻率 为 4.99×10<sup>16</sup> Ω·cm;随着年限增加,到第 10 年,体积 电阻率为 6.09×10<sup>15</sup> Ω·cm,下降了 87.79%;接近一个 数量级,第 20 年时,体积电阻率为 6.78×10<sup>14</sup> Ω·cm, 下降了近两个数量级。





#### 2.4 退运电缆击穿性能

随着年限增加,电缆绝缘击穿性能呈现下降趋势。如图7所示,新电缆击穿性能为42.64 kV/mm;运行年限为10年退运电缆击穿场强下降至33.29 kV/mm,下降了21.93%;运行年限为20年退运电缆击穿场强下降至最小29.38 kV/mm,下降了31.09%。XLPE在老化的过程中由分子链断裂生成的羰基、醚基等具有极性的官能团作为杂质粒子会影响 XLPE 内部电场的分布,产生畸变电场,导致XLPE 发生击穿。





#### 3 温度场仿真分析

#### 3.1 电缆模型搭建

电缆发生老化后介质损耗与介电常数会对电缆 线芯温度产生一定的影响,通过将介质损耗和介电 常数有限元仿真计算,可以得到电缆绝缘热老化后 对电缆及附件的温度分布的影响<sup>[24]</sup>。

根据 110 kV 实际退运电缆构建二维截面仿真 模型如图 8 所示。主要结构包括电缆线芯、内半导 电屏蔽层、XLPE 绝缘层、外半导电屏蔽层、铅护套和 外护套。其中电缆线芯的标称截面积为 630 mm<sup>2</sup>,电 缆线芯直径为 30.1 mm,内、外半导电屏蔽层的标称 厚度为 1 mm, XLPE 绝缘的标称厚度为 16.5,铅护套 的厚度为 2.8 mm,外护套厚度为 4.5 mm。



## 3.2 温度场控制方程及材料参数

采用固体传热模块计算电缆二维截面模型的稳 态温度场分布,交流电缆接头的电场视为准静电场 电缆线芯与各层结构之间存在热量的传导,电缆外 护套表面与外部环境接触部分设置为自然热对流, 外部初始环境温度设置为25℃。传导电流和对地 相电压产生的内部热源会影响系统的温度场。其 中电缆的载流量设置为964 A,对地相电压设置为 65 kV。交流电缆温度场的热源主要来自电流传导 损耗和绝缘分质损耗产生的热耗率。电缆中的电流 传导损耗和绝缘损耗公式为<sup>[25]</sup>:

$$W_{\rm c} = I^2 R_{\rm c} \tag{6}$$

$$W_{\rm d} = \omega C_1 U_0^2 \tan \delta_1 \tag{7}$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon}{18\ln(\frac{D_i}{D})} \times 10^{-9}$$
(8)

式中: $W_e$ 为电缆线芯的热耗率;I为电缆的载流量,取 值 964 A; $R_e$ 为电缆线芯的电阻值; $W_d$ 为电缆 XLPE 绝缘的热耗率; $\omega$ 为交流电的角频率,其值为  $2\pi f$ ,其 中f为交流电的频率,取值 50 Hz; $C_1$ 为电缆绝缘单 位长度的电容值; $U_0$ 为对地相电压,取值 65 kV;tan  $\delta_1$ 为 XLPE 绝缘介质的介质损耗; $\varepsilon$  为 XLPE 绝缘介质 的介电常数,其中以不同运行时间电缆绝缘的介质 损耗和介电常数作为输入量来计算退运电缆温度场 分布; $D_i$ 为电缆绝缘层直径; $D_e$ 为包括内半导电屏蔽 层的电缆线芯直径。

电缆温度场仿真中,存在热源情况下的传热控 制方程为:

$$d_z \rho C_p \boldsymbol{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \boldsymbol{q} = d_z Q' + q_0 \tag{9}$$

$$\boldsymbol{q} = -\boldsymbol{a}_{z} \, \boldsymbol{k} \, \boldsymbol{\vee} \, \boldsymbol{I} \tag{10}$$

式中: $d_x$ 为电缆的长度,取值为1m; $\rho$ 为材料的密度;  $C_p$ 为材料的恒压热容;u为位移;T为系统温度;q为 传导热通量矢量;Q'为热源产生的热量; $q_0$ 为热流密 度;k为材料的导热系数。

根据传热学的边界条件,计算电缆内部温度分布 时,设置法向热流密度为0;只考虑表面的外部自然对 流的热通量和外部环境温度。因此,设置边界方程为

 $-(n \cdot \nabla T)k = h(T_{ext} - T)$  (11) 式中:n为空气传热沿外法线方向移动;h为空气的 自然对流换热系数;T<sub>ext</sub>为电缆外部的环境温度。

电缆内部材料的温度场计算参数如表1所示。

表1 110 kV XLPE 电缆材料参数

Table4 110 kV XLPE cable material parameters

++ *1	导热系数/	恒压热容/	密度/
们州	$(W/(m \cdot K))$	$(J/(kg \cdot K))$	$(kg/m^3)$
电缆线芯	398.00	386	4 860
半导电层	0.65	1 600	1 000
绝缘层	0.32	2 300	950
铅护套	35.30	128	2 700
外护套	0.29	1 900	920

