四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

第47卷第1期
2024年2月

四川省电机工程学会　　四川电力科学研究院

ISSN 1003-6954

《四川电力技术》公众号　《四川电力技术》官网

- 四川省一级期刊
- 万方数字化期刊群入网期刊
- 中国学术期刊（光盘版）入编期刊
- 中国期刊全文数据库收录期刊
- 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊
- 重庆维普中文科技期刊数据库收录期刊
- 超星数字图书馆入网期刊
- 中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊

“宽频带阻抗测量技术与应用”专栏征稿启事

随着新型电力系统加快建设发展，新能源发电在电力系统中的比例越来越高。电力电子变流器因其主动可控性强、动态响应快、能量转换效率高等优点，已成为新能源发电系统、储能系统等的核心变流装备。未来，随着新型电力系统的快速发展，多类型变流器设备的渗透率、接入形式和功率等级将进一步加强且更为复杂，形成多类型电力电子化电力系统已是必然趋势，保障电力电子化电力系统安全可靠、稳定高效运行面临重大挑战。

当电力电子化电力系统出现宽频带阻抗失配时，将导致一系列覆盖低频、中频、高频范围的振荡和不稳定问题，严重影响了电力系统的安全稳定运行。宽频带阻抗测量技术是分析、解决此类问题的关键途径之一。目前虽然对宽频带阻抗测量有较为广泛的理论研究，但是还存在着诸如测量速度慢、准确度不高、扰动模式不统一等问题，并且实际测量现场环境多变也制约着宽频带阻抗测量技术的现场应用，需要进一步深入开展理论研究，加大应用技术攻关。

为了促进宽频带阻抗测量技术的发展与应用，集中呈现和交流研究成果，《四川电力技术》特邀西南交通大学胡海涛教授、国网四川省电力公司电力科学研究院李小鹏高级工程师作为特约主编，主持“宽频带阻抗测量技术与应用”专栏，希望与作者和广大读者一起探讨宽频带阻抗测量领域存在的关键技术和应用问题。诚邀从事相关研究的专家学者和科研人员积极投稿。

1 征稿方向（包括但不限于）

（1）电力电子装备宽频带阻抗测量技术
（2）电力网络宽频带阻抗测量技术
（3）电力电子化电力系统阻抗建模
（4）电力电子化电力系统稳定性分析
（5）宽频带阻抗测量技术及扩展应用

2 截止时间

2024年3月10日截稿，并在《四川电力技术》择期刊出。

4 投稿方式

请登录《四川电力技术》投稿网站：https://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home，注册作者用户名和密码进行投稿，投稿栏目请选择“宽频带阻抗测量技术与应用”专题。

3 投稿要求

（1）论文应具有原创性，未公开发表，未一稿多投，不涉及署名争议，不涉及侵犯他人知识产权和泄露国家机密的内容，作者对论文内容的真实性和客观性负责。

（2）摘要250~300字为宜，须包含四要素，即目的、方法、结果、结论，同时应着重说明文章的创新点。

（3）论文引言中研究目的清晰明确，详细介绍国内外研究背景，对现有其他研究者的工作进行客观的评述；阐述自己的观点，并对自己的研究思路做一总体介绍。论文研究设计和方法叙述清楚，数据合理并被正确地分析和解释；比较所提出的方法和现有方法的优缺点。

（4）正文部分要求层次清晰、重点突出、论述严谨、文字简练，避免长篇公式推导，字数以不超过6000字(包括图表)为宜。

5 投稿联系人

李老师：18116560616
程老师：028-69995169
罗老师：028-69995168

四川电力技术
SICHUAN DIANLI JISHU

四川省一级期刊、万方数据数字化期刊群入网期刊、《中国学术期刊(光盘版)》《中国期刊全文数据库》收录期刊、首届《CAJ-CD 规范》执行优秀奖获奖期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、《超星数字图书馆》入网期刊、《中国核心期刊(遴选)数据库》入选期刊

第 1 期

2024 年 2 月 20 日

《四川电力技术》编辑委员会

主任委员　胡海舰
副主任委员　刘俊勇
委　　员(按姓氏笔画笔形为序)
马芳平　王　卓　王渝红
司马文霞　年　珩　朱　康
何正友　余　熙　吴广宁
张安安　李　旻　李富祥
李镇义　杨迎春　汪康康
肖　欣　肖先勇　苏少春
邹见效　陈　峰　胡朝华
唐万斌　梅生伟　黄　琦
董秀成　蒋兴良　韩晓言
廖学静
秘　　书　李世平
程文婷

四川电力技术

双月刊　1978 年创刊
中国标准连续出版物号:
ISSN 1003-6954
CN 51-1315/TM
2024 年第 47 卷第 1 期(总 289 期)
主管单位:四川省电力公司
主办单位:四川省电机工程学会
四川电力科学研究院
发行范围:公开
主　　编:李富祥
副 主 编:程文婷
编辑出版:《四川电力技术》编辑部
发　　行:四川电力科学研究院
地　　址:成都市高新区锦晖西二街 16 号
邮政编码:610041
电话:(028)69995169/5168/5165
邮箱:cdscdljs@163.com
设　　计:四川科锐得实业集团有限公司
文化传播分公司
印　　刷:四川和乐印务有限责任公司
国内定价:每册 12.00 元
[期刊基本参数]CN 51-1315/TM * 1978 * b * A4 * 112 * zh * P * ¥12.00 * 3000 * 16 * 2024-02

目　　次

·电网灾害防控·

强风作用下带横隔面输电塔动力响应及破坏机理研究…… 李钰睿,谢　强,李　悦(1)
耐张塔输电线路等值覆冰厚度的简化预测方法
…… 吴天宝,马小敏,刘益岑,刘小江,庄　杰(10)
基于关联规则和证据理论的输电线路水土流失地质灾害风险评估
…… 白剑锋,高　峰,吴　振(15)

·新型电力系统·

考虑预测不确定性的微电网实时控制策略研究
…… 李龙胜,冯文韬,潘可佳,郑言蹊,邓冰妍,景致远(22)
大规模可调节资源多级聚合参与互动响应数据需求及潜力分析方法
…… 肖钰皓,李　科,苏　军,霍耀冉,孙裕策,张曦元(28)
“双碳”目标下新型电力系统 PEST-SWOT 分析
…… 栗奕博,代清钊,杨富麟,孙　冬,张晓春,曾　博(35)
新型电力系统下储能技术的应用场景及商业模式研究
…… 黄艾熹,王俐英,曾　鸣,祝金荣(43)

·高电压技术·

大长度高压直流电缆中电荷的产生、测量及释放研究综述
…… 王洁铭,刘巧珏,崔智桐,蔡致坤,胡武生(50)
基于 BP 神经网络和 SSA-SVM 的接地网腐蚀速率组合预测
…… 张　衡,刘　闯,刘　炬,严文帅,刘云飞,陈海旭(59)

·电力设计与优化

输电线路规划方法和寿命周期成本综述
…… 杨　丹,倪　江,杨迎昕,焦一飞,齐韵英,许　潇,刘俊勇(65)
一种基于 QFD/TRIZ 的高压铁塔微桩成型装备设计
…… 谢　伟,范荣全,周睿晗,郑晓波,郭　鑫(72)
某背靠背换流站柔性直流换流变压器出线布置方案比较与选择
…… 殷　勤,李沛准(78)

·电力运检技术·

输电杆塔塔型智能识别与台账的智能提取研究
…… 黄宇航,杜永永,熊　杰,张博洲,李倩竹,刘　锐(84)
基于轻量 AlexNet 的电容型电压互感器故障诊断
…… 漆梓渊,吴　浩,陈伟哲,罗春兰,吴　杰(91)
基于无线同步通信的变电站漏电流检测系统研究
…… 刘　鑫,袁明哲,黄　寅,令狐静波,邹经鑫,刘豫航(98)
基于双联合定位法的 500 kV 变压器内部放电诊断分析
…… 郭加媛,李承振,赵廷志,张明兴(105)

封面图片由谢峰提供

本期责任编辑　罗　锦　**编辑**　程文婷　洪　洁　罗　锦

CONTENTS

· Power Grid Disaster Prevention and Control ·

Research on Dynamic Response and Failure Mechanism of Transmission Tower with Diaphragm under Strong Wind … LI Yurui, XIE Qiang, LI Yue(1)

Simplified Prediction Method of Equivalent Ice Thickness for Tension Tower of Transmission Line …… WU Tianbao, MA Xiaomin, LIU Yicen, LIU Xiaojiang, ZHUANG Jie(10)

Geological Hazard Risk Assessment of Soil and Water Loss for Transmission Lines Based on Association Rules and Evidence Theory …… BAI Jianfeng, GAO Feng, WU Zhen(15)

· New Power System ·

Real-time Control Strategy for Microgrid with Prediction Uncertainty …… LI Longsheng, FENG Wentao, PAN Kejia, ZHENG Yanxi, DENG Bingyan, JING Zhiyuan(22)

Interactive Response Data Demand and Potential Analysis Method for Multilevel Aggregation of Large-scale Adjustable Resources …… XIAO Yuhao, LI Ke, SU Jun, HUO Yaoran, SUN Yuce, ZHANG Xiyuan(28)

PEST-SWOT Analysis of New Power System under "Dual Carbon" Goal …… LI Yibo, DAI Qingzhao, YANG Fulin, SUN Dong, ZHANG Xiaochun, ZENG Bo(35)

Research on Application Scenarios and Business Models of Energy Storage in New Power Sys-tems …… HUANG Aixi, WANG Liying, ZENG Ming, ZHU Jinrong(43)

· High Voltage Technology ·

Review on Charge Generation, Measurement and Dissipation in Large-length HVDC Cable …… WANG Jieming, LIU Qiaojue, CUI Zhitong, CAI Zhikun, HU Wusheng(50)

Combination Forecasting for Corrosion Rate of Grounding Grid Based on BP Neural Network and SSA-SVM …… ZHANG Heng, LIU Chuang, LIU Ju, YAN Wenshuai, LIU Yunfei, CHEN Haixu(59)

· Electric Power Design and Optimization ·

Overview of Economic Planning Methods and Life Cycle Cost for Transmission Lines …… YANG Dan, NI Jiang, YANG Yingxin, JIAO Yifei, QI Yunying, XU Xiao, LIU Junyong(65)

Design of Micro-pile Forming Equipment for HV Steel Tower Based on QFD and TRIZ …… XIE Wei, FAN Rongquan, ZHOU Ruihan, ZHENG Xiaobo, GUO Xin(72)

Comparison and Selection of Layout Scheme for Flexible HVDC Transformer in A Back-to-back Converter Station …… YIN Qin, LI Peizhun(78)

· Operation and Maintenance Technology ·

Research on Intelligent Recognition of Transmission Tower Types and Intelligent Extraction of Its Account Information …… HUANG Yuhang, DU Yongyong, XIONG Jie, ZHANG Bozhou, LI Qianzhu, LIU Rui(84)

Lightweight AlexNet-based Fault Diagnosis for Capacitor Voltage Transformers …… QI Ziyuan, WU Hao, CHEN Weizhe, LUO Chunlan, WU Jie(91)

Research on Substation Leakage Current Detection System Based on Wireless Synchronous Communication …… LIU Xin, YUAN Mingzhe, HUANG Yin, LINGHU Jingbo, ZOU Jingxin, LIU Yuhang(98)

Diagnosis and Analysis of Internal Discharge in 500 kV Transformer Based on Joint Positioning Method …… GUO Jiayuan, LI Chengzhen, ZHAO Tingzhi, ZHANG Mingxing(105)

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY
2024 Vol.47 No.1
(Ser.No.289)
Bimonthly, Started in 1978
Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, High-tech Zone, Chengdu, Sichuan, China
Postcode: 610041

Sponsor:
Sichuan Society of Electrical Engineering
Sichuan Electric Power Research Institute
Editor in chief: LI Fuxiang
Editor & Publisher:
Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

强风作用下带横隔面输电塔动力响应及破坏机理研究

李钰睿,谢　强,李　悦
(同济大学土木工程学院,上海　200092)

摘　要:增设横隔面是对输电塔结构进行抗风加固的一种简单有效方式,但增设横隔面后输电塔的动力稳定性变化和破坏机理差异尚未明晰。以某 220 kV 同塔双回线路 ZY2 输电塔为研究对象,通过建立输电塔线耦联体系有限元模型,对比了增设横隔面前后的单塔及塔线体系的模态差异,验证了在靠近塔腿节间的交叉斜材处增设横隔面对于输电塔局部振型的抑制作用。采用随机风场模拟,计算不同风速下不同塔段处斜材增设横隔面前后轴力响应变化,结合动力不稳定区域理论计算斜材动力稳定性参数,将其与动力不稳定区域绘制在同一参数平面内并根据某一风速下斜材是否进入动力不稳定区域,来判断不同塔段处斜材增设横隔面前后的失稳风速。结果表明,合理增设横隔面最高可将杆塔破坏风速提高 3 m/s。

关键词:横隔面; 塔线耦联体系; 动力不稳定区域; 失稳风速
中图分类号:TM 752　**文献标志码**:A　**文章编号**:1003-6954(2024)01-0001-09
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240101

Research on Dynamic Response and Failure Mechanism of Transmission Tower with Diaphragm under Strong Wind

LI Yurui, XIE Qiang, LI Yue
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Adding diaphragm is a simple and effective way to strengthen transmission tower structure. However, the change of dynamic stability and the difference of failure mechanism of transmission tower after adding diaphragms are still not clear. Taking the ZY2 transmission tower in a 220 kV common tower double circuit transmission line for example, the finite element model of tower-line coupling system is established to compare the modal differences between tower and tower-line system before and after adding diaphragms. The results show that adding diaphragms at the intersection diagonal near tower leg joints could suppress the local vibration mode of transmission tower. Then, random dynamic wind field is applied to calculate the axial stress response before and after adding diaphragms at different tower sections under different wind speeds. So that the dynamic stability parameters of diagonal braces are calculated based on the theory of dynamic unstable region, which are drawn in the same parameter plane with the dynamic unstable region. According to whether the diagonal brace parameters enter the dynamic unstable region at a certain wind speed, the wind speeds at instability before and after adding diaphragms at different tower sections can be determined, which shows that adding a diaphragm can increase the wind speeds at instability by up to 3 m/s.