#### 3.3 仿真结果分析

电缆 XLPE 绝缘的介电常数和介质损耗的变化 可有效反映绝缘老化状态。电缆绝缘老化后介电常 数和介质损耗的变化会影响电缆内部的温度分布, 而电缆的运行温度直接影响其运行状态,因此通过 分析电缆温度场分布可有效预测和避免温度过高的 情况发生。高压电缆正常运行时的温度场分布如图 9所示。由图9可知,正常运行的高压电缆稳定后的 温度场分布比较均匀,载流量为964 A 时,电缆内部 的最高温度位于电缆线芯处,达到54.04℃,绝缘层 内侧温度达到53.68℃,绝缘层外侧温度为45.75℃, 绝缘层温差为7.93℃,电缆内部的最低温度位于外 护套表面,温度为44.10℃。温度沿径向方向由内向 外逐渐降低,符合热传导规律。



Fig.9 Temperature distribution inside the new cable

测试运行 0 年、5 年、10 年、20 年电缆的介电常数和介质损耗作为输入参数,计算得到电缆运行前后电缆内部温度场变化曲线如图 10 所示。从图 10 中可以看出,随着电缆运行年限的增加使介电常数

与介质损耗增大,从而导致电缆内部的温度出现升高。电缆内部最高温度由运行0年的54.09℃升高 到运行20年的57.69℃,增长了6.66%;运行20年绝 缘内、外层温度分别为57.69℃和48.18℃,温差为 9.51℃,相较于运行0年的绝缘层温差增长了 19.92%。此外,不同运行年限电缆系统的最低温度 都位于外护套表面,运行10年及之前的电缆的外护 套表面温度无明显增长,而运行20年电缆外护套表 面温度升高到45.40,相较于运行0年的外护套表面 温度增长了2.95%。由仿真结果可知,高压电缆长 时间的运行会发生老化,导致绝缘损耗的增加,进而 引起电缆内部温度升高,进一步加速了电缆的老化。



and after cable operation

#### 4 结论

本研究首先选取 110 kV 新电缆的 XLPE 绝缘和 服役运行 10 年、20 年后退运的 110 kV 电缆的 XLPE 绝缘为实验对象,对比分析不同年限退运电缆在电气 性能和理化性能的差别,进而获得高压电缆 XLPE 绝 缘在服役过程中的性能变化规律,其次,对电缆的实际 运行的温度场状况进行有限元仿真。得到如下结论:

1)运行 20 年电缆绝缘副产物的含量相较于新 电缆试样明显增加,其羰基和苯乙烯基的平均含量 高于新电缆试样,表明电缆在高温运行下绝缘发生 氧化反应产生大量羰基产物,从而推测出异常电缆 在运行过程中遇到过高温,使其中残余的 DCP 继续 发生交联反应,产生大量交联副产物。

2)110 kV 高压电缆随着服役年限增加,XLPE 绝缘试样的工频击穿场强和体积电阻率明显降低,服役 20 年后分别降低了 31.09% 和近两个数量级,相对介电常数及介质损耗角正切值显著增大,服役 20 年后分别增大了 16.73% 和1 457.34%。

3)有限元仿真表明,稳态下电缆温度场分布均 匀,径向温度由内到外逐渐降低。随运行年限的增 加,绝缘介电参数升高,引起电缆内部温度的升高, 加快了电缆绝缘的老化。

#### 参考文献

- [1] 郑舒虹.中国可再生电力"供-输-需"协同度测算与优化研究 [D].武汉:中国地质大学,2022.
- [2] 刘振亚.全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5103-5110.
   LIU Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110.
- [3] 徐俊,王晓东,欧阳本红,等.热老化对交联聚乙烯电缆绝缘理 化结构的影响[J].绝缘材料,2013,46(2):33-37.
   XU Jun, WANG Xiaodong, OUYANG Benhong, et al. Effect of thermal aging on the physicochemical structure of XLPE cable insulation[J].Insulating Materials,2013,46(2):33-37.
- [4] 周远翔,赵健康,刘睿,等.高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J].高电压技术,2014,40(9):2593-2612.
   ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J].High Voltage Engineering,2014,40(9):2593-2612.
- [5] KIM J Y, PARK D H. Thermal analysis and statistical evaluation of EPR used in nuclear power plants [C] // 2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC).IEEE, 2015; 5–8.
- [6] 林木松,郭坤,张晟,等.电缆绝缘聚合物材料的老化成因机理及 其研究现状[J].高分子材料科学与工程,2017,33(12):149-155. LIN Musong, GUO Kun, ZHANG Sheng, et al. Aging mechanism and research progress of cable insulation materials [J]. Polymer Materials Science & Engineering,2017,33(12):149-155.
- [7] MORSALIN S, PHUNG T.Electrical field distribution on the crosslinked polyethylene insulation surface under partial discharge testing[J].Polymer Testing, 2020, 82:106311.
- [8] 吴晶晶,陈丽安,严有祥,等.±500 kV高压直流 XLPE 电缆温度 分布及其影响因素研究[J].高压电器,2023,59(2):113-119.
  WU Jingjing, CHEN Li'an, YAN Youxiang, et al. Study on temperature distribution of ±500 kV HVDC XLPE cable and its influencing factors [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59 (2):

113-119.

[9] 李盛涛,王诗航,杨柳青,等.高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键 性能与基础问题[J].中国电机工程学报,2022,42(11):4247-4255.

LI Shengtao, WANG Shihang, YANG Liuqing, et al. Important properties and fundamental issues of the crosslinked polyethylene insulating materials used in high-voltage cable [J].Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11):4247-4255.