Key words: diaphragm; transmission tower-line system; dynamic unstable region; wind speed at instability

0　引　言

输电杆塔作为架空线路的支撑点,是电力系统中的纽带环节。但输电塔属于高耸建筑物,对倾斜变形十分敏感。据统计资料显示,输电塔在风作用下经常发生动态侧倾失稳破坏[1],风致输电塔倒塔事故层出不穷。1961 年,卡拉(Carla)飓风给美国的输电线路造成了极大破坏,导致休斯顿的电力公司

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278523)

损失超过 150 万美元[2]。1991 年在日本登陆的 19 号台风,对高压输电塔和其他电力设施造成重大破坏。2002 年,21 号台风造成了日本茨城县 10 基高压输电塔连续倒塔的严重事故[3]。2009 年 7 月 24 日,河北省南部电网的重要主干通道 500 kV 辛彭线路,在邢台市南和县境内由于特大暴风雨发生倒塔事故,一次性串倒 8 基铁塔[4]。2015 年 10 月 4 日,强台风“彩虹”重创湛江电网,多基铁塔倒塌[5]。2018 年 7 月 11 日台风玛莉亚登陆福建,造成 1 基输电塔倒塌并引发电力中断[6]。由此可见,输电线路防御重大自然灾害,特别是风灾的形势依然非常严峻。

国内外学者对于输电塔风致响应的研究已经取得了一定成果。在国外,早在 1997 年,文献[7]就对山区的输电塔在风的作用下引起的振动特征以及风本身的特征进行了研究,结果表明具有导体的塔的振动特性会受到导体行为的强烈影响。到了 21 世纪,国内的众多学者也通过有限元建模、风洞试验等多种方式针对输电塔风致破坏问题开展了多项研究。2006 年,文献[8]通过对华东电网 500 kV 任上 5237 线飑线风塌事故进行调查与分析,得出输电塔抗风设计规范中横隔面数量不足的结论,且导线与输电塔之间的风电耦合效应不容忽视。2008 年,文献[9]在前人研究的基础上通过数学建模建立了三塔两线、五塔四线输电塔线路耦合体系的空间模型,利用达文波特频谱对目标站点进行了风场模拟,最终得出由于耦联作用的影响导致塔线系统的总响应幅度远大于单塔的响应幅度的结论。2013 年,文献[10]在同济大学 TJ-3 风洞试验室进行了输电塔-八分裂导线五塔四线耦联体系完全气弹模型风洞试验,研究结果表明:塔线体系风致振动呈现强非线性耦合作用,导线及绝缘子的振动对输电塔具有重要影响。2015 年,文献[11]在同济大学 TJ-3 风洞试验室建立了一塔两线的全气动弹性模型模拟输电塔线系统,通过边界层风洞试验研究了有线和无线塔的气动弹性模型在不同风速下的位移和加速度。该试验再次验证了输电塔线耦合效应对输电塔风致振动的影响。

横隔面是设置于塔身中部的自身几何不变且具有较大面内刚度的水平隔面,其作用在于保持结构整体稳定以及传递和分配剪力、扭矩。作为辅助受力构件,其合理布置在输电塔结构整体稳定中发挥着重要的作用。2002 年国际大电网会议(CIGRE)[12]发布了一个关于输电塔结构中横隔面设置要求的报告,详细地讨论了有关横隔面的设计以及横隔面在输电塔结构中发挥的作用,各国规范及企业和行业规范中关于横隔面设计的规定,以及工程实际中横隔面及其附近部位发生的灾害情况,并且提出了一些对于横隔面设置的建议。文献[13-15]通过有限元或试验分析发现,合理增设横隔面可以抑制交叉斜材局部振型、面外变形和对输电塔整体受力的不利影响,增设横隔面是对输电塔结构进行加固的一种简单有效的方法。但横隔面在动力风场下对于输电塔的加固机理尚未明晰。

因此,下面从塔线耦联体系有限元模型动力响应角度分析,探讨附加横隔面对输电塔抗风性能的影响,并基于动力不稳定区域理论[16-17],探究输电塔破坏机理,得到增设横隔面对杆件破坏的影响。

1 ZY2 输电塔有限元建模与模态分析

1.1 单塔有限元建模

研究对象选用某 220 kV 同塔双回输电线路型号为 ZY2 的输电塔,其结构如图 1 所示。输电塔总高 45.5 m,呼高 30 m,塔腿跟开 6.4 m,单塔一共分为 7 个塔段。塔体主材主要为 Q345 角钢,交叉斜材和辅助材主要采用 Q235 角钢。导线型号为 LGJX-300/40,地线型号为 OPGW-24B1。该输电塔前档距 259 m,后档距 356 m。

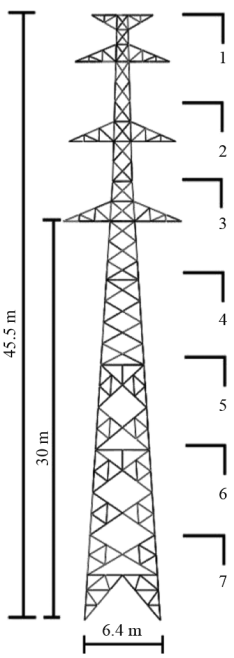


图 1 ZY2 输电塔结构

在 Abaqus 中采用 L 型截面梁单元模拟输电塔角钢构件,该单元可高效模拟杆件的弯曲、扭转和轴向力[18]。单元材料参数采用理想弹塑性模型。塔脚处边界条件设置为固接,由此建立输电塔单塔有限元模型。

1.2　塔线耦联体系有限元建模

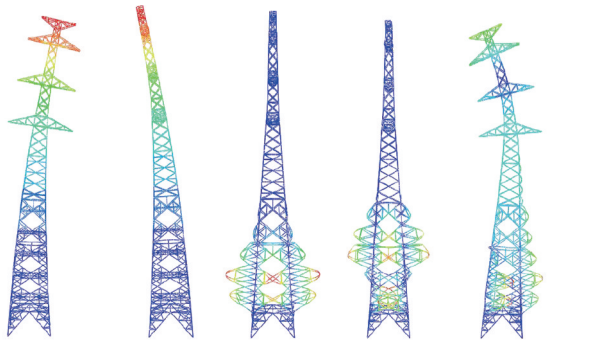
在 Abaqus 软件中建立“一塔两线”耦联体系有限元模型,输电塔模型与单塔完全相同。

输电线作为一种典型的悬索结构,在荷载作用下具有位移大、应变小的几何非线性特点。线路信息中提供的导、地线弧垂是导、地线在自重作用下已产生较大位移后的结果。因此,在建立输电线模型之前需要先计算导、地线的初始弧垂[19]。根据导、地线的初始弧垂和两个端点的位置确定其初始构型,即找形;进而确定每一个索单元的初始节点坐标,以便于建立导、地线的有限元模型。悬索计算主要有两种方法:悬链线理论和抛物线理论[20]。一般认为悬链线理论是悬索计算的精确理论方法;而抛物线理论是悬索计算的近似理论方法,当索的垂跨比小于 1/8 时,可以得到较为精确的结果。根据 ZY2 所在线路实际情况,在建模时采用抛物线理论来确定输电线的初始构型。计算可得,前、后导线初始弧垂分别为 3.83 m、4.41 m,前、后地线初始弧垂分别为 2.84 m、5.78 m。在 Abaqus 软件中建模时,在顺线路方向上每隔 1 m 用 T3D2 桁架单元来模拟输电线,此类单元不能受弯,只能承受轴向荷载。单元之间用铰接方式连接。边缘处边界条件设置为铰接。

绝缘子是一种可以把导线和输电塔连接起来的悬挂构件,通常由玻璃或陶瓷制成,起绝缘作用。绝缘子刚度很大,两端均为铰接,可以近似认为绝缘子只承受轴力作用,故同样用 T3D2 单元模拟。每个绝缘子为一个单元,下端与导线连接,上端用 MPC-Pin 与输电塔相连,由此建立塔线耦联体系有限元模型。

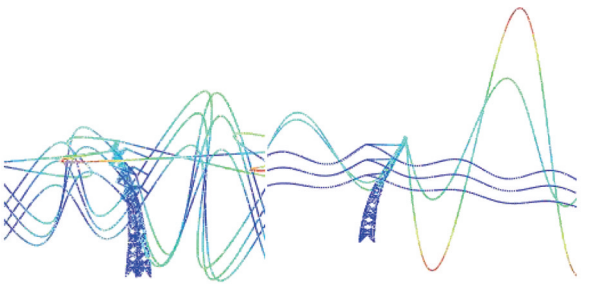
1.3　ZY2 原塔模态分析

在 Abaqus 软件中对 ZY2 单塔和塔线耦联模型进行自振模态分析,从单塔模型提取前 20 阶模态,塔线耦联体系模型提取前 1000 阶模态进行计算。单塔模型前 5 阶振型与塔线耦联体系关于输电塔的前 5 阶振型分别如图 2、图 3 所示,频率如表 1、表 2 所示。

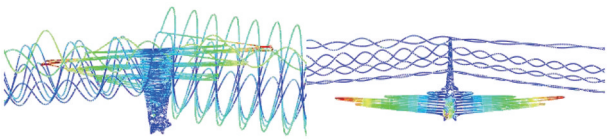


（a）1阶振型　（b）2阶振型　（c）3阶振型　（d）4阶振型　（e）5阶振型

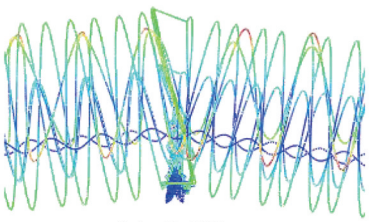
图 2　ZY2 单塔前 5 阶振型



（a）1阶振型　　（b）2阶振型



（c）3阶振型　　（d）4阶振型



（e）5阶振型

图 3　ZY2 塔线耦联体系前 5 阶振型

表 1　ZY2 单塔前 5 阶振型频率及振动特性描述

阶数	自振频率/Hz	振动特性描述
1	2.043 0	垂直线路方向整体弯曲
2	2.052 4	顺线路方向整体弯曲
3	4.612 6	塔段 7、塔段 6 斜材局部振动
4	6.054 4	塔段 7、塔段 6、塔段 5 斜材局部振动
5	6.144 0	垂直线路方向整体弯曲与塔段 7、塔段 6、塔段 5、塔段 4 斜材局部振动

可以看出 ZY2 单塔的前两阶振型与塔线耦联体系中关于塔的前两阶振型均为垂直线路方向整体弯曲振型和顺线路方向整体弯曲振型。单塔模型从第三阶振型开始出现局部振型,而塔线耦联模型第

表 2　ZY2 塔线耦联体系前 5 阶振型频率及振动特性描述

阶数	自振频率/Hz	振动特性描述
333	1.757 1	垂直线路方向整体弯曲
454	2.371 4	顺线路方向整体弯曲
789	4.162 4	整体扭转
874	4.611 3	塔段 7、塔段 6、塔段 5 斜材局部振动
963	5.070 4	垂直线路方向整体弯曲塔身斜材局部振动

三阶振型为整体扭转振型。说明线的耦联作用会增大扭转效应对输电塔振动响应的影响。两种模型在 4.61 Hz 的频率附近均出现了严重的局部振型，振动位置均位于塔段 7、塔段 6、塔段 5 交叉斜材处。鉴于此，可以对这 3 个塔段的交叉斜材增设横隔面。

1.4　横隔面增设方案

根据 ZY2 输电塔单塔与塔线耦联体系有限元模型振型分析结果，为约束局部振型，故在塔段 7、塔段 6、塔段 5 交叉斜材处增设横隔面。横隔面角钢型号均采用 L90×8 截面 Q235 钢，增设横隔面布置方式与形状如图 4、图 5 所示。

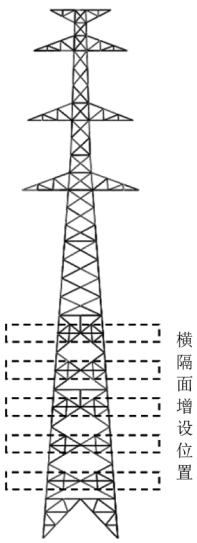


图 4　横隔面增设位置

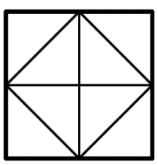
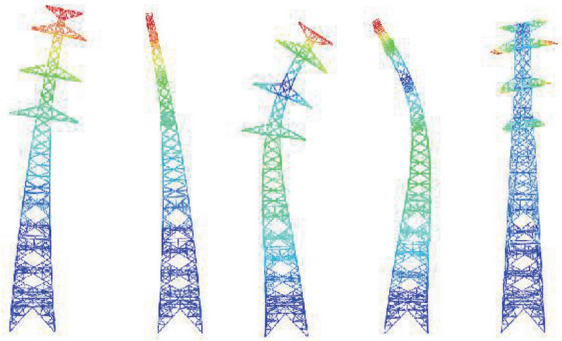


图 5　横隔面形状

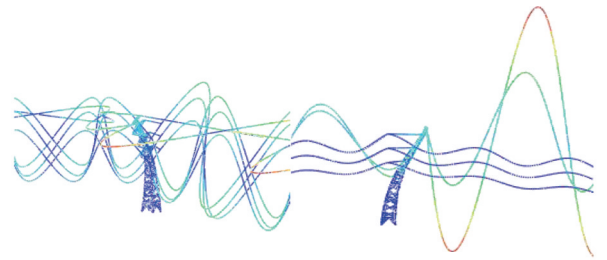
1.5　增设横隔面后 ZY2 输电塔模态分析

在 Abaqus 软件中建立增设横隔面后的 ZY2 单塔和“一塔两线”耦联体系有限元模型，分别提取前 20 阶和前 1000 阶模态进行计算，建模方法同第 1.1 节、第 1.2 节所述。增设横隔面后的单塔模型前 5 阶振型与塔线耦联体系关于输电塔的前 5 阶振型如图 6、图 7 所示，频率如表 3、表 4 所示。

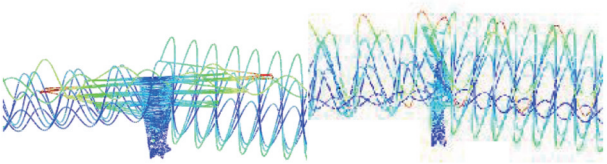


（a）1阶振型　（b）2阶振型　（c）3阶振型　（d）4阶振型　（e）5阶振型

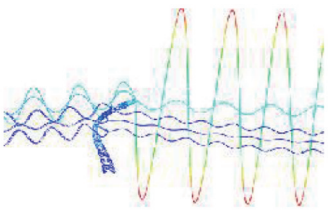
图 6　增设横隔面后 ZY2 单塔前 5 阶振型



（a）1阶振型　（b）2阶振型



（c）3阶振型　（d）4阶振型



（e）5阶振型

图 7　增设横隔面后 ZY2 塔线耦联前 5 阶振型

表 3　增设横隔面后 ZY2 单塔前 5 阶振型频率及振动特性描述

阶数	自振频率/Hz	振动特性描述
1	2.036 6	垂直线路方向整体弯曲
2	2.045 7	顺线路方向整体弯曲
3	6.005 0	垂直线路方向整体弯曲与塔段 4 斜材小幅振动
4	6.146 3	顺线路方向整体弯曲与塔段 4 斜材小幅振动
5	6.997 5	整体扭转

表 4　增设横隔面后 ZY2 塔线耦联有限元模型前 5 阶振型频率及振动特性描述

阶数	自振频率/Hz	振动特性描述
333	1.756 4	垂直线路方向整体弯曲
454	2.366 5	顺线路方向整体弯曲
789	4.158 8	整体扭转
918	4.675 7	垂直线路方向整体弯曲塔身斜材小幅局部振动
950	4.997 1	垂直线路方向整体弯曲塔身斜材小幅局部振动

可以看出增设横隔面后,两种模型的局部振型均基本消失,说明横隔面布置合理,可以有效抑制输电塔的局部振型。

综上,合理增设横隔面可以有效抑制输电塔局部振型。且增设横隔面前后塔线耦联体系的振型模态与单塔振型模态在整体振型频率上会有所不同,因此线的耦联作用不可忽视。后续计算将基于塔线耦联体系模型开展。

2　输电塔杆件动力不稳定区域[21]

2.1　杆件动力微分方程及其特征方程

在轴向动力作用下,考虑纵向惯性力影响,可以将杆件微分方程式写为

$$EI\frac{\partial^4 v}{\partial x^4}+[P_0+P_t\Phi(t)]\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+m\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}=0 \quad (1)$$

式中:E 为杨氏弹性模量;I 为杆件惯性矩;v 为杆件横向位移;x 为杆件轴向位置坐标;P_0 为杆件轴向荷载静力分量;$P_t\Phi(t)$ 为动力分量,P_t 为 t 时刻的动力分量幅值,$\Phi(t)$ 为 t 时刻周期函数;m 为杆件单位长度质量。

引入第 k 阶固有振动频率及临界力公式:

$$\omega_k=\frac{k^2\pi^2}{l^2}\sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (2)$$

$$P_{*k}=\frac{k^2\pi^2 EI}{l^2} \quad (3)$$

式中:ω_k 为第 k 阶固有振动频率;l 为杆件长度;P_{*k} 为第 k 阶临界力。

使用伽辽金变分法,可分离杆件横向动力位移中的位置和时间变量,代入式(1)可得

$$\frac{\mathrm{d}^2 f_k(t)}{\mathrm{d}t^2}+\omega_k^2\left(1-\frac{P_0+P_t\Phi(t)}{P_{*k}}\right)f_k(t)=0 \quad (4)$$

式中,$f_k(t)$ 为杆件横向位移随时间变化的分量。

引入在纵向力静力分量 P_0 作用下的第 k 阶杆件固有振动频率:

$$\Omega_k=\omega_k\sqrt{1-\frac{P_0}{P_{*k}}} \quad (5)$$

同时引入第 k 阶激发系数:

$$\mu_k=\frac{P_t}{2(P_{*k}-P_0)} \quad (6)$$

即可得到马奇耶-希拉方程[20]的标准形式:

$$f''_k(t)+\Omega_k^2[1-2\mu_k\Phi(t)]f_k(t)=0 \quad (7)$$

式中:$f''_k(t)$ 为杆件横向位移随时间变化的分量的二阶导数;Ω_k 为第 k 阶固有振动频率;μ_k 为第 k 阶激发系数。

其特征方程式为

$$\rho^2-2A\rho+1=0 \quad (8)$$

式中:ρ 为特征根;A 为特征系数。

2.2　主要动力不稳定区域边界

式(7)的特解满足条件为

$$f_k^*(t+T)=\rho_k f_k^*(t) \quad (9)$$

式中:$f_k^*(t)$ 为式(7)的特解;T 为解的周期;ρ_k 为第 k 个特征根。

这类函数可统一表示为

$$f_k^*(t)=\chi_k(t)\mathrm{e}^{\frac{t}{T}\ln\rho_k} \quad (10)$$

式中,$\chi_k(t)$ 为某一周期为 T 的周期函数。

考虑特征根的复数形式,则可将式(10)改写为

$$f_k^*(t)=\chi_k(t)\mathrm{e}^{\frac{it}{T}\arg\rho_k}\mathrm{e}^{\frac{t}{T}\ln|\rho_k|} \quad (11)$$

分析式(11)的性质可以看出,当特征根 ρ_k 的模大于 1 时,杆件动力微分方程的解随时间无限递增;反之,当特征根 ρ_k 的模小于 1 时,杆件动力微分方程的解随时间衰减;当特征根 ρ_k 的模等于 1 时,杆件动力微分方程的解为周期(或近似周期)函数,也就是说它的解总是有限的。

考虑特征方程式(11)的韦达定理,可知 ρ_k 的模大小取决于 A。当 $|A|>1$ 时,其中一个根的模必大于 1,杆件动力微分方程的解随时间无限递增;反之当 $|A|<1$ 时,特征方程式有共轭复数根,若要满足韦达定理则两个根的模均等于 1,杆件动力微分方程的解总是有限的;当 $|A|=1$ 时,对应的是有限解和无限解的边界,也就是动力不稳定区域边界。

在动力不稳定区域边界上,特征方程式(8)的根为 1 或-1,对应杆件动力微分方程的解是周期为 T 或 $2T$ 的周期函数。当杆件动力微分方程的解的

周期为 $2T$ 时，将其按照傅里叶级数形式展开，可得

$$f(t)=\sum_{k=1,3,5}^{\infty} a_k \sin\frac{k\theta t}{2}+b_k\cos\frac{k\theta t}{2} \tag{12}$$

式中：a_k、b_k为级数展开的系数；θ 为函数的频率。

将式(12)代入式(7)中，取 $\Phi(t)=\cos\theta t$，令 $\sin\frac{k\theta t}{2}$和 $\cos\frac{k\theta t}{2}$的同类项系数相等，可得临界频率方程式为

$$\begin{vmatrix} 1\ \pm\mu-\frac{\theta^2}{4\Omega^2} & -\mu & 0 & \cdots \\ -\mu & 1-\frac{9\theta^2}{4\Omega^2} & -\mu & \cdots \\ 0 & -\mu & 1-\frac{25\theta^2}{4\Omega^2} & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{vmatrix}=0 \tag{13}$$

同理也可求得周期为 T 的解的临界频率方程式。由于行列式为无限阶，取前三阶计算，可以发现，确定主要动力不稳定区域边界可仅考虑式(13)的第一阶对角线元素为 0，精确度足够，即

$$1\ \pm\mu-\frac{\theta^2}{4\Omega^2}=0 \tag{14}$$

由此可得输电塔斜材主要动力不稳定区域边界为

$$\theta=2\Omega\sqrt{1\ \pm\mu} \tag{15}$$

3 输电塔杆件动力稳定性分析

3.1 风场模拟与加载

根据文献[22]提出的随机傅里叶谱模型，模拟不同风速下塔线体系的风场，该模型考虑了风场沿水平方向和竖直方向的相关性，与实际风场比较接近。ZY2 输电线路所处的场地类别为 B 类，取地面粗糙长度为 0.05 m，模拟风速时的采样频率为 10 Hz，总时长为 120 s。以 30 m/s 风速为例，得到的 10 m 高度处风速时程如图 8 所示。

根据规范[23]将风速时程转换为风荷载时程。设置 60 s 风荷载线性增长时长，在增设横隔面前后的 Abaqus 塔线耦联模型中设置动力-隐式分析步进行响应分析，设置时间长度为 120，增量步长为 0.02。将输电塔分为 7 个塔段，每个塔段施加一集中动力风荷载。输电线每隔 2 m 设置一动力风荷载加载点。

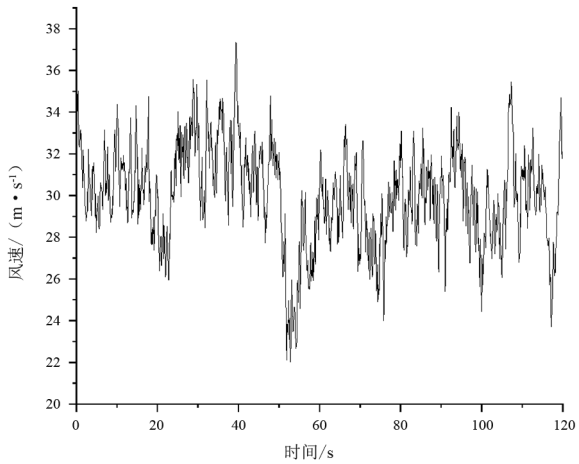


图 8 10 m 高度处 30 m/s 风速时程

3.2 斜材轴力响应分析

以 30 m/s 为基本风速，1 m/s 为增量，按照第 3.1 节所述方法逐级计算风速时程及风荷载时程，并将其加载至增设横隔面前后的塔线耦联体系模型中进行计算。

由于设置了 60 s 的风荷载线性增长时长，故在进行响应时程分析时仅提取后 60 s 数据，对增设横隔面前后的塔段 5、塔段 6、塔段 7 斜材轴力最大处应力时程进行分析。以 30 m/s 风速为例，结果如图 9、图 10 所示。

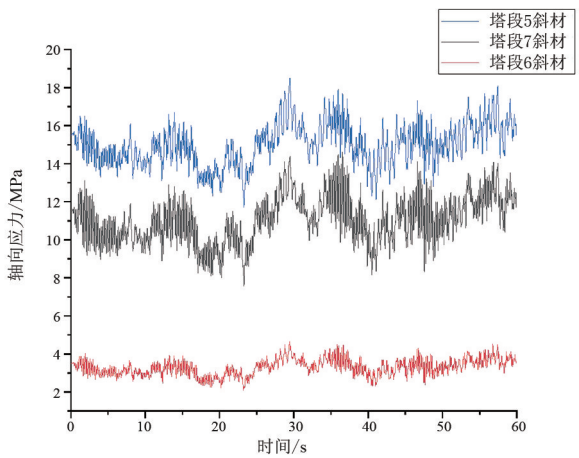


图 9 30 m/s 风速下各塔段斜材轴力时程

可以看出：无论是否增设横隔面，最靠近塔腿处的塔段 7 斜材轴力响应最大，塔段 5 次之，塔段 6 最小，且塔段 6 斜材轴向应力响应均值仅为塔段 5 的 30%左右；另外增设横隔面前后斜材轴力响应变化不明显，其他风速下仍可得到近似的结果。由此说明，无法直接通过斜材的轴力响应时程变化分析其加固效率，需要结合前面提到的动力不稳定区域理论进行分析。塔段6处斜材动力响应明显小于另

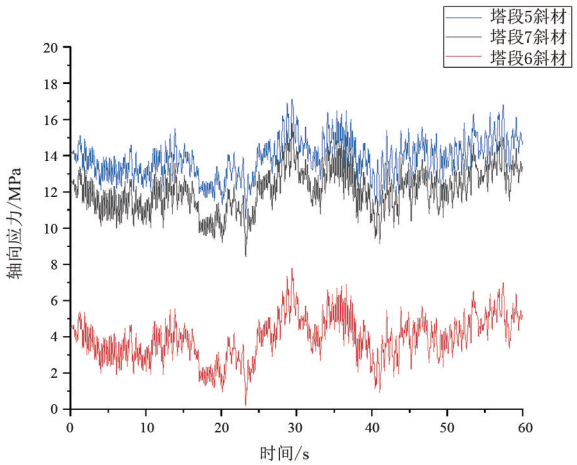


图 10　30 m/s 风速下各塔段增设横隔面后斜材轴力时程

外两个塔段斜材,故在后续分析斜材是否进入动力不稳定区域时,仅针对塔段 5 和塔段 7 处交叉斜材进行分析。

3.3　斜材动力稳定性分析

为判断斜材是否进入动力不稳定区域,需要确定的参数包括激发频率 θ、固有振动频率 Ω 和激发系数 μ。

根据塔段 5 和塔段 7 增设横膈面前后斜材轴力时程图,绘制其功率谱密度图,得到风振能量在频域内的分布情况[24],从而确定该两塔段斜材激发频率 θ 的取值。仍以 30 m/s 风速为例,塔段 7 斜材增设横隔面前后轴向应力功率谱如图 11、图 12 所示。在塔段 7 斜材局部振型出现的频率范围内,取功率谱幅值对应的频率作为该风速下斜材动力不稳定的激发频率 θ[25]。增设横隔面前后,塔段 7 处斜材的动力不稳定激发系数 θ 分别为 4.96 Hz 与 4.84 Hz。用类似方法可以得到不同风速下两塔段斜材动力不稳定激发频率 θ,见表 5。同一风速下不同塔段处的激发频率 θ 相同。

根据第 2.1 节的推导,可求得一阶固有振动频率 Ω 和激发系数 μ 为

$$\Omega = \omega\sqrt{1-\frac{P_0}{P_*}} \tag{16}$$

$$\mu = \frac{P_t}{2(P_* - P_0)} \tag{17}$$

式中:P_* 为欧拉临界应力;P_0 取各塔段斜材轴力时程的均方根;P_t 根据风速时程幅值与均方根的关系,统一取为 $0.2P_0$[26]。由此可求得以 30 m/s 为基本风速、1 m/s 为增量,不同风速下塔段 5 和塔段 7

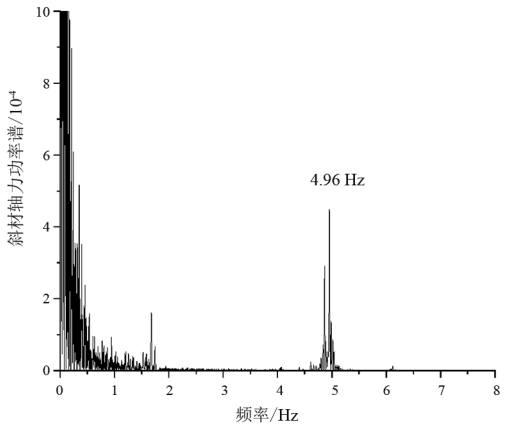


图 11　30 m/s 风速下塔段 7 斜材轴力功率谱密度

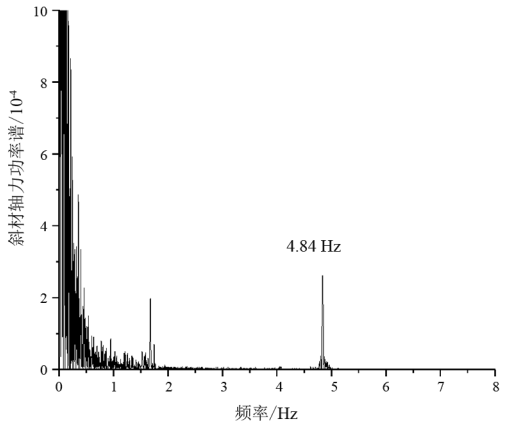


图 12　30 m/s 风速下塔段 7 增设横隔面后斜材轴力功率谱密度

增设横隔面前后的斜材动力稳定性参数,见表 5。

将各个风速下塔段 5 和塔段 7 增设横隔面前后斜材动力稳定性参数与动力不稳定区域绘制在同一个参数平面内[27],如图 13、图 14 所示。即可结合动力不稳定区域理论,判断不同塔段斜材增设横隔面前后的动力失稳破坏风速,结果见表 6,从而验证不同区域增设横隔面提高杆件动力稳定性的有效性。