- [10] 杜伯学,李忠磊,杨卓然,等.高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J].高电压技术,2017,43(2):344-354.
  DU Boxue, LI Zhonglei, YANG Zhuoran, et al. Application and research progress of HVDC XLPE cables [J]. High Voltage Engineering,2017,43(2):344-354.
- [11] 康佳,姜磊,高景晖,等.漂浮式风电平台动态海缆用绝缘材料 性能研究[J].高压电器,2022,58(1):12-17.
   KANG Jia, JIANG Lei, GAO Jinghui, et al. Study on properties of insulating materials for dynamic submarine cable of floating wind power platform[J].High Voltage Apparatus,2022,58(1):12-17.
- [12] 孙建宇,陈绍平,沙菁契,等.电缆用交联聚乙烯热老化寿命评 估和预测[J].电机与控制学报,2022,26(6):31-39.
  SUN Jianyu, CHEN Shaoping, SHA Jingjie, et al. Evaluation and prediction of thermal aging life of XLPE for cables [J]. Electric Machines and Control,2022,26(6):31-39.
- [13] 赵健康,赵鹏,陈铮铮,等.高压直流电缆绝缘材料研究进展评述[J].高电压技术,2017,43(11):3490-3503.
  ZHAO Jiankang,ZHAO Peng,CHEN Zhengzheng, et al.Review on progress of HVDC cables insulation materials [J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3490-3503.
- [14] LIU H J, WANG S H, LI S T, et al.Effect of thermo-oxidative aging on thermal elongation performance of XLPE insulation for highvoltage cables [J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 210: 110291.
- [15] MISHRA D, HAQUE N, BARAL A, et al. Assessment of interfacial charge accumulation in oil-paper interface in transformer insulation from polarization-depolarization current measurements
   [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(3):1665-1673.
- [16] MAENO Y, HIRAI N, OHKI Y, et al. Effects of crosslinking byproducts on space charge formation in crosslinked polyethylene [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005,12(1):90-97.
- [17] ZHANG Y Y, LI S T, GAO J, et al. Ageing assessment of XLPE cable insulation by residual antioxidant content [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27 (6):1795-1802.
- [18] 赵艾萱,刘健,徐龙,等.基于PDC法的在运XLPE电缆绝缘状态评估[J].高电压技术,2019,45(5):1542-1550.
   ZHAO Aixuan, LIU Jian, XU Long, et al. Insulation status evaluation of in-service cables based on polarization and

depolarization current[J].High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1542–1550.

- [19] 罗潘,任志刚,徐阳,等.退役高压交联聚乙烯电缆绝缘老化状态分析[J].电工技术学报,2013,28(10):41-46.
  LUO Pan, REN Zhigang, XU Yang, et al. Aging condition analysis of high voltage XLPE cables out of service [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(10):41-46.
- [20] NEDJAR M.Effect of thermal aging on the electrical properties of crosslinked polyethylene[J].Journal of Applied Polymer Science, 2009,111(4):1985-1990.
- [21] 温定筠,吕景顺,范迪铭,等.交联聚乙烯(XLPE)电缆交流耐压 试验时间参数探讨[J].电网与清洁能源,2010,26(8):15-17.
   WEN Dingjun, LV Jingshun, FAN Diming, et al. Discussions on time parameters for alternating voltage tests on XLPE cables [J].
   Power System and Clean Energy,2010,26(8):15-17.
- [22] 李欢,李建英,马永翔,等.不同温度热老化对XLPE电缆绝缘材 料晶体结构的影响研究[J].中国电机工程学报,2017,37(22): 6740-6748.

LI Huan, LI Jianying, MA Yongxiang, et al. Effects of thermal aging on the crystal structures of the XLPE cable insulating material at different temperatures [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22); 6740–6748.

- [23] 翟双.高压交联聚乙烯电缆绝缘加速老化特性研究[D].汉中: 陕西理工大学,2021.
- [24] 肖冬萍,包杨,杨帆,等.计及沉积物渗透性的捆绑式高压直流 海底电缆载流量评估模型[J].中国电机工程学报,2021,41 (14):5066-5076.

XIAO Dongping, BAO Yang, YANG Fan, et al. A model for estimating the ampacity of bundled HVDC submarine cables considering sediment permeability [J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(14):5066-5076.

[25] CHEN M X, FU Z X, LIU B X.Temperature field simulation of 10 kV three -core cable based on finite element method [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 563 (4):042053.

收稿日期:2024-05-15

修回日期:2024-10-12

作者简介:

段玉兵(1980),男,博士,高级工程师,研究方向为高压电缆状态 评价、电气设备安全防护等;

徐庆文(1996),硕士,工程师,研究方向为高压电缆状态评价;

罗 文(2000),男,硕士在读,主要研究方向为高压电缆老化特 性分析与绝缘状态评价;

兰 锐(1999),男,硕士研究生,主要研究方向为高压电缆附件 绝缘层及半导电屏蔽层老化性能;

李国倡(1985),通信作者(Lgc@qust.edu.cn),男,教授,博士生导师,研究方向为电力设备绝缘技术与绝缘材料,多场耦合下绝缘部件 电场仿真与结构优化。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.04.010

# 具身智能:变电站开关柜自主作业机器人

潘慧超1,王延安1,李 鑫1,贾昭鑫2\*,王海磊2

(1.国网山东省电力公司济南供电公司,山东 济南 250000;2.国网智能科技股份有限公司,山东 济南 250101)