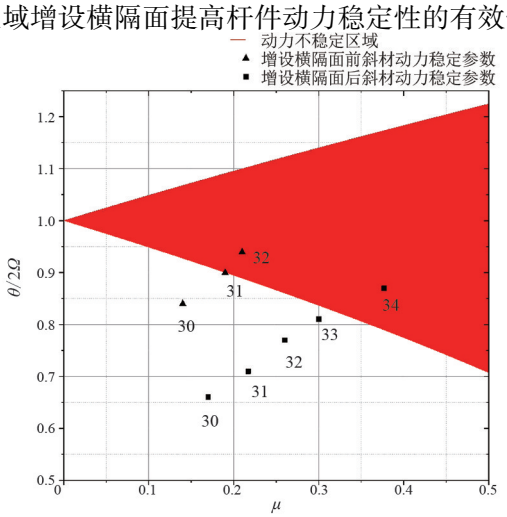


图 13　塔段 7 斜材动力稳定参数

表 5 增设横隔面前后斜材动力稳定性参数

位置	杆塔类型	风速/(m·s^{-1})	ω/Hz	P_*/N	P_0/N	P_t/N	Ω/Hz	μ	θ/Hz
塔段 7 斜材	ZY2 原塔	30	4.61	18 946 332	11 151 555	2 230 311	2.95	0.140	4.96
		31	4.61	18 946 332	12 341 808	2 468 361	2.72	0.190	4.92
		32	4.61	18 946 332	12 903 668	2 580 733	2.60	0.210	4.89
	增设横隔面后的 ZY2 输电塔	30	6.01	18 946 332	11 890 701	2 378 140	3.66	0.170	4.84
		31	6.01	18 946 332	12 862 643	2 572 529	3.40	0.217	4.85
		32	6.01	18 946 332	13 622 026	2 724 405	3.18	0.260	4.89
		33	6.01	18 946 332	14 184 968	2 836 994	3.01	0.300	4.87
		34	6.01	18 946 332	14 918 637	2 983 727	2.77	0.380	4.84
塔段 5 斜材	ZY2 原塔	30	4.61	26 860 117	13 712 879	2 742 576	3.23	0.100	4.96
		31	4.61	26 860 117	15 242 183	3 048 437	3.03	0.130	4.92
		32	4.61	26 860 117	15 853 766	3 170 753	2.95	0.143	4.89
		33	4.61	26 860 117	16 796 636	3 359 327	2.82	0.170	4.95
		34	4.61	26 860 117	17 593 936	3 518 787	2.71	0.190	4.87
		35	4.61	26 860 117	17 765 456	3 553 091	2.68	0.200	4.92
	增设横隔面后的 ZY2 输电塔	30	6.01	26 860 117	13 858 404	2 771 680	4.18	0.110	4.84
		31	6.01	26 860 117	15 523 304	3 104 660	3.90	0.140	4.85
		32	6.01	26 860 117	16 240 594	3 248 118	3.77	0.150	4.89
		33	6.01	26 860 117	17 230 555	3 446 111	3.60	0.180	4.87
		34	6.01	26 860 117	18 196 864	3 639 372	3.41	0.210	4.84
		35	6.01	26 860 117	18 513 286	3 702 657	3.35	0.220	4.87
		36	6.01	26 860 117	19 887 635	3 977 527	3.06	0.290	4.84
		37	6.01	26 860 117	20 529 840	4 105 968	2.92	0.320	4.86

表 6 斜材失稳风速

塔段	失稳风速/(m·s^{-1})		提高效率/%
	增设横隔面前	增设横隔面后	
7	31	34	20.3
5	35	37	11.8

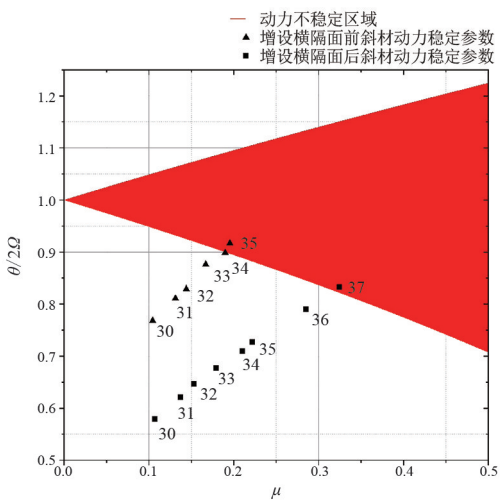


图 14 塔段 5 斜材动力稳定参数

4 结 论

上面通过建立 220 kV 同塔双回路输电线路某输电塔的塔线耦联体系有限元模型,分析得到以下结论:

1)在靠近塔腿节间的交叉斜材处增设横隔面可以有效抑制输电塔局部振型;

2)塔线耦联体系模型与单塔模型的输电塔整体振型频率有较大差别,说明塔线耦联作用的影响不可忽视;

3)结合动力不稳定区域理论可以发现,增设横隔面可以显著延缓斜材进入动力不稳定区域,最高可将其失稳破坏风速提高 3 m/s,从而提高输电塔的动力稳定性;

4)靠近塔腿处的塔段斜材动力稳定性提高效率最高。

参考文献

[1] 侯景鹏,孙自堂,吴兴宏,等.输电塔抗风稳定分析[J].水电能源科学,2011,29(3):169-171.

[2] HUFF M, CARROLL H B. Hurricane Carla at Galveston, 1961[J]. Southwestern Historical Quarterly, 1962, 65(3):293-309.

[3] 谢强,李杰.电力系统自然灾害的现状与对策[J].自然灾害学报,2006,15(4):126-131.

[4] 河北省电力勘测设计研究院. 7.24 辛-彭 500 kV 线路倒塔故障原因初步分析报告[R]. 石家庄:河北省电力勘测设计研究院,2009: 2-11

[5] 钟岱辉,李荣帅,王文明.输电塔-线体系灾变机理研究综述[J].四川建筑科学研究,2020,46(3):37-45.

[6] 陈李那.提高沿海台风区 500 kV 输电线路抗风能力措施[J].能源与环境,2020(4):113-116.

[7] MOMOMURA Y, MARUKAWA H, OKAMURA T, et al. Full-scale measurements of wind-induced vibration of a transmission line system in a mountainous area[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1997, 72:241-252.

[8] 谢强,张勇,李杰.华东电网 500 kV 任上 5237 线飑线风致倒塔事故调查分析[J].电网技术,2006,30(10): 59-63.

[9] 柳国环,李宏男.高压输电塔-线体系风致动力响应分析与优化控制[J].中国电机工程学报,2008,28(19): 131-137.

[10] 谢强,李继国,严承涌,等.1000 kV 特高压输电塔线体系风荷载传递机制风洞试验研究[J].中国电机工程学报,2013,33(1):109-116.

[11] LIANG S G, ZOU L H, WANG D H, et al. Investigation on wind tunnel tests of a full aeroelastic model of electrical transmission tower-line system [J]. Engineering Structures, 2015, 85:63-72.

[12] CIGRE working group 22.08. Diaphragms for lattice steel supports[C]. Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques a Haute Tension (CIGRE), Paris: 2002.

[13] 谢强, 阎启, 李杰. 横隔面在高压输电塔抗风设计中的作用分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 1-4.

[14] 谢强, 孙力, 林韩, 等. 500 kV 输电杆塔结构抗风极限承载力试验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 712-719.

[15] 楼文娟, 姜雄, 夏亮,等. 长横担输电塔风致薄弱部位及加强措施[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(10): 1798-1804.

[16] SHASTRY B P, RAO G V. Dynamic stability of bars considering shear deformation and rotatory inertia[J]. Computers and Structures, 1984, 19(5-6): 823-827.

[17] SHASTRY B P, RAO G V. Dynamic stability of short cantilever columns subjected to distributed axial loads[J]. Computers and Structures, 1986,22(6):1063-1064.

[18] CAI Yunzhu, XIE Qiang, XUE Songtao, et al. Fragility modelling framework for transmission line towers under winds[J]. Engineering Structures, 2019, 191: 686-697.

[19] 唐磊, 张盈哲, 谢强. 高压输电塔线耦联体系抗风动力静力计算对比分析[C]//2013 年中国电机工程学会年会论文集.成都:中国电机工程学会学术委员会, 2013:1567-1573.

[20] 张松海,施心陵,李鹏,等.基于动态拉力与倾角的输电线路覆冰过程辨识与建模[J].电力系统保护与控制,2016,44(9):57-61.

[21] 符·华·鲍洛金著,林砚田译. 弹性体系的动力稳定性[M]. 北京:高等教育出版社, 1960.

[22] 阎启.基于物理机制的随机风场模型研究[D].上海:同济大学,2011.

[23] 能源行业电网设计标准化技术委员会.架空输电线路荷载规范:DL/T 5551—2018[S]. 北京:中国计划出版社, 2018.

[24] XIE Qiang, CAI Yunzhu, XUE Songtao. Wind-induced vibration of UHV transmission tower line system: wind tunnel test on aero-elastic model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 171: 219-229.

[25] 李悦,谢强,张戬,等.随机风场作用下输电塔线体系的杆件动力稳定性评估[J].高电压技术,2023, 49(3):1234-1243.

[26] 张戬.输电塔-线体系耦联振动特性与失稳破坏机理研究[D]. 上海:同济大学,2020.

[27] 李悦.强风作用下输电塔-线耦联体系连续性倒塌机理分析[D]. 上海:同济大学,2023.

作者简介:

李钰睿(1999),女,硕士研究生,研究方向为输电线路抗风;

谢　强(1971),男,博士,教授,研究方向为电力设备防灾减灾;

李　悦(1993),女,博士,工程师,从事结构分析工作。

(收稿日期:2023-06-27)

耐张塔输电线路等值覆冰厚度的简化预测方法

吴天宝[1],马小敏[1],刘益岑[1],刘小江[1],庄 杰[2]
(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;
2. 电子科技大学信息与通信工程学院,四川 成都 611731)

摘 要:输电线路覆冰会引发断线倒塔事故,严重影响电网的安全运行,准确监测线路覆冰情况具有重要的工程意义和应用价值。在输电线路综合荷载的静力学模型基础上,提出了两种简化的等值覆冰厚度预测方法。第一种简化方法不需要水平档距和高度差参数,减少了输入参数;第二种简化方法不需要角度传感器,避免角度传感器误差造成的预测性能下降,且减小了系统的硬件成本。结果表明:在大水平档距情况下,第一种简化方法与现有方法的预测性能基本一致;在覆冰前后悬垂角变化不大的情况下,第二种简化方法的预测误差在工程允许范围以内。

关键词:等值覆冰厚度; 耐张塔; 简化预测方法; 静态力学模型; 悬垂角
中图分类号:TM 752 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2024)01-0010-05
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240102

Simplified Prediction Method of Equivalent Ice Thickness for Tension Tower of Transmission Line

WU Tianbao[1], MA Xiaomin[1], LIU Yicen[1], LIU Xiaojiang[1], ZHUANG Jie[2]
(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract:The icing of transmission lines can cause the accident of line broken and tower collapse, which seriously affects the safe operation of power grid. So accurate monitoring of icing conditions on transmission lines has important engineering significance and application value. Based on static mechanical model of comprehensive load of transmission line, two simplified equivalent ice thickness prediction methods are proposed. The first simplification method does not require horizontal span and height difference parameters, and reduces the input parameters, and the second simplification method does not require angle sensors, avoids the degradation of prediction performance caused by angle sensor errors, and reduces the hardware cost of the system. The results show that in the case of large horizontal span, the prediction performance of the first simplified method is basically the same as that of the existing method, and in the case of little changes in overhang angle before and after icing, the prediction error of the second simplified method is within the engineering allowable range.

Key words:equivalent ice thickness; tension tower; simplified prediction method; static mechanical model; overhang angle

0 引 言

覆冰灾害会导致输电线路机械和电气性能急剧下降,引起绝缘子闪络、线路跳闸、断线、倒塔、导线舞动和通信中断等事故[1],威胁电网安全运行。中国幅员辽阔,地形地貌复杂多变,尤其是山脉较多的南方地区,容易发生严重的覆冰事故[2]。在 2008 年和 2018 年,中国部分地区遭受大面积积雪冰冻天气,多处输电线路设备被冰雪灾害侵袭,造成了高达上百亿元的经济损失。有效的覆冰厚度预测方法能提高电网安全运行水平,减小冰灾造成的经济损失,

基金项目:国网四川省电力公司科技项目“基于北斗通讯技术的带边缘计算功能的输电线路覆冰监测技术研究及应用”(521997200038)

已成为国内外重要的研究课题。

目前，输电线路覆冰厚度的预测方法主要有称重法[1-9]、图像监测[10-11]及人工智能辅助的导线覆冰预测法[12-16]、电容法[17]和光纤传感法[18-22]，其中应用最广泛的是称重法。称重法以拉力传感器代替绝缘子球头挂环，根据覆冰前后拉力变化量，利用覆冰力学模型，计算出等值覆冰厚度[4]。实际覆冰通常具有不同断面形状与厚度，沿着架空输电线路不均匀分布。为简化模型与方便计算，计算模型通常将实际覆冰折算成具有相同截面、厚度均匀的圆柱形覆冰[9]，即所谓的等值覆冰。针对直线塔的应用情况，文献[2]使用有限元法，研究了过谷模型、翻山模型等特殊地形下的输电线路等值覆冰厚度计算方法；文献[3]重点考虑了导线风偏角因素，分析了垂直平面和风偏平面的静力学综合模型。针对耐张塔的应用情况，文献[1]和文献[5]根据静力学力矩平衡原理，以轴向拉力和倾角作为输入参数，建立了两端均为耐张塔的输电线路力学模型，但该模型忽略了覆冰作用下的综合负荷在导线上的不均匀分布，导致模型计算结果比实测值大；文献[4]采用有限元法，在大高差与否或大档差与否的情况下，分析了等值覆冰厚度计算模型的适用性。

上述等值覆冰厚度预测方法需要的线路参数较多，且对悬垂角精度要求较高，使得上述方法在工程实践中广泛应用存在较大困难。下面针对输电线路两端都是耐张塔的情况，在覆冰静态力学模型基础上，提出了两种简化的等值覆冰厚度计算方法：第一种方法不需要档距和高度差参数；第二种方法不需要角度传感器。所提方法可提升等值覆冰厚度预测方法在工程实践中的应用性。

1　耐张塔线路覆冰静态力学模型

考虑两端均为耐张塔的情况，架空线受力分析如图 1 所示：A、B 为耐张塔悬挂点，A 与 B 之间的高度差为 h，m；水平档距为 l，m；高差角为 β；AC、DB 为耐张塔绝缘子串，其长度均为 λ，m；绝缘子串单位长度的自重力和覆冰重力之和为 ω_0，N/m；架空线单位长度的自重力和覆冰重力之和为 ω，N/m；两处悬挂点的拉力分别为 F_a 和 F_b，N；悬垂角分别为 θ_a 和 θ_b；V 和 H 分别表示垂直向上方向和水平方向的拉力分量。

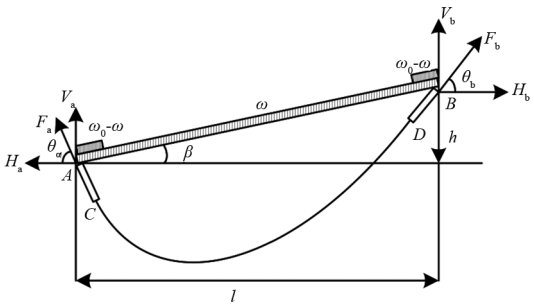


图 1　耐张塔架空线受力分析

根据力学平衡原理，在水平方向和竖直方向的合力均为 0，即：

$$F_a\cos\theta_a = F_b\cos\theta_b \tag{1}$$

$$F_a\sin\theta_a + F_b\sin\theta_b = G_0 + G_1 + G_2 \tag{2}$$

式中，G_0、G_1 和 G_2 分别代表绝缘子串、输电线缆和覆冰的重力。在竖直平面内，根据静力平衡条件，对 A 点的总力矩为 0，则[1]：

$$V_b l - H_b h - \frac{l\omega}{\cos\beta}\frac{l}{2} - \lambda(\omega_0-\omega)\left(l - \frac{\lambda\cos\beta}{2}\right) - \lambda(\omega_0-\omega)\frac{\lambda\cos\beta}{2} = 0 \tag{3}$$

其中

$$V_b = F_b\sin\theta_b,\quad H_b = F_b\cos\theta_b,\quad \cos\beta = \frac{l}{\sqrt{l^2+h^2}} \tag{4}$$

根据式(3)，可得

$$V_b = \frac{l\omega}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_0-\omega) + \frac{h}{l}H_b \tag{5}$$

在文献[1]中，利用 B 点的拉力传感器和角度传感器分别测出 F_b 和 θ_b，然后根据式(5)可求解出密度变量 ω，进而获得沿架空线单位长度的覆冰重力 q_{ice}，N/m。

$$q_{ice} = \omega - \omega_1 \tag{6}$$

式中，ω_1 为架空线单位长度的自重力，N/m。

覆冰等值厚度和 q_{ice} 之间关系为

$$q_{ice} = 9.8\pi b(D+b)\rho \tag{7}$$

式中：b 为覆冰等值厚度，mm；D 为输电导线直径，mm；ρ 为覆冰密度，$\rho = 0.9\times10^{-3}$ kg/(m·mm^2)。最后根据式(7)可求出覆冰等值厚度为

$$b = \frac{1}{2}\left(\sqrt{\frac{4q_{ice}}{9.8\pi\rho} + D^2} - D\right) \tag{8}$$

由于在式(3)中，假设的导线自重力荷载沿两

悬挂点连线均匀分布，而实际情况是沿导线曲线均匀分布，因此式(5)中 ω 的系数 $l/(2\cos\beta)$ 比实际值小，从而导致覆冰厚度变大。为了修正该误差，文献[1]建议在无覆冰时，测量拉力 F_b 和悬垂角 θ_b，利用上述方法计算冰厚 b_0；当覆冰发生后，用求解出的 b 减去 b_0，即可消除大部分模型误差。

2 简化的等值覆冰厚度估计方法

2.1 简化方法一

在第 1 种简化方法中，不需要高度差和水平档距作为输入参数。观察式(5)，由于高度差 h 相对于水平档距 l 较小(例如 $l=500$ m，h 位于[0,20]m 区间)，且水平分力 H_b 和垂直分力 V_b 是同一数量级的，所以 hH_b/l 相对于 V_b 较小，可以忽略不计。因此，式(5)可简化为

$$V_b \approx \frac{l\omega}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_0 - \omega) \tag{9}$$

当无覆冰时，通过拉力传感器和角度传感器可获取 B 点覆冰发生前拉力 F_{b0} 和悬垂角 θ_{b0}，代入式(9)可得

$$F_{b0}\sin\theta_{b0} - \lambda\omega_2 \approx \frac{l\omega_1}{2\cos\beta} \tag{10}$$

式中，ω_2 为绝缘子串单位长度的自重力，N/m。

当覆冰发生时，利用传感器获得 B 点拉力 F_{b1} 和悬垂角 θ_{b1}，再代入式(9)，则有

$$F_{b1}\sin\theta_{b1} - \lambda\omega_2 \approx \frac{l(\omega_1 + q_{ice})}{2\cos\beta} \tag{11}$$

将式(10)和式(11)相除并整理，可得

$$q_{ice} \approx \frac{F_{b1}\sin\theta_{b1} - F_{b0}\sin\theta_{b0}}{F_{b0}\sin\theta_{b0} - \lambda\omega_2}\omega_1 \tag{12}$$

总结所提第 1 种简化方法的步骤为：1)当无覆冰时，测量拉力 F_{b0} 和悬垂角 θ_{b0}；2)当覆冰发生时，测量拉力 F_{b1} 和悬垂角 θ_{b1}；3)利用式(12)计算覆冰密度 q_{ice}；4)利用式(8)计算覆冰等值厚度 b。

第 1 种简化方法所需的输入参数包括绝缘子串的长度 λ 和密度 ω_2、传输导线的密度 ω_1、拉力传感器在覆冰发生前后的拉力值 F_{b0} 和 F_{b1}、角度传感器在覆冰发生前后的悬垂角 θ_{b0} 和 θ_{b1}。除了拉力和悬垂角，其余参数均为固定值，可通过查找台账获取。与文献[1]采用的式(5)的方法相比较，所提的第 1 种简化方法不需要高度差 h 和水平档距 l，因此可避免高度差和水平档距的测量误差。

2.2 简化方法二

文献[1]和简化方法一都必须通过角度传感器获取悬垂角 θ_b。但是，在实际情况中，角度传感器时常会提供带有误差的悬垂角；在后续的仿真验证部分，可以看出悬垂角的误差可能会导致覆冰厚度估计值存在较大偏差。为了克服该问题，所提出的第 2 种简化方法不再需要悬垂角参数。同时，由于无需角度传感器，也可降低覆冰厚度预测系统的硬件成本。具体方法如下。

将无覆冰时的式(4)代入式(5)并移项，可得

$$F_{b0}\sin\theta_{b0} - \frac{h}{l}F_{b0}\cos\theta_{b0} = \frac{l\omega_1}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_2 - \omega_1) \tag{13}$$

利用三角恒等式，式(13)可改写为

$$R\sin(\theta_{b0} - \varphi) = \frac{l\omega_1}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_2 - \omega_1) \tag{14}$$

其中

$$R = \sqrt{F_{b0}^2 + \left(\frac{h}{l}F_{b0}\right)^2},\quad \varphi = \arctan\left(\frac{h}{l}\right) = \beta \tag{15}$$

则可得到覆冰前悬垂角为

$$\theta_{b0} = \arcsin\left\{\left(\frac{l\omega_1}{2\cos\beta} + \lambda(\omega_2 - \omega_1)\right)/R\right\} + \beta \tag{16}$$

假设覆冰发生后的悬垂角 θ_{b1} 与 θ_{b0} 很接近，可以被 θ_{b0} 近似替代，于是式(12)可另写为

$$q_{ice} \approx \frac{(F_{b1} - F_{b0})\sin\theta_{b0}}{F_{b0}\sin\theta_{b0} - \lambda\omega_2}\omega_1 \tag{17}$$

此外，根据式(13)并忽略较小项 $\frac{h}{l}F_{b0}\cos\theta_{b0}$，可得 $F_{b0}\sin\theta_{b0} - \lambda\omega_2 \approx \frac{l\omega_1}{2\cos\beta}$；将该近似值代入式(16)，则有

$$q_{ice} \approx 2(F_{b1} - F_{b0})\sin\theta_{b0}/\sqrt{l^2 + h^2} \tag{18}$$

总结所提的第 2 种简化方法的具体步骤为：1)当无覆冰时，测量拉力 F_{b0}；2)通过式(15)计算出无覆冰时悬垂角 θ_{b0}；3)当覆冰发生后，测量拉力 F_{b1}，并利用式(18)计算出覆冰密度 q_{ice}；4)根据式(8)计算覆冰等值厚度 b。

第 2 种简化方法所需的输入参数包括绝缘子串

的长度 λ 和密度 ω_2、传输导线的密度 ω_1、高度差 h、水平档距 l、拉力传感器在覆冰发生前后的拉力值 F_{b0}和 F_{b1}。与文献[1] 和所提的第 1 种简化方法相比较,第 2 种简化方法不依赖于角度传感器,因此可避免角度测量误差带来的覆冰厚度估计偏差。虽然第 2 种简化方法需要高度差和水平档距,在后续的仿真验证部分可以看出,高度差和水平档距的误差对于最终的覆冰厚度估计值影响不大。

3　等值覆冰厚度的仿真验证

为了研究所提覆冰厚度计算方法的准确性,利用 Matlab 进行仿真验证,仿真参数的设置参考了中国国家标准 GB/T 1179—2017《圆线同心绞架空导线》[23]的钢芯铝合金绞线,具体参数值为:水平档距 $l=500$ m,高度差 $h=20$ m,绝缘子串长度 $\lambda=5$ m,绝缘子串单位长度的自重力 $\omega_2=20\times9.8$ N/m,架空线单位长度的自重力 $\omega_1=2.078\times9.8$ N/m,导线直径 $D=28.33$ mm。无覆冰时的悬垂角 $\theta_{a0}=20°$,$\theta_{b0}=25°$;当覆冰发生后,悬垂角增加到 $\theta_{a1}=22°$和 $\theta_{b1}=28°$。当上述参数给定后,可根据式(1)和式(2)计算出拉力的理论值。下面在 5 种场景下,通过仿真对比 3 种等值覆冰厚度预测方法,即文献[1]的方法和所提的两种简化方法。

3.1　输入参数无误差的情况

在第 1 种场景仿真实验中,覆冰厚度从 10 mm 变化到 30 mm,并假设各输入参数值都是准确值。表 1 中“文献[1]”表示文献[1]的覆冰厚度预测方法,“简化 1”和“简化 2”代表所提的两种简化的覆冰厚度预测方法(以下同)。

表 1　输入参数无误差时覆冰厚度预测比较

真实冰厚/mm	预测覆冰厚度/mm		
	文献[1]	简化 1	简化 2
10	10.5	10.3	8.2
15	15.5	15.3	13.5
20	20.5	20.3	18.7
25	25.6	25.3	23.9
30	30.7	30.3	29.0

从表 1 可知,在理论模型中,文献[1]和所提的第 1 种简化方法的预测误差均小于 1 mm。比较意外的是:第 1 种简化方法忽略了高度差和水平档距参数的相关项,但却能取得更小的估计误差性能。对该现象的解释是:在利用式(12)计算覆冰等值厚度时,分子项其实是覆冰发生前后做差分,忽略项 hH_b/l 在差分运算中被抵消了。随着真实覆冰厚度的增加,所提的第 2 种简化方法的估计误差从 1.8 mm 下降到 1.0 mm,即覆冰越厚,估计误差越小。这是因为在式(18)的分子中,随着覆冰厚度的增加,悬垂角变化引起的误差相对于覆冰重量越来越小;换言之,在这种情况下,覆冰重量是式(18)分子的主要部分。

3.2　角度传感器有误差的情况

在第 2 种场景中,假设 $b=20$ mm 时角度传感器提供的悬垂角 θ_{b1}具有误差。由于所提的第 2 种简化方法不需要悬垂角参数,所以表 2 只列举了两种方法悬垂角误差在-5°~+5°情况下的覆冰厚度预测值。根据表 1,所提的第 2 种方法的估计值是 18.7 mm,误差为 1.3 mm。从表 2 可知,当悬垂角误差大于 3°后,文献[1]和所提第 1 种简化方法的估计误差是 2~5 mm,该误差大于所提的第 2 种简化方法。因此,悬垂角误差对于这两种方法的性能影响较大。

表 2　悬垂角有误差时覆冰厚度预测比较

悬垂角误差/(°)	预测覆冰厚度/mm	
	文献[1]	简化 1
-5	15.1	15.5
-3	17.4	17.5
0	20.5	20.3
+3	23.3	22.8
+5	25.1	24.4

3.3　拉力传感器有误差的情况

在第 3 种场景中,假设 $b=20$ mm 时拉力传感器提供的 F_{b1}具有误差,其误差与真实值的比例从-5%到+5%,对应的覆冰厚度估计值如表 3 所示。从表 3 可知,文献[1]和所提第 1 种简化方法的性能基本一致,估计误差大致控制在 2 mm 以内。所提第 2 种简化方法在拉力读数偏大时的误差小于偏小的情况,这是因为第 2 种简化方法使用了无覆冰时的悬垂角,导致覆冰发生后计算的向上拉力分量偏小,所以当误报的拉力读数偏大时,正好与模型的误差相抵消。

3.4　水平档距有误差的情况

在第 4 种场景中,假设 $b=20$ mm 时台账提供的水平档距 l 具有误差,其误差与真实值的比例从

-10%到+10%,对应的覆冰厚度估计值如表 4 所示。由于所提第 1 种简化方法不需要水平档距参数,所以第 1 种简化方法的预测值没有出现在表 4 中。根据表 4,水平档距的误差对文献[1]的方法影响较小,预测误差在 0.7 mm 以内;而对所提第 2 种简化方法影响相对较大,误差在 1.5 mm 以内。根据式(17),随着水平档距 l 的增加,覆冰厚度预测值将减小,这也与表 4 的情况相吻合。

表 3 拉力传感器有误差时覆冰厚度预测比较

拉力误差/%	预测覆冰厚度/mm		
	文献[1]	简化 1	简化 2
-5	19.2	18.9	17.3
-3	19.7	19.5	17.9
0	20.5	20.3	18.7
+3	21.3	21.1	19.6
+5	21.9	21.6	20.1

表 4 水平档距有误差时覆冰厚度预测比较

水平档距误差/%	预测覆冰厚度/mm	
	文献[1]	简化 2
-10	20.7	19.2
-5	20.6	19.0
0	20.5	18.7
+5	20.5	18.5
+10	20.6	18.3

3.5 高度差有误差的情况

在第 5 种场景中,假设 $b=20$ mm 时台账提供的高度差 h 具有误差,其误差与真实值的比例从-10%到+10%,对应的覆冰厚度估计值如表 5 所示。同样,所提第 1 种简化方法的数据没有出现在表 5 中,是因为第 1 种简化方法不需要高度差参数。根据表 5,高度差误差对文献[1]的方法影响较小,预测误差在 0.6 mm 以内;而对所提第 2 种简化方法影响相对较大,误差在 1.4 mm 以内。根据式(18),随着高度差 h 的增加,覆冰厚度预测值将减小,这也与表5的情况相吻合。此外,由于高度差h相对于水平档距 l 较小,所以高度差误差对所提第 2 种简化方法造成的误差波动范围不如其他 4 种场景。

表 5 高度差有误差时覆冰厚度预测比较

高度差误差/%	预测覆冰厚度/mm	
	文献[1]	简化 2
-10	20.5	18.6
-5	20.5	18.7
0	20.5	18.7
+5	20.6	18.8
+10	20.6	18.8

4 结 论

上面基于耐张塔覆冰的静力平衡模型,提出了两种简化的等值覆冰厚度预测方法:第 1 种预测方法不需要水平档距和高度差参数,其覆冰厚度估计性能与需要这两个参数的方法基本一致;第 2 种预测方法不需要角度传感器,虽然其估计性能有所下降,但其误差在工程允许范围以内,重要的是该方法可避免角度误差造成的估计性能下降,且减小了系统的硬件成本。这两种方法均可增加基于称重法的覆冰等值厚度预测方法的实际应用性。

参考文献

[1] 蒋兴良,常恒,胡琴,等.输电线路综合荷载等值覆冰厚度预测与试验研究[J].中国电机工程学报,2013,33(10):177-183.

[2] 郝艳捧,魏发生,王斌,等.特殊地形下输电线路等值覆冰厚度计算模型有效性分析和改进研究[J].电网技术,2022,46(7):2786-2793.

[3] 阳林,郝艳捧,黎卫国,等. 架空输电线路在线监测覆冰力学计算模型[J].中国电机工程学报,2010,30(19):100-105.

[4] 曾华荣, 毛先胤, 黄欢,等. 均匀覆冰下在线监测耐张塔输电线路等值覆冰计算模型验证研究[J]. 电力大数据, 2021, 24(9): 33-39.

[5] 甘艳, 杜志叶, 周文峰,等. 基于覆冰拉力监测系统的耐张塔线路等值冰厚计算模型[J]. 电测与仪表, 2021,58(5): 39-45.