**摘要:**近年来,随着智能机器人技术的发展,越来越多的领域开始引入机器人进行作业。在电力行业中,变电站开关柜带 电操作存在高风险、高技能要求。为保障人员安全并提升效率,研发自主作业机器人至关重要。文中针对开关柜操作需 求,设计并制作了开关柜自主作业机器人,提炼了"一个系统三个任务"的自主作业框架。在系统层面,实现了多种作业 工具自动高效更换。在任务层面,设计了开关柜自主作业目标多任务感知算法,将作业目标检测、作业姿态回归、作业施 力点确定三个任务融合在一个端到端深度学习网络里,实现了对按键、旋钮、手车的精准自主作业。试验结果表明,将软 件与硬件紧密结合的具身智能自主作业机器人稳定高效,能够满足变电站开关柜自主作业的需求。

关键词:具身智能;开关柜操作机器人;自主作业

中图分类号:TM63 文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)04-0089-08

# Embodied Intelligence: Autonomous Robot for Substation Switchgear Operations

PAN Huichao<sup>1</sup>, WANG Yanan<sup>1</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, JIA Zhaoxin<sup>2\*</sup>, WANG Hailei<sup>2</sup> (1.State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250000, China;

2. State Grid Intelligence Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: With the rapid advancement of intelligent robotics, an increasing number of industries have integrated robots to enhance operational processes. In the power industry, the live operation of substation switchgear remains a high-risk task, requiring significant skill and precision. To ensure operator safety and improve operational efficiency, the deplopyment of autonomous robots for substation switchgear tasks is of great significance. This work presents the design of an auxiliary switchgear operation robot aimed at addressing operational requirements such as switchgear closing. Based on hardware foundations, a multi-task perception algorithm for the autonomous operation of switchgear is further designed, integrating operation target detection, operation posture regression, and operation force point determination into an end-to-end deep learning network. This solution enables precise autonomous operation of buttons, knobs, and hand carts. Experimental results demonstrate that the synergy between software and hardware, supported by embodied intelligent autonomous operation robots, ensures stability and efficiency, meeting the autonomous operation demands of substation switchgear.

Keywords: embodied intelligence; switchgear operation robot; autonomous operation

## 0 引言

变电站开关柜作为保障电力系统安全稳定运行 的重要设备之一,其安全、高效的操作对于电力系统 的稳定运行至关重要。然而,传统的变电站开关柜 操作往往需要操作人员进行高风险、高技能要求的 带电操作,存在一定的安全隐患,并且操作效率较 低。随着具身智能技术的不断发展,将具身智能技 术应用于变电站开关柜自主作业机器人前景广阔, 不仅能够使机器人更加智能化,还能够使其在实际 作业场景中更加灵活、高效地应对复杂工况。

具身智能<sup>[1-3]</sup>,作为人工智能领域的一个重要研 究方向,强调了智能体与环境之间的互动和交互。兰 沣卜等<sup>[4]</sup>研究了基于具身智能的移动操作机器人系 统,探讨了其在实际操作中的关键技术和未来发展趋 势。文献[5-6]探讨了具身智能与形态计算在机械臂 中的应用,指出了其在协作和协调方面的潜力。文献 [7-10]设计了面向高压带电开关柜的视觉控制机械 臂作业系统,涵盖了视觉引导和作业执行两大模块。

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520601220014)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(520601220014).

文献[11-13]开展了双臂作业系统研究。文献[14-16]尝试解决作业目标检测任务,提出了一种基于机 器视觉的变电站高压开关柜设备检测与识别技术,为 开关柜设备的语义理解提出了解决方案。文献[17-21]聚焦作业姿态回归任务,利用外部设备或生成残差 卷积神经网络解决机械臂视觉作业姿态问题。文献 [22-24]力争提高作业施力点确定任务的精度,将演化 计算与深度强化学习相结合,研究机器人抓取操作。

本文聚焦于具身智能技术在变电站开关柜自主 作业机器人中的应用,针对开关柜作业需求,提炼出 "一个系统三个任务"的作业框架,设计研发了开关 柜自主作业机器人,基于硬件基础,进一步设计了开 关柜自主作业目标多任务感知算法,将作业目标检 测、作业姿态回归、作业施力点确定三个任务融合在 一个端到端深度学习网络里,实现了对按键、旋钮、 手车的精准自主作业。

## 1 开关柜自主作业机器人总体方案

#### 1.1 整体结构设计

自主作业机器人整体结构设计如图 1 所示。机器人本体主要包括四驱底盘、控制系统组件、快换工具、机械臂。四驱底盘长 738 mm、宽 500 mm、高 338 mm,垂直额定负载 100 kg,使用 48 V、24 Ah 锂 电池,电池仓为可快拆设计,底盘后侧面有电源接

口。机械臂自重 18 kg,末端持重 4 kg,机械臂末端 安装有快换接头主口,可实现与快换工具平台内作 业工具的快速切换。快换工具主要包括工具支架及 作业工具,作业工具种类可根据作业需求提前安置 在工具支架上,工具支架上安装有快换接头配接口, 快换接头为通用接头,每次工具排序不同也不影响 工具对接。整机结构主要由铝型材框架及各层控制 设备组成,主要有工控机、交换机、无线路由器、显示 器、电源模块,根据各层电气关系进行上下布置。



图 1 整体结构设计 Fig.1 Overall structural design



控制系统由机器人底盘、作业系统和工控机系统组成,如图2所示,各功能模块相对独立,便于调

图 2 控制系统设计 Fig.2 Control system design

试测试。机器人运动控制系统、定位导航系统、作 业控制系统及作业目标多任务感知系统均连接到 主工控机,由主工控机统一完成各功能模块的协调 控制。

#### 1.2 作业工具自动更换方案

作业工具自动更换方案设计通用快换装置及工 具支架,实现多功能作业工具的快速自动更换,三种 作业工具如图3所示,工具自动更换方法采用无额 外动力抓取作业方式,按照"触移提取"四步流程,由 机械臂末端轴旋转实现作业工具的抓取。工具存放 在工具支架上,每一种工具都分配一个编码。机械 臂端快换盘中间位置安装有机械臂端接线端子,工 具端快换盘中间位置安装有机械臂端接线端子,工 具端快换盘中间位置安装有工具端接线端子,可实 现8路电源、通信信号的传输,快速盘具备标准统一 的通用机械电气接口,实现作业工具的快速更换,同 时具备电源、通信的快速通断传输功能,如图4 所示。



图3 作业工具 Fig.3 Operational tools



#### 2 作业目标多任务感知算法

精准的自主作业需要准确的目标识别、高精度的 位姿感知、合理的作业施力点确定三个子任务的协调 组合,本文提出端到端的作业目标多任务感知算法, 将三个子任务融合到一个网络中,网络整体架构如图 5所示。通过任务整合,算法能够实现对作业目标的 全面感知,增强了对作业场景的理解,提高了图像处 理效率。此外,端到端的设计使得算法具有较高的实 时性,为实际部署提供了可靠的性能保障。

模型由主干网络、颈部网络和多任务头三部分 组成。主干部分使用轻量网络对输入图像进行处 理,生成 P3、P4、P5 和 P6 四个不同尺度的输出层。 颈部网络使用双向特征金字塔网络(bidirectional feature pyramid network,BiFPN),融合主干网络提取 的不同尺度的特征图,并作为多任务头的输入。最 后,多任务头一分为三:一个为作业目标检测头,实 现作业的目标检测与定位;一个为作业逐态回归头, 实现机械臂末端工具的姿态确定;一个为作业施力 关键点回归头,确定抓取和作业着力点。

### 2.1 主干网络

主干网络引入轻量化结构,提取图像特征信息, 如图6所示。网络首先进行恒等映射,生成部分通





道的特征图,然后通过线性运算,将特征图进行通道 拼接。网络连接结构中,两个轻量模块协同工作。 一个增加网络模型的通道数,提高特征提取能力;一 个减少模型通道数,确保模型输出通道数相匹配。



Fig.6 Lightweight net

### 2.2 颈部网络

特征金字塔网络能够有效进行特征融合,自上 而下的语义信息在融合后可以提高感知能力,如图 7 (a)所示。路径聚合网络在增加参数量和计算成本 的前提下,设计了一条自下而上的特征融合通路,对 低级特征与高级特征进行多尺度融合,较特征金字 塔网络有了明显提升,如图7(b)所示。

采用加权双向特征金字塔网络,对不同输入特 征进行融合时加入了权重信息,不同的权重能够使 网络模型更侧重于关键特征信息的学习,从而提升 网络的表征能力,如图7(c)所示。在简化网络层面, 模型对贡献度较低的节点进行删除。在特征融合层 面,模型增加一条跳跃特征融合路径,利用3个不同 尺度的特征图将低层次的位置信息和高层次的语义 信息更好地融合。加权特征融合计算方法为

$$o = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{w_i \times I_i}{\varepsilon + \sum_{j=0}^{\infty} w_j}$$
(1)

式中:o为加权融合特征输出; $w_i$ 为第i个参数可学 习权重; $I_i$ 为视觉特征; $\varepsilon$ 为权重系数; $w_j$ 为第i层融 合特征。

### 2.3 多任务头

多任务头处理来自颈部网络的特征图,为每个 任务进行预测。本文设计了三个不同的任务头:目 标检测头、作业姿态头和作业施力关键点头。

目标检测头负责预测输入图像中存在的目标类



别和对应的边界框,使用卷积层将高维特征转换为 类别预测和边界框,将两部分进行解耦,移除了目标 性分支。目标类别的预测表示为

 $\hat{c}_i = \arg\max_{a} P(c/f_i) \tag{2}$ 

式中: $\hat{c}_i$ 为第i个特征图像素位置预测的类别; $f_i$ 为第i个特征图像素位置的特征表示; $P(cf_i)$ 为给定特征表示下预测类别为c的概率。

边界框的预测表示为

$$(\hat{b}_i^x, \hat{b}_i^y, \hat{b}_i^w, \hat{b}_i^h) = \arg\max_k P(b|f_i)$$
(3)

式中: $\hat{b}_{i}^{x}$ 、 $\hat{b}_{i}^{y}$ 、 $\hat{b}_{i}^{b}$ 均为边界框中心第*i*个特征图像 素位置的预测坐标; $P(bf_{i})$ 为目标框的概率。