[6] 吴天宝, 马小敏, 唐军,等. 基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法[J]. 四川电力技术, 2022, 45(5):20-25.

[7] 姚陈果,张磊,李成祥,等.基于力学分析和弧垂测量的导线覆冰厚度测量方法[J].高电压技术,2013,39(5):1204-1209.

[8] 黄文焘,邰能灵,范春菊.基于杆塔结构力学测量的线路覆冰在线监测系统研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(24):71-75.

[9] 张松海, 施心陵, 李鹏,等. 基于动态拉力与倾角的输电线路覆冰过程辨识与建模[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9):57-61.

(下转第 42 页)

基于关联规则和证据理论的输电线路水土流失地质灾害风险评估

白剑锋[1,2],高　峰[1,2],吴　振[1,2]
(1.长沙电力职业技术学院,湖南 长沙　410131;2.国网湖南省电力有限公司技术技能培训中心,湖南 长沙　410131)

摘　要:为了及时发现输电线路潜在的地质灾害隐患,提出了架空输电线路水土流失地质灾害风险评估方法。首先,结合架空输电线路环境特征、气象数据和巡线相关数据,利用关联规则量化环境特征与水土流失灾害的关联关系,基于证据理论以坡度、坡向、坡位、海拔等特征因子为证据体计算水土流失灾害基本信度;然后,结合雨温联合致灾风险概率分布函数,构建了架空线路水土流失灾害风险概率计算模型。以某 500 kV 线路为例,分析了该评估模型的详细计算流程,划分了输电线路水土流失灾害风险等级,提出了差异化的地质灾害风险防范措施。该方法能有效评估架空输电线路的水土流失灾害风险,为线路的智能化运维管理提供理论支持。

关键词:水土流失; 架空输电线路; 地质灾害; 风险评估
中图分类号:TM 726　**文献标志码**:A　**文章编号**:1003-6954(2024)01-0015-07
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240103

Geological Hazard Risk Assessment of Soil and Water Loss for Transmission Lines Based on Association Rules and Evidence Theory

BAI Jianfeng[1,2], GAO Feng[1,2], WU Zhen[1,2]
(1.Changsha Electric Power Technical College, Changsha 410131, Hunan, China; 2. State Grid Hunan Technical Skills Training Center, Changsha 410131, Hunan, China)

Abstract: In order to promptly identify potential geological hazards of transmission lines, a method to assess the risk of soil erosion disasters on overhead transmission lines is proposed. Combined with the environmental characteristics, meteorological data and patrol related data of overhead transmission lines, the correlation between environmental characteristics and soil erosion disasters is quantified by association rules. Based on evidence theory, the basic reliability of soil erosion disasters is calculated using characteristic factors such as slope, aspect, position and altitude as evidence bodies. A probability calculation model for soil erosion disaster risk of overhead lines is constructed using the joint probability distribution function of rain and temperature disaster risk. Taking a 500 kV transmission line for example, the detailed calculation process of the evaluation model is analyzed, the risk levels of soil erosion disasters for the transmission line are divided, and the differentiated geological disaster risk prevention measures are proposed. This proposed method can effectively evaluate the risk of soil erosion disasters for overhead transmission lines, and provide theoretical support for the intelligent operation and maintenance management of the lines.

Key words: soil and water loss; overhead transmission line; geological hazards; risk assessment

0　引　言

随着中国经济的快速发展,电网可靠性要求逐步提高,架空输电线路作为电力网络中的“生命线”,承受着高温、暴雨等的影响,容易发生水土流失地质灾害[1]。输电线路水土流失是指杆塔基础在水力、重力等作用下,水土资源的破坏和损失,包括基础附近的土地表层侵蚀和水土损失等。相关数据表明,输电线路水土流失是最为常见的地质隐患,

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(21C1551);国网湖南省电力有限公司科技项目(5216AP230001)

一旦任其发展将会形成滑坡、泥石流等灾害,造成巨大的经济损失,产生严重的社会负面影响[2]。为了及时发现输电线路地质灾害隐患,做到防患于未然,电网公司每年都会通过无人机巡线、人工巡线、卫星灾害数据分析等开展输电线路沿线的水土流失地质灾害隐患点排查工作,存在着工作基数大、覆盖面广、历时长、效率低、巡线难等难题[3]。

目前对于输电线路水土流失的地质灾害风险评估,主要集中在巡线、数据分析、在线监测等方面。在巡线评估上,文献[4]以沿线涉及黄土丘陵地貌、山地地貌和平原地貌的±800 kV 特高压输电线路工程为例,通过野外调查和测钎法监测水土流失,对其水土流失特征、强度及其治理体系进行探讨;文献[5]采用资料收集分析与工程现场查勘相结合的方法,探讨输电线路工程水土流失特征及其影响因子的关系。在数据分析上,文献[6]通过采集遥感影像,计算植被指数、坡度因子、水体指数、裸土指数等水土流失影响因子,构建了基于 ArcGIS 的水土流失动态分析模型;文献[7]以湖泊水文网格分析模型为基础,利用支持向量机(support vector machine, SVM)方法构建水土流失预测模型;文献[8]结合几何图元法、纹理可视化方法,进行区域水土流失特征的遥感特征检测和区域信息重组,提取地理矢量场复合信息熵,通过遥感影像图像分析,实现区域水土流失特征识别。在在线监测上,文献[9]通过水土流失动态监测数据及监测站点长时序观测数据,分析了水土流失的时空变化特征,构建了基于 RUSLE 模型的水土流失定量评价方法;文献[10]提出了一种以气象站监测数据为基础的输电线路水土流失监测方法,并实际应用于陕西—湖北±800 kV 特高压直流输电工程,效果显著。

有鉴于此,下面结合电网公司积累的输电线路基本台账数据、水土流失地质灾害记录、输电线路所处的微地形及气象数据等,采用关联分析方法获取地质灾害风险因子值,并结合数据融合方法有效融合各个关联因子来评估输电线路的水土流失风险,为输电线路水土流失地质灾害隐患的排查提供参考。

1 理论基础

1.1 水土流失与特征因子的关联规则量化方法

相关研究表明输电线路水土流失主要与地势、地貌等因素相关。所提方法评估分析海拔高度、坡度、坡向、坡位、河网密度、下垫面类型、地表类型、河网密度等相关因素的影响,采用关联规则量化不同因素与输电线路水土流失风险的关联关系。

关联规则量化是为了寻找不同事务项集之间的关联关系,常用支持度和置信度来表示,支持度越小,偶然性越大;置信度越大,依赖度越大。这里采用置信度来量化不同特征因子与输电线路水土流失地质灾害的关联关系,置信度越高即该属性特征的杆塔单元发生水土流失的可能性越高。

记 U 为关联规则的前项,表示线路杆塔单元的属性特征;V 为关联规则的后项,表示线路杆塔单元是否发生水土流失,1 为是,0 为否。先计算事务 $U_{j.k}\rightarrow V_1$ 的支持度,计为 $S(U_{j.k}\rightarrow V_1)$,表示第 j 个特征因子的第 k 类别或区间属性特征对此类杆塔单元发生水土流失灾害的支持度[11-12]。

$$S(U_{j.k}\rightarrow V_1)=\frac{\sigma(U_{j.k}\cup V_1)}{|T|}\times 100\% \tag{1}$$

用 $g_{j.k}$ 表示第 j 个特征因子的第 k 类别或区间属性特征与地质灾害事故的关联关系,用置信度来表示即有[11-13]

$$\begin{cases} C(U_{j.k}\rightarrow V_1)=\dfrac{S(U_{j.k}\rightarrow V_1)}{S(U_{j.k})}=\dfrac{\sigma(U_{j.k}\cup V_1)/|T|}{\sigma(U_{j.k})/|T|} \\ g_{j.k}=C(U_{j.k}\rightarrow V_1) \end{cases} \tag{2}$$

式中:$\sigma(U_{j.k})$ 为第 j 个因子第 k 类别或区间的总杆塔单元数量;$\sigma(U_{j.k}\cup V_1)$ 为第 j 个因子第 k 类别或区间发生过地质灾害事故的总杆塔单元数量;$C(U_{j.k}\rightarrow V_1)$ 表示地质灾害事故杆塔单元落在相应特征属性(第 j 个特征因子第 k 类别)区内的概率。

1.2 水土流失灾害风险确信度

1)水土流失基本信度分配函数的确定

在复杂的环境下,输电线路的水土流失影响因素相对较多,且在评估的过程中所采集的数据具有不确定性、精确性不足、信息不完备等问题。证据理论是一种不确定性推理的数学方法。通过引入信任函数,对各指标下不同目标的信息进行融合,从而有效地判别不确定性、不完全及主观不确定信息的各类问题[14-17]。

对于待评估电网拥有 m 基输电杆塔单元,那么可知识别框架集合为 $\Theta=\{T^1,\ T^2\cdots\ T^m\}$,基本

信度分配函数 m: $2^{\Theta}\to[0,1]$,满足 $m(\varnothing)=0$ 且 $\sum_{A\subseteq\Theta}m(A)=1$。若 m_j 表示以第 j 特征因子为证据体的基本信度分配函数,那么 $m_j(T^i)$ 表示在第 j 个特征因子为证据体下,T^i 杆塔单元发生水土流失地质灾害的基本信度。$m_j(T^i)$ 计算方法如下:

①若第 i 个杆塔单元处于第 j 个特征因子的第 k 类别或区间,其发生水土流失地质灾害风险的可能性表示为 $g_{j.k}^i=g_{j.k}$,简记作 g_j^i。那么可得 n 个特征因子指标、m 基杆塔的架空线路地质灾害风险关联矩阵为 $\boldsymbol{G}=(g_j^i)_{m\times n}$,归一化为

$$\boldsymbol{Y}=(y_j^i)_{m\times n}=(g_j^i\Big/\sum_{i=1}^{m}g_j^i)_{m\times n} \tag{3}$$

②在第 j 个特征因子为证据体下,T^i 杆塔单元发生地质灾害风险的基本信度值 $m_j(T^i)$ 计算公式[16]为

$$\begin{cases}D_{OI}(u_j)=\dfrac{1}{m}\left|\sum_{i=1}^{m}(y_j^i)^q\right|^{1/q}\\ m_j(T^i)=[1-D_{OI}(u_j)]\cdot y_j^i\end{cases} \tag{4}$$

式中,$D_{OI}(u_j)$ 为指标 j 下的 q 阶不确定信度,一般取 $q=2$。

若以 T^{Θ} 表征整个计算中的不确定性,那么表征以第 j 个特征因子为证据体的基本信度值 $m_i(T^{\Theta})$,表示为不能辨识哪一个杆塔单元发生水土流失地质灾害,其计算公式为

$$m_j(T^{\Theta})=1-\sum_{i=1}^{m}m_j^i \tag{5}$$

③通过上述分析可得,对于待评估电网若有 m 基输电杆塔、n 个特征指标,可得基本信度矩阵为

$$\boldsymbol{T}_{m\times n}=\begin{bmatrix}m_1(T^1) & m_2(T^1) & \cdots & m_j(T^1) & \cdots & m_n(T^1)\\ m_1(T^2) & m_2(T^2) & \cdots & m_j(T^2) & \cdots & m_n(T^2)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots\\ m_1(T^i) & m_2(T^i) & \cdots & m_j(T^i) & \cdots & m_n(T^i)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots\\ m_1(T^m) & m_2(T^m) & \cdots & m_j(T^m) & \cdots & m_n(T^m)\end{bmatrix} \tag{6}$$

2)孕灾环境基本信度分配函数的融合

在证据理论体系中,以坡度、坡向、坡位、海拔等特征因子为证据体,以各个杆塔单元作为识别体,通过 Dempster 合成规则,依据证据体的基本信度分配函数即可计算在该证据体下各杆塔单元发生水土流失地质灾害的确信度[17-21]。若以信任函数 $B_{el}(T^i)$ 表示确信第 i 杆塔单元发生水土流失地质灾害的最小值,即为 T^i 发生地质灾害事故的确信度,则在同一个识别框架之下,利用多个特征因子的基本信度分配函数 $m_1,m_2,\cdots,m_j,\cdots,m_n$,采用 Dempster 合成规则即可融合成 $B_{el}(T^i)$,其计算式[20-21]为

$$B_{el}(T^i)=(m_1\oplus m_2\oplus\cdots m_j\cdots\oplus m_n)(T^i)=\frac{\sum_{T_1\cap T_2\cap\cdots\cap T_n=T^i}m_1(T_1)\cdot m_2(T_2)\cdots m_j(T_j)\cdots m_n(T_n)}{\sum_{T_1\cap T_2\cap\cdots\cap T_n\neq\varnothing}m_1(T_1)\cdot m_2(T_2)\cdots m_j(T_j)\cdots m_n(T_n)} \tag{7}$$

式中:T_j 为焦元,有 $\forall T_j\subseteq\Theta$ 成立,表示在以第 j 个特征因子为证据体下,T_j 可以是识别框架幂集(A_1, $A_2\cdots A_h$, $h=2^m$)中的任意一个;若 $T_j=\{T^1, T^2\}$,那么有 $m_j(T_j)=m_j(T^1)+m_j(T^2)$ 成立。式(7)满足 $B_{el}(T^1)+B_{el}(T^2)+\cdots B_{el}(T^i)\cdots+B_{el}(T^m)+B_{el}(T^{\Theta})=1$,其中 $B_{el}(T^{\Theta})$ 反映整个计算中的不确定性程度。

1.3　致灾风险的雨温联合概率分布函数

输电线路地质灾害的发生与所处地区的微气象关系密切,其中降水量和温度是影响地质灾害发生的强关联因素,因此通过风雨联合分布规律,才能反映地质灾害发生的时空关联特征。假定杆塔所处地区最近微气象站月累积降水量为 R_a(单位:mm),月平均气温为 T_{em}(单位:℃)。参考式(2)的计算,可以得到不同属性下的置信度,分别计为 $f_s(R_a)$, $f_w(T_{em})$。那么第 i 个杆塔基础在该环境下的地质灾害风险雨温联合概率为 $F_i(R_a,T_{em})$,计算式为

$$F_i(R_a,T_{em})=1-[1-f_s(R_a)]\times[1-f_w(T_{em})] \tag{8}$$

式中:$f_s(R_a)$ 表示在降水量为 R_a 所在属性段的地质灾害风险发生置信度;$f_w(T_{em})$ 表示在气温为 T_{em} 所在属性段的地质灾害风险发生置信度。

1.4　地质灾害风险值的映射关系

通过上述理论推导,若一个电网识别框架由 m 个杆塔单元组成,证据体由 n 个特征因子组成,那么可以计算得到 $B_{el}(T^1)$, $B_{el}(T^2)$ $\cdots$ $B_{el}(T^i)$ $\cdots$ $B_{el}(T^m)$,$B_{el}(T^{\Theta})$ 共计 $m+1$ 个地质灾害孕灾风险确信值,以及处在特定降水量和气温下的 $F_1,F_2,\cdots F_i,\cdots F_m$ 共计 m 个地质灾害风险发生概率。