作业姿态头负责预测目标的姿态信息,由卷积 层和全连接层组成,从特征图回归姿态信息,输出相 对于机械臂基坐标系的旋转角度。

$$\hat{\theta}_i = \arg\max_{\theta} P(\theta / f_i) \tag{4}$$

式中: $\hat{\theta}_i$ 为第i个特征图预测的姿态; $P(\theta f_i)$ 为当前 姿态的概率。

作业施力关键点头负责检测目标上的关键点, 头部采用堆叠沙漏网络。

$$K_i = \arg\max_{k} P(K/f_i) \tag{5}$$

式中: $\hat{K}_i$ 为第i特征图的目标关键点集合;K为目标 关键点集合; $P(K/f_i)$ 为当前目标关键点集合的概率。

## 2.4 损失函数

采用端到端的训练方法,使用多任务损失函数,定 义为

$$l = \lambda l_1 + \alpha l_2 + \beta l_3 \tag{6}$$

式中:*l*<sub>1</sub>为目标检测任务损失函数;λ为目标损失函数权重系数;*l*<sub>2</sub>为目标姿态损失函数;α为姿态损失 函数权重系数;*l*<sub>3</sub>为目标施力关键点的损失函数;β 为关键点损失函数权重系数。

l<sub>1</sub>分为三个主要部分:分类损失、目标损失和边界 框损失。分类损失使用二元交叉熵损失来衡量预测概 率与实际标签之间的差异。目标损失采用数据平均保 真度损失函数,通过广义分布捕捉边界框的位置,使网 络能够迅速聚焦在靠近注释位置的区域,从而增加它 们的概率。边界框损失使用完全交并比损失,综合了 重叠、距离和纵横比一致性的特性,使模型能够更精确 地定位目标的形状、大小和方向。l<sub>2</sub>采用动态缩放交 叉损失函数,处理不平衡样本问题,确保模型不会过于 偏向占主导和容易学习的类别。l<sub>3</sub>采用平滑损失,误 差较小时使用平方损失,在误差较大时使用线性损失, 从而鲁棒应对异常值,合理地得到准确的关键点。

## 3 试验验证

开关柜自主作业机器人在导航系统指引下到达 开关柜附近,依靠视觉系统的识别和定位,可以准确 分辨作业任务类别、更换对应的末端工具,同时精准 完成相关操作。作业环境为室内环境,其各种条件 相对稳定,对开关柜功能组件定位误差来源于室内 导航不准确造成的拍摄位置和姿态的偏差。为此本 文设计功能性测试和精度测试两项试验内容,模拟 不同导航停靠位置下的开关柜自主作业能力和精 度。测试环境如图8所示。



图 8 测试环境 Fig.8 Test environment

## 3.1 功能性试验

针对按键、旋钮、手车三项作业任务,在±10 cm 的导航精度空间内设置不同的机械初始姿态,从不 同位置对开关柜上各功能组件进行智能作业,分析 其功能性。

按键作业试验中,作业目标多任务感知算法首 先对操作面板进行识别,以所识别的操作面板边界 为目标框信息,以面板平面为基准计算姿态信息,同 时回归每个按键的中心点为作业关键点,按键作业 轨迹与流程如图9所示。



Fig.9 Key task

旋钮作业试验中,作业目标多任务感知算法首 先对旋钮进行识别,已所识别的旋钮边界为目标框 信息,以旋钮轴为基准回归姿态信息,同时旋钮中心 和边界五个点为作业关键点,旋钮作业轨迹与流程 如图 10 所示。



图 10 旋钮作业 Fig.10 Knob task

手车作业试验中,作业目标多任务感知算法首 先对手车作业孔识别,以所识别的手车作业孔为目 标框信息,以手车作业孔所在的平面为基准回归姿 态信息,同时以回归作业孔中心为作业关键点,手车 作业轨迹与流程如图 11 所示。



图 11 手车作业 Fig.11 Handcart task

#### 3.2 精度试验

在精度试验中,手动示教完成每个任务,获取当 下任务的真值。对每个任务重复10次试验,依次记 录结果。

以按键操作任务为例,表1记录了试验过程中 位置和姿态的测量数据。表中每行数据包含三个位 置坐标(x,y,z)和三个姿态角度(R<sub>x</sub>,R<sub>y</sub>,R<sub>z</sub>),其中,x、 y、z分别为机械臂作业末端在三维空间中的坐标; R<sub>x</sub>、R<sub>y</sub>、R<sub>z</sub>分别为在该位置测得的旋转角度。试验过 程中,每次调整机械臂末端到任意位置,确保作业目 标在相机视野中,共计进行10组试验,记录10组数 据,编号1—10。表2分别给出了真值T和误差E。 真值T表示手动示教的位置和姿态,误差E反映了每

表1 按键精度试验-按键作业

Table 1 Button accuracy experiment-key operation

编号	x/mm	y/mm	z/mm	$R_x/(\circ)$	$R_y/(\circ)$	$R_{z}/(\circ)$
1	96.12	25.74	671.42	-90.64	-0.89	-0.45
2	96.35	25.42	671.44	-90.52	-0.78	-0.51
3	96.83	25.62	671.23	-90.74	-0.93	-0.52
4	96.45	25.98	671.18	-90.63	-0.81	-0.47
5	96.36	25.28	671.96	-90.23	-0.81	-0.48
6	96.28	25.49	671.94	-90.76	-0.79	-0.49
7	96.39	25.72	671.46	-90.74	-0.99	-0.51
8	96.53	25.43	671.53	-90.43	-0.89	-0.51
9	96.62	25.23	671.74	-90.13	-0.82	-0.52
10	95.98	25.75	671.23	-90.52	-0.91	-0.52