若在该电网中存在一回架空输电线有 M 个计算杆塔单元,以月为单位每个杆塔基础每年有 12 个

地质灾害风险发生概率值。假定每月每个杆塔从基础发生地质灾害风险的概率为 P_i(单位:次/月),而从上述分析可知 $B_{el}(T^i)$ 表示地质灾害的确信值,其值越大,地质灾害事故率越大。$F_i(R_a, T_{em})$ 为地质灾害风险雨温联合发生概率,其值越大,地质灾害事故率越大。则近似认为 P_i 与 $B_{el}(T^i)$、$F_i(R_a, T_{em})$ 符合一次函数关系,P_i 与孕灾环境的确信度和地质灾害风险雨温联合发生概率计算式为

$$P_i = K \cdot B_{el}(T_i) \cdot F_i(R_a, T_{em}) + C \tag{9}$$

式中:K 为概率修正系数;C 为概率修正常数,两者的计算方法可以参考文献[11]附录部分。

2 架空线路地质灾害风险的划分

根据架空线路地质灾害发生的可能性将其划分为 5 个等级。利用式(9),可计算得到每一个杆塔基础发生水土流失地质灾害的风险,其含义为该输电杆塔基础在评估月份出现地质灾害隐患风险的概率。若 P_a 为所有架空输电线路发生水土流失地质灾害风险的平均值,该值可以通过历史地质灾害隐患数据获得,其计算式为

$$P_a = \frac{N_Y}{12 \cdot Y} \tag{10}$$

式中,N_Y 为 Y 年累积发现的架空线路地质灾害风险次数。

这里采用架空线路地质灾害发生概率来表征地质灾害风险等级,由于划分定级标准与相应样本总量和具体风险状况相关,参考文献[22]的风险分级方法,确定水土流失风险分级,如表 1 所示。结合输电线路水土流失地质灾害风险等级,即可采取对应的防范措施。

3 架空线路地质灾害风险评估流程

架空输电线路地质灾害风险评估流程如图 1 所示,主要包括获取评测数据、量化关联规则、构建水土流失地质灾害关联度矩阵、计算水土流失地质灾害风险确信度、计算水土流失地质灾害风险雨温联合概率、计算水土流失地质灾害风险发生概率、确定线路水土流失地质灾害等级共 7 个步骤。

1)获取待评估电网的地理环境特征数据和气象环境数据,地理环境特征数据主要包含海拔高度、坡度、坡向、坡位、下垫面类型、地表类型和河网密度数据;气象环境数据主要是月度平均气温、月度降雨量。

2)通过架空输电线路历史地质灾害风险数据的关联性分析,以置信度作为关联规则,利用式(2)量化线路所处环境的特征因子和气象特征因子与输电线路水土流失地质灾害的关联关系,构建由置信

表 1 架空线路地质灾害风险定级

判定方法	灾害风险(10^4 次/月)	风险等级	风险含义	防范措施
$P_i > 1.5P_a$	[6.78,∞)	I	出现地质灾害隐患风险极高	加强巡视,密切关注,做好启动相应地质灾害风险防范的措施
$P_a < P_i < 1.5P_a$	[4.52,6.78)	II	出现地质灾害隐患风险较高	注意关注,必要时开展线路巡视工作
$0.75P_a < P_i < P_a$	[3.39,4.52)	III	出现地质灾害隐患风险一般	正常开展架空线路巡视时,需注意地质灾害情况
$0.5P_a < P_i < 0.75P_a$	[2.26,3.39)	IV	出现地质灾害隐患风险较低	按照正常线路巡视工作进行
$P_i < 0.5P_a$	[0,2.26)	V	出现地质灾害隐患可能极低	无

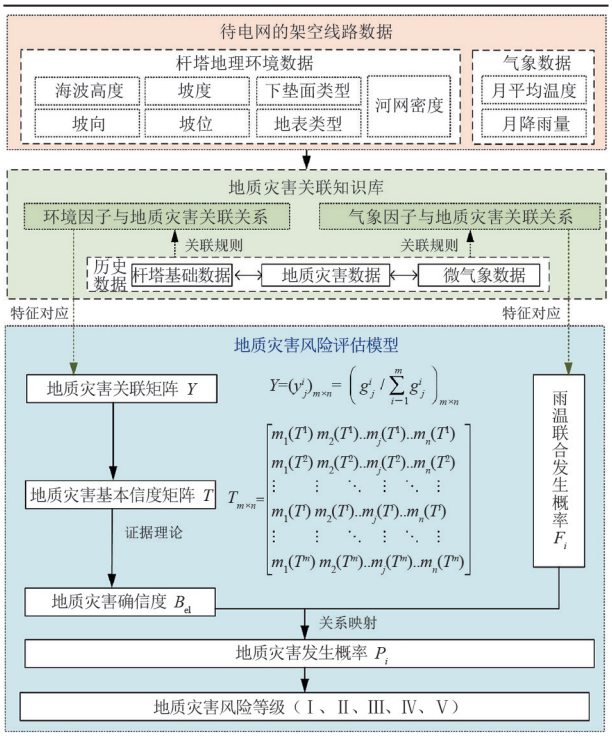


图 1 地质灾害风险评估流程

度组成的关联规则量化表。

3)结合输电线路的的环境特征,依据关联规则量化表获取特征属性对应的置信度,得到不同杆塔单元的各特征因子水土流失地质灾害关联度值,构建水土流失地质灾害关联度矩阵 $\boldsymbol{G}=(g_j^i)_{m\times n}$,结合式(3)即可得到架空输电线路地质灾害风险关联矩阵为 $\boldsymbol{Y}=(y_j^i)_{m\times n}$。

4)通过证据理论融合以不同特征因子为证据体的基本信度分配值,利用式(4)计算各级杆塔单元的水土流失地质灾害风险确信度 $\boldsymbol{T}_{m\times n}$。采用 Dempster 合成规则,结合式(7)即可计算在该证据体下各杆塔单元发生水土流失地质灾害的确信度 $B_{\mathrm{el}}(T^i)$。

5)依据式(8),结合月累积降水量和平均气温,即可得到水土流失地质灾害风险雨温联合概率 F_i。

6)依据式(9),利用水土流失地质灾害风险雨温联合概率和风险确信度,结合映射关系即可得到水土流失地质灾害风险发生概率 P_i。

7)依据架空线路地质灾害风险定级方法,将线路地质灾害风险划分为 5 级,结合计算所得水土流失地质灾害风险值,确定线路水土流失地质灾害等级,从而采取相应的防范措施。

4　实例分析

4.1　水土流失地质灾害关联规则量化

1)研究样本分析

以某电网的 500 kV CMJ 线为研究对象,该线于 2013 年投产,沿线经过山地、丘陵等地区,共有输电铁塔 138 基,总长度为 63.9 km。主要数据包含地质灾害线路、相应杆塔编号、电压等级、巡线时间、查线情况等信息。地理环境参数主要包含河网密度、坡度、坡位、海拔高度、坡向、下垫面类型、地表类型 7 项数据。气象信息主要包含降雨量、温度等信息。

2)关联规则量化

通过该地区架空输电线路历史地质灾害风险数据的关联性分析,以置信度作为关联规则,利用式(2)量化线路所处环境的特征因子和气象特征因子与线路地质灾害事故的关联关系,即可构建由置信度组成的关联规则量化表[23],如表2所示。在实际运用中连续特征因子的属性划分方式等将会一定程度地影响置信度的分布,可能带来难以解释的情况,但随着样本数量的累积,相信置信度的分布将会更加趋向于实际。

表 2　水土流失地质灾害关联规则量化

特征因子	特征属性	置信度/%
海拔高度 H/m	$\leqslant 0$	0.407
	$0<H\leqslant 50$	0.143
	$50<H\leqslant 100$	2.885
	$100<H\leqslant 150$	7.433
	$150<H\leqslant 200$	6.202
	$200<H\leqslant 250$	8.032
	$H>250$	4.598
坡度 θ/(°)	$0<\theta\leqslant 5$	0.434
	$5<\theta\leqslant 10$	3.533
	$10<\theta\leqslant 15$	4.108
	$15<\theta\leqslant 20$	3.531
	$20<\theta\leqslant 25$	2.128
	$\theta>25$	1.087
坡向	正北	1.739
	东北	2.481
	正东	3.953
	东南	6.934
	正南	6.723
	西南	3.254
	正西	1.916
	西北	1.447
	平地	0.434
坡位	山脊	1.425
	山上	1.917
	山腰	1.469
	平地	0.794
	山下	0.775
下垫面类型	水稻土、湖泊	0.130
	赤红壤	2.613
	红壤、滨海盐土	0.645
	潮土、滨海风沙土	1.591
	石灰土	0
	石质土	0
地表类型	水田	1.546
	旱地	3.955
	有林地	0.943
	灌木林	0.990
	疏林地	1.639
	其他林地	0.283
	高覆盖度草地	2.548
	河渠	1.212
	水库坑塘	0.602
	城镇用地	0.159
	农村居民点	0.587
	其他建设用地	1.172
河网密度 ρ	$0\leqslant\rho<0.2$	1.209
	$0.2\leqslant\rho<0.4$	1.171
	$0.4\leqslant\rho<0.6$	0.714
	$0.6\leqslant\rho<0.8$	0.571
	$\rho\geqslant 0.8$	0

4.2 水土流失地质灾害风险评估流程

1)水土流失地质灾害关联度矩阵

结合输电线路的的环境特征,依据关联规则量化表获取特征属性对应的置信度,得到不同杆塔单元的各特征因子的水土流失地质灾害关联度值,构建水土流失地质灾害关联度矩阵。结合电网架空输电线路所有的杆塔计算单元,以杆塔单元属性特征匹配关联规则量化表即可得到水土流失灾害风险的关联度矩阵 $\boldsymbol{G}$。结合式(3)即可得到归一化的矩阵 $\boldsymbol{Y}$。

2)水土流失地质灾害风险确信度

利用式(4)、式(5)和式(6)确定各杆塔基础在以 7 个特征因子为证据体下的地质灾害风险基本信度分配值,可得到水土流失地质灾害基本概率分配信度值矩阵 $\boldsymbol{T}$。通过证据理论融合以不同特征因子为证据体的基本信度分配值,利用式(7)计算各级杆塔单元的水土流失地质灾害风险确信度。

3)雨温联合概率分布

基于 500 kV CMJ 线各基杆塔所处位置的经纬度,判别其与微气象站的位置关系,选择距离最近的气象站作为杆塔基础的微气象数据(月累积降水量为 R_a,月平均气温为 T_{em})。通过特征对应,结合式(8)得到每个杆塔基础的地质灾害风险雨温联合发生概率 $F_i(R_a,T_{em})$。

4)地质灾害风险值的映射关系

待评估线路 500 kV CMJ 线共有 138 个计算杆塔单元,结合式(9)即可得到地质灾害风险的概率位 P_i,通过历史数据计算得到 $K=68.3$、$C=0.000\ 012$。结合表 1 即可得到架空线路地质灾害风险等级。

4.3 评估结果的运用

以 2021 年 7 月的气象数据为例,可以得到 500 kV CMJ 线 7 月份历史地质灾害发生概率,如图 2 所示。由图可知 500 kV CMJ 线 7 月份水土流失风险主要集中在 15~20 号、57~60 号、68~75 号、82 号、112~118 号等杆塔。其中 82 号杆风险值最大为 0.009 75,属于 I 级风险区,出现地质灾害隐患风险极高,应该加强巡视,密切关注,做好启动相应地质灾害风险防范措施的准备。

图 3 为 500 kV CMJ 线水土流失发生概率的时空分布。结合图 3 可知输电线路杆塔 21~41 号、83~111号属于水土流失的低风险区(V级),全年

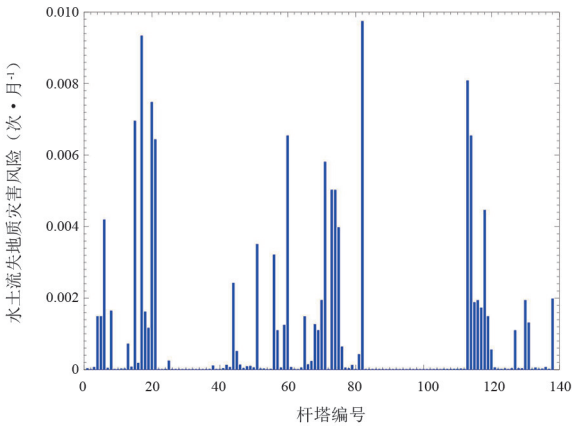


图 2 500 kV CMJ 线 7 月份地质灾害发生概率分布

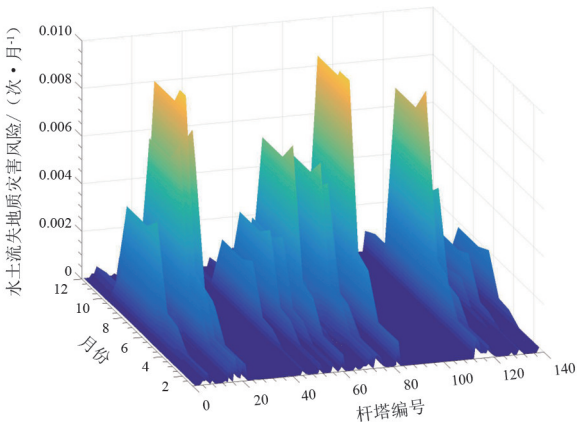


图 3 500 kV CMJ 线水土流失时空分布概率

该区域出现水土流失隐患的可能性极低;输电线路杆塔 16~21 号、56~61 号、70~75 号、82 号、113~120 号等,在 6~10 月份发生水土流失的可能性最大,属于极高风险区(I 级)。因此在这段时间内要重点加强对该处线路的水土流失风险防控,加强巡视管理,做好杆塔基础护坡的防护工作。

对于水土流失高风险区的输电线路基础,如果是属于土壤疏松易于流失土质的类型,可以采用混凝土加固坡面、增加植被等方式;对于降雨流水量大的输电线路基础,可以依照坡面降雨产汇流过程和原理,合理设计排水沟。

5 结 语

水土流失是输电线路常见的地质灾害,为了实现输电线路水土流失地质灾害风险评估,上面结合输电线路水土流失历史数据、环境特征数据、气象数据等开展了输电线路水土流失地质灾害风险评估研究,具体结论如下:

1)提出了输电线路水土流失地质灾害风险评估模型。该模型以置信度量化水土流失与环境特征因子的关联关系,采用证据理论融合不同特征因子为证据体的基本信度值,结合雨温联合发生概率函数,通过映射函数关系得到水土流失发生概率,并以风险定级表划分水土流失风险。

2)确立了输电线路水土流失地质灾害风险评估流程。该流程主要分为获取评测数据、量化关联规则、构建水土流失地质灾害关联度矩阵、计算水土流失地质灾害风险确信度、计算水土流失地质灾害风险雨温联合概率、计算水土流失地质灾害风险发生概率、确定线路水土流失地质灾害等级共 7 部分。

3)以 500 kV CMJ 线为例详细分析了输电线路水土流失地质灾害风险评估流程,划分了灾害风险等级,说明了水土流程评估结果的具体运用。该方法能够有效开展输电线路水土流失灾害风险评估,为输电线路的差异化运检提供理论参考。

参考文献

[1] 白剑锋. 基于大数据分析的输电线路状态评估和故障预测研究[D].广州:华南理工大学,2019.