组数据与理想值之间的最大偏差。可以观察到,在 空间坐标的测量中,x的真值最大误差为0.83 mm; 在旋转角度的测量中,R,最大误差在1°以内。

表 2 精度试验统计结果 Table 2 Precision test statistical results

参数	<i>x</i> /mm	y/mm	<i>z</i> /mm	$R_x/(\circ)$	$R_y/(\circ)$	$R_z/(\circ)$
Т	96	26	672	-90	0	0
Ε	0.83	0.76	0.76	0.74	0.99	0.53

综上,作业目标多任务感知算法感知定位和姿态估计均具备较高的精度。变电站开关柜自主作业具身智能机器人能够满足现场作业的操作需求。

### 4 结束语

设计一款变电站开关柜自主作业具身智能机器 人,提出了开关柜自主作业目标多任务感知算法,将 作业目标检测、作业姿态回归、作业施力点确定三个 任务融合在一个端到端深度学习网络里,实现了对 按键、旋钮、手车的精准自主作业。所述算法在自研 变电站开关柜带电操作机器人上进行了实际验证, 证明了该具身智能作业机器人作业精度和稳定性完 全满足作业需求。

## 参考文献

- [1] 刘华平,郭迪,孙富春,等.基于形态的具身智能研究:历史回顾 与前沿进展[J].自动化学报,2023,49(6):1131-1154.
  LIU Huaping, GUO Di, SUN Fuchun, et al. Morphology-based embodied intelligence: historical retrospect and research progress
  [J].Acta Automatica Sinica,2023,49(6):1131-1154.
- [2] 沈甜雨,李志伟,范丽丽,等.具身智能驾驶:概念、方法、现状与展望[J].智能科学与技术学报,2024,6(1):17-32.
  SHEN Tianyu, LI Zhiwei, FAN Lili, et al. Embodied intelligent driving: concept, methods, the state of the art and beyond [J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2024, 6 (1):17-32.
- [3] 薛建儒,房建武,吴俊,等.多机协同智能发展战略研究[J].中 国工程科学,2024,26(1):101-116.
  XUE Jianru, FANG Jianwu, WU Jun, et al. Collaborative multiple autonomous systems [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 101-116.
- [4] 兰沣卜,赵文博,朱凯,等.基于具身智能的移动操作机器人系 统发展研究[J].中国工程科学,2024,26(1):139-148.

LAN Fengbo, ZHAO Wenbo, ZHU Kai, et al. Development of mobile manipulator robot system with embodied intelligence [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1):139-148.

- [5] LASCHI C. Modeling embodied intelligence: can we capture its essence by modeling internal and external interactions? [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2023, 1292 (1):012001.
- [6] HADI SADATI S M, ELDIWINY M, NURZAMAN S, et al. Embodied intelligence & morphological computation in soft robotics community: collaborations, coordination, and perspective
   [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022, 1261(1):012005.
- [7] 毛成林,于瑞强,边疆.面向高压带电开关柜的视觉控制机械臂 作业系统设计[J].机械设计与制造工程,2022,51(11):39-44.
   MAO Chenglin, YU Ruiqiang, BIAN Jiang. Design of visioncontrolled robotic arm operation system for high-voltage energized switchgear [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2022,51(11):39-44.
- [8] 过浩,王法顺,周刚.变电站开关柜带电操作机器人关键技术研究[J].电气开关,2022,60(6):84-87.
   GUO Hao, WANG Fashun, ZHOU Gang. Research on key technologies of live operating robot for substation switchgear [J].
   Electric Switchgear,2022,60(6):84-87.
- [9] 魏晋,郭石开,张立敏,等.基于机器人视觉定位技术的高压开 关柜远程操作策略分析[J].集成电路应用,2024,41(1): 220-221.

WEI Jin, GUO Shikai, ZHANG Limin, et al. Analysis of remote operation strategy for high-voltage switchgear based on robot vision positioning technology [J]. Application of IC, 2024, 41(1): 220-221.

- [10] 牛景光,李国成,冯忠奎,等.一种配电网高低压开关操作机器 人的研制及应用[J].机电信息,2020(32):33-35.
   NIU Jingguang, LI Guocheng, FENG Zhongkui, et al. Development and application of a robot for high and low voltage switch operation in distribution network[J].Mechanical and Electrical Information, 2020(32):33-35.
- [11] 罗佳,李伯方,黎立,等.配电开关柜辅助作业机器人应用研究
  [J].电气自动化,2019,41(2):113-115.
  LUO Jia, LI Bofang, LI Li, et al. Application study of auxiliary operation robots in distribution switchgears [J]. Electrical Automation,2019,41(2):113-115.
- [12] SEKKAT H, TIGANI S, SAADANE R, et al. Vision-based robotic arm control algorithm using deep reinforcement learning for autonomous objects grasping[J].Applied Sciences, 2021, 11(17): 7917.
- [13] 王康,刘亮,李慧杰,等.高压带电作业双臂机器人系统设计[J].
   计算机测量与控制,2023,31(5):243-248.
   WANG Kang,LIU Liang,LI Huijie, et al.Design of dual-arm robot

system for high voltage power live working [J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31(5):243-248.

[14] 崔昊杨,杨可欣,葛海华,等.面向电力开关柜的轻量型GB-YOLOv5m状态检测方法[J].电子与信息学报,2022,44(11): 3777-3787.

CUI Haoyang, YANG Kexin, GE Haihua, et al. Lightweight GB-YOLOv5m state detection method for power switchgear[J].Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(11): 3777-3787.

- [15] 姜鸿飞.基于机器视觉的变电站高压开关柜设备检测与识别研 究[D].成都:四川大学,2021.
- [16] 杨可欣.基于图像特征的轻量型电力开关柜灯表检测与识别系统研究[D].上海:上海电力大学,2023.
- [17] 石世锋,叶南,吴哲,等.具有远近视距引导的机械臂多工位精确对准技术[J].南京航空航天大学学报,2022,54(3):419-427.
  SHI Shifeng, YE Nan, WU Zhe, et al. A multi-station precise alignment technique of robotic arms guided by far-near-sight vision system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(3):419-427.
- [18] 宋薇,仇楠楠,沈林勇,等.面向工业零件的机器人单目立体匹 配与抓取[J].机器人,2018,40(6):950-957.
  SONG Wei, QIU Nannan, SHEN Linyong, et al. The monocular stereo matching and grasping of robot for industrial parts [J]. Robot,2018,40(6):950-957.
- [19] KUMRA S, JOSHI S, SAHIN F. Antipodal robotic grasping using generative residual convolutional neural network [C]//2020 IEEE/ RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).IEEE, 2020;9626–9633.
- [20] 傅华强,房芳.工业机器人视觉定位技术研究与应用[J].工业 控制计算机,2016,29(3):1-3.

FU Huaqiang, FANG Fang. Research and application of vision positioning technology of industrial robot [J]. Industrial Control Computer, 2016, 29(3):1-3.

- [21] 王天宇,董文博,王震宇.基于单目视觉和固定靶标的位姿测量系统[J].红外与激光工程,2017,46(4):0427003.
  WANG Tianyu, DONG Wenbo, WANG Zhenyu. Position and orientation measurement system based on monocular vision and fixed target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46 (4): 0427003.
- [22] JEONG J H, SHIM K H, KIM D J, et al. Brain-controlled robotic arm system based on multi-directional CNN-BiLSTM network using EEG signals [J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2020, 28(5):1226-1238.
- [23] SHUKLA P, KUMAR H, NANDI G C. Robotic grasp manipulation using evolutionary computing and deep reinforcement learning[J]. Intelligent Service Robotics, 2021, 14(1):61-77.
- [24] 张静,黄国方,刘晓铭,等.配网带电作业机器人精准作业定位 方法[J].电网技术,2022,46(2):812-819.
   ZHANG Jing, HUANG Guofang, LIU Xiaoming, et al. Precise positioning for live working on distribution line[J]. Power System Technology,2022,46(2):812-819.

收稿日期:2024-05-20

修回日期:2024-10-09

作者简介:

潘慧超(1978),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为变电设备 检修;

王延安(1976),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为变电设备检修;

李 鑫(1988),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为变电设备 检修;

贾昭鑫(1990),通讯作者(jia6120@163.com),男,硕士,工程师, 主要研究方向为变电设备检修;

王海磊(1989),男,工程师,主要研究方向为变电设备检修。

(责任编辑 车永强)



全球"双碳"目标的推进与可再生能源技术的迅猛发展,推动了电动汽车的广泛应用。与此同时,人工智 能技术的突破性进展为电动汽车、充电基础设施与电网的协同优化开辟了全新路径。电动汽车充电基础设施是 配电网与路网的重要组成部分。对电网而言,充电桩的规划与运行必须考虑大规模电动汽车充电负荷带来的安全、 可靠性和经济性挑战。同时,充电桩的建设和运营也受到电网容量和运行可靠性的制约。对路网而言,电动汽 车的出行行为以及充电桩的选址与容量规划显著改变了电动汽车在路网上的时空分布,进而影响充电基础设施 的规划与运营。在此背景下,利用人工智能技术对车桩网协同交互策略进行深入研究,实施充电桩的合理选址 与容量规划,并确保大规模电动汽车接入下电网的安全稳定运行,对于推动新能源汽车技术的发展以及提升电 网的安全性、稳定性和经济性具有重要意义。同时,如何制定合适的调度策略使得车主 - 运营商 - 电网三方利 益最大化,电网运营压力最小也是亟待解决的重要问题。

为展示车桩网一体协同规划关键技术的最新研究进展和发展趋势,解决技术研究和应用中的难题和热点问题,推动技术创新和交流,**诚邀请昆明理工大学教授杨博、英国利物浦大学教授蒋林、东北大学副教** 授张孝顺和新西兰奥克兰理工大学讲师周率担任特约主编,拟针对"基于人工智能的车桩网协同最优规 划调度关键技术"开设专栏,欢迎国内外相关领域的专家学者踊跃投稿!

一、征稿方向(包括但不限于)

- 1、基于人工智能的电动汽车充电负荷预测技术;
- 2、基于人工智能的车桩网耦合的规划与调度技术;
- 3、基于人工智能的充电基础设施选址与容量规划技术;
- 4、基于人工智能的车桩网一体化系统调度技术;
- 5、基于人工智能的车桩网深度耦合的电网协同规划与运行技术;
- 6、含大规模电动汽车与充电基础设施的电网安全稳定运行技术;
- 7、考虑电动汽车运行的综合能源系统规划与调度技术;
- 8、基于人工智能车桩网协同互动 (V2G) 策略优化;
- 9、基于人工智能的电动汽车 充电桩 电网系统故障诊断与预测性技术;

10、基于人工智能的车桩网协同互动 (V2G) 参与多元市场调度策略优化。

二、投稿要求

1、请从山东电力技术网站投稿,请在题名后标注"基于人工智能的车桩网协同最优规划调度关键技术", 网址: http://sddljs.cbpt.cnki.net

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

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

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



关注《山东电力技术》