[2] 黄伟. 三峡库区输电线路地质灾害处置技术研究[D]. 宜昌:三峡大学,2018.

[3] 刘书豪. 降雨条件下的输电线路滑坡风险评估与预警技术研究[D].武汉:中国地质大学,2021.

[4] 潘明九,丰佳,王文龙,等. 陕北—湖北±800 kV 输电线路工程水土流失特征及其综合治理[J]. 水土保持研究,2022,29(5): 206-212.

[5] 冯华,王文龙,丰佳,等. 长距离输变电线路水土流失特征及其影响因子:以新疆山丘区为例[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(S2):440-445.

[6] 连燕. 基于 ArcGIS 的河道水土流失动态监测方法[J]. 水利科技与经济,2022,28(9): 94-99.

[7] 王霄,齐春舫,王亚妮,等. 基于水动力模型数据样本的水土流失预测分析[J]. 人民黄河,2022,44(S1): 75-76.

[8] 崔萌.基于遥感影像的区域水土流失特征识别模型[J]. 水利科技与经济,2022,28(6):69-73.

[9] 田培,王哲,喻海军,等. 鄂西北山丘区水土流失时空格局及影响因子定量评价[J]. 水土保持研究,2023,30(3):76-85.

[10] 雷磊,王良,吴健,等. 基于气象站监测数据的特高压输变电工程水土流失监测[J]. 技术与市场,2022,29(6):1-6.

[11] 谢从珍,白剑锋,王红斌,等. 基于多维关联信息融合的架空输电线路雷害风险评估方法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(21): 6233-6244.

[12] 严英杰,盛戈皞,陈玉峰,等.基于关联规则和主成分分析的输电线路状态评价关键参数体系构建[J].高电压技术,2015,41(7):2308-2314.

[13] 胡军,尹立群,李振,等.基于大数据挖掘技术的输变电设备故障诊断方法[J].高电压技术,2017,43(11): 3690-3697.

[14] 杨飞,白冰,郭磊,等. 基于证据理论的混凝土桥梁耐久性状况评定方法[J].公路交通科技,2022,39(11): 76-83.

[15] 徐德一,王潇,赵兴华,等. 基于证据理论的航空发动机状态评估[J]. 沈阳航空航天大学学报,2022,39(4):60-68.

[16] 李特,冯琦,张堃. 基于熵权灰色关联和 D-S 证据理论的威胁评估[J]. 计算机应用研究,2013,30(2): 380-382.

[17] 徐卫亚,胡业凡,吴伟伟,等. 基于云模型和 D-S 证据理论的多源信息融合滑坡安全性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1): 59-66.

[18] 张宽,吐松江·卡日,高文胜,等.基于云模型和改进 D-S 证据理论的变压器故障诊断[J].高压电器,2022,58(4): 196-204.

[19] 魏曙寰,曾强,陈砚桥. 基于 AHP/D-S 证据理论的贝叶斯网络参数学习方法[J]. 海军工程大学学报,2021,33(6): 19-24.

[20] 洪天炘,刘宇舜,严波,等. 基于改进 Dempster-Shafer 证据理论的输电线路等值覆冰厚度计算方法[J]. 自动化与仪器仪表,2021(8):126-130.

[21] 袁存波,田亮. 基于改进证据理论的中速磨煤机故障诊断[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(6):84-91.

[22] 王一枫,汤伟,刘路登,等.电网运行风险评估与定级 体系的构建及应用[J].电力系统自动化,2015,39(8):141-148.

[23] 白剑锋. 基于大数据分析的输电线路地质灾害风险评估研究[R]. 湖南:国网湖南省电力有限公司技术技能培训中心,2022.

作者简介:

白剑锋(1992),男,硕士研究生,讲师,主要研究输变电设备状态评估和故障预测。

(收稿日期:2023-09-27)

考虑预测不确定性的微电网实时控制策略研究

李龙胜[1],冯文韬[1],潘可佳[1],郑言蹊[1],邓冰妍[1],景致远[2]
(1. 国网四川省电力公司信息通信公司,四川 成都 610041;
2. 电子科技大学机械与电气工程学院,四川 成都 611731)

摘 要:风能、光伏等可再生能源的高比例并网成为了缓解全球能源危机的一项重要措施。然而,可再生能源实时出力中的间歇性和波动性给系统的安全性带来了一定的挑战。为了在提高可再生能源利用率的同时保证系统安全性,提出了一种基于深度强化学习(DRL)算法的运行优化实时调度模型。首先,构建了负荷预测模型实现负荷预测和高斯混合模型拟合预测误差;其次,考虑系统各节点的约束条件,以系统运行成本和安全运行作为优化目标,建立相应优化模型;然后,将优化问题转化为马尔可夫决策过程,并采用双延迟深度确定性策略梯度算法求解;最后,利用DRL 算法的环境交互机制和策略自由探索,获得联合调度策略的最优结果。实验结果表明,所提方法具有良好的适应性,并且可以进行在线实时调度。

关键词:预测不确定性; 深度强化学习; 实时控制
中图分类号:TM 734 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2024)01-0022-06
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240104

Real-time Control Strategy for Microgrid with Prediction Uncertainty

LI Longsheng[1], FENG Wentao[1], PAN Kejia[1], ZHENG Yanxi[1], DENG Bingyan[1], JING Zhiyuan[2]
(1. State Grid Sichuan Information and Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: The high-ratio of renewable energy sources such as wind and PV integrated with power grid has emerged as an essential initiative to mitigate global energy crisis. However, the intermittent and volatility of renewable energy sources present certain challenges to the reliability of the system. A real-time scheduling model for operation optimization based on deep reinforcement learning (DRL) algorithm is introduced to enhance the utilization of renewable energy while guaranteeing system security. Firstly, a load forecasting model is constructed to achieve load forecasting and Gaussian mixture model which is applied to fit forecasting errors. Secondly, considering the constraints of each node of the system, taking system operating cost and safe operation as optimization target, the appropriate optimization model is formulated. And then, the optimization issue is converted into a Markov decision process and addressed by the twin delayed deep deterministic policy gradient (TD3) algorithm. Finally, the optimal joint scheduling strategy is acquired by environment interactive mechanism and policy discretionary exploration of DRL algorithm. The experimental results demonstrate that the proposed method has excellent adaptability and allows for online real-time scheduling.

Key words: forecast uncertainty; deep reinforcement learning; real-time control

0 引 言

在过去的十年里,随着环境问题日益严重,智能电网的技术突飞猛进,可再生能源在全球能源系统中占据了越来越重要的地位[1]。微电网中采用不同类型的分布式发电设备和储能装置来提升新能源的消纳比例[2-3]。然而,可再生能源的高度间歇性和不确定性对微电网的经济性和可靠性提出了重大挑战。

如何选择一个良好的优化控制策略成为了当前

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(B7194723R001)

微电网运行优化研究的主流。文献[4]构建了一个包含风光储柴在内的多目标微电网优化模型,采用改进粒子群算法在运营成本和可再生能源消纳二者之间获得了最优的策略。文献[5]建立了考虑微电网之间信息交互的双层优化模型,以实现可再生能源的消纳与节点电压之间的平衡。文献[6]提出了一种基于近似动态规划的算法,将微电网运行优化问题转化为随机混合整数非线性规划问题。文献[7]应用了基于有限时间一致性的分布式优化算法来进行网络经济调度优化。文献[8]建立了一个能源管理系统,利用多个储能装置最大程度吸收可再生能源。文献[9]将可再生能源出力、电价和电力负荷设置为随机变量,并使用基于近似动态规划的经济调度算法减少了源荷预测不确定性对系统运行的影响。然而,这些方法在求解过程中未充分挖掘历史数据中的潜在信息,面对新问题时不仅需要重新训练且训练时间过长。

随着人工智能的崛起,基于数据驱动的强化学习(reinforcement learning, RL)可以通过历史数据获得经验从而实现在线优化[10-11]。文献[12]提出了一种基于深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)的分布式能源运行优化模型,基于历史数据训练学习后可实时获取各设备实时控制策略。文献[13]针对多种可再生能源并入的特定微电网网络构建了对应的优化模型。文献[14]考虑到混合动力汽车电池寿命,提出了一种基于深度 Q 网络(deep Q-network, DQN)算法的行驶模式自适应策略。然而,上述方法在面对连续控制问题存在一定的局限性。

针对上述问题,下面提出一种基于负荷预测辅助的双延迟深度确定性策略梯度(twin delayed deep deterministic policy gradient, TD3)算法的微电网优化策略,主要包括:

1)提出一种同时考虑微电网经济性和安全性的负荷预测辅助多目标优化控制策略;

2)通过引入电池储能(battery energy storage, BES)元件提升微电网消纳可再生能源的比例;

3)所提方法通过历史训练数据离线训练后可以做出实时决策。

1　问题建模

微电网的具体框架结构如图 1 所示,主要包括了主网、风力发电站、光伏发电站、电池储能站及用电负荷。

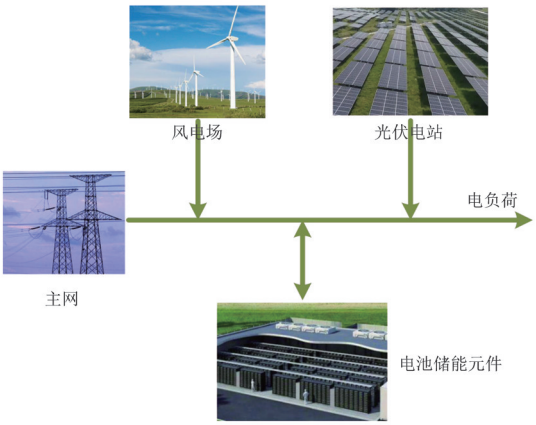


图 1　微电网框架结构

1.1　优化模型

所提方法通过控制电池储能、风力发电站和光伏发电站三者的相关出力,保证系统运行安全的同时实现日运营成本最低。

优化目标函数为:

$$F = \min \sum_{t=1}^{24} C_{\mathrm{gird},t} \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{gird},t} = p_t \cdot L_t \tag{2}$$

式中:F 为日运营成本;$C_{\mathrm{gird},t}$ 为时刻 t 的运营成本;p_t 为时刻 t 的电价;L_t 为时刻 t 时微电网所需电量。

电池储能的容量越限惩罚和电压越限惩罚的表达式为:

$$C_{v,t} = \begin{cases} \eta & V_{i,t} \leqslant V_{\min} \text{ or } V_{i,t} > V_{\max} \\ 0 & V_{\min} \leqslant V_{i,t} \leqslant V_{\max} \end{cases} \tag{3}$$

$$C_{\mathrm{BES},t} = \begin{cases} \chi & S_{\mathrm{oc},t} < S_{\mathrm{oc,min}} \text{ or } S_{\mathrm{oc},t} > S_{\mathrm{oc,max}} \\ 0 & S_{\mathrm{oc,min}} \leqslant S_{\mathrm{oc},t} \leqslant S_{\mathrm{oc,max}} \end{cases} \tag{4}$$

式中:$C_{v,t}$ 为时刻 t 的电压惩罚成本;η 为一个惩罚常数,根据实际情况进行设定;$V_{i,t}$ 为时刻 t 节点 i 的电压值;$V_{\min}$ 为电压阈值最小值;$V_{\max}$ 为电压阈值最大值;$C_{\mathrm{BES},t}$ 为时刻 t 电池储能的惩罚值;χ 为一个常数;$S_{\mathrm{oc},t}$ 为时刻 t 电池储能的容量值;$S_{\mathrm{oc,min}}$ 和 $S_{\mathrm{oc,max}}$ 分别为电池储能容量的最小值和最大值。

1.2　马尔科夫决策建模

所提方法将微电网实时优化调度问题转化为一个马尔可夫决策,主要包含环境、智能体、动作、状态、奖励值和转移函数。

环境:微电网网络。

智能体:用于求解的深度强化学习算法。

状态:主要包括时刻 t 各节点所需电功率、光伏

电站有功出力、风力发电站有功出力、电池储能容量、各节点电压和当时电价。

动作：主要包括时刻 t 电池储能元件有功输出、光伏无功出力、风电无功出力和电池储能无功出力。

奖励值：智能体执行当前动作时所获得的奖励，为运营成本、电池储能容量越限惩罚值和电压越限惩罚值三者之和。

状态转移函数：表示从当前状态转移到下一个状态的概率函数。

1.3 相关约束

系统其他相关约束如式(5)—式(10)所示，其中式(5)—式(6)为微电网潮流计算公式。

$$P_{i,t} = P_{\mathrm{load},i,t} - P_{\mathrm{Wind},t} - P_{\mathrm{PV},t} - P_{\mathrm{BES},t} - P_{\mathrm{S},t},\ i \in N \tag{5}$$

$$Q_{i,t} = Q_{\mathrm{load},i,t} - Q_{\mathrm{S},t},\ i \in N \tag{6}$$

$$-1 \leqslant W_{\mathrm{Wind},t} \leqslant 1 \tag{7}$$

$$-1 \leqslant W_{\mathrm{PV},t} \leqslant 1 \tag{8}$$

$$-1 \leqslant W_{\mathrm{BES},t} \leqslant 1 \tag{9}$$

式中：$P_{i,t}$、$Q_{i,t}$分别为时刻 t 节点 i 需注入的有功功率和无功功率；$P_{\mathrm{load},i,t}$、$Q_{\mathrm{load},i,t}$分别为时刻 t 节点 i 负荷需求的有功功率和无功功率；$P_{\mathrm{Wind},t}$为时刻 t 风机输出有功功率；$P_{\mathrm{PV},t}$为时刻 t 光伏输出有功功率；$P_{\mathrm{BES},t}$为时刻 t BES 输出有功功率；$P_{\mathrm{S},t}$、$Q_{\mathrm{S},t}$分别为时刻 t 系统所需的有功功率与无功功率；$W_{\mathrm{Wind},t}$为时刻 t 风机无功出力比例；$W_{\mathrm{PV},t}$为时刻 t 光伏无功出力比例；$W_{\mathrm{BES},t}$为时刻 t BES 无功出力比例。

2 所提方法

2.1 预测模型

典型基于深度神经网络(deep neural network，DNN)的预测模型表达式[15]为：

$$y' = h_n\{h_{n-1}[h_{n-2}\cdots h_1(X)]\} \tag{10}$$

$$h_d(\cdot) = \omega_d h_{d-1} + k_d, d = 1,2,\cdots,n \tag{11}$$

式中：X 为第 1 层输入数据集；$h_n(\cdot)$为第 n 层网络的输出值；y'为经过 n 层神经网络计算后的预测值；ω_d 为第 d 层网络的权值；k_d 为第 d 层网络的偏差。

损失函数为：

$$E = \frac{1}{k}\sum_{f=1}^{k}(y_f - y'_f)^2 \tag{12}$$

$$\tau_{t+1} = \tau_t - o\nabla E \tag{13}$$

式中：k 为选取测试的数据量；y_f 为第 f 组数据真实值；τ_t 为 t 时刻 DNN 参数；o 为学习率；∇E 为下降梯度。

2.2 高斯混合模型

常用的高斯混合模型是一种数据概率分布模型，它将具有连续性的数据分类为有限数量的叠加高斯分布函数[16]。

$$P(\boldsymbol{x}) = \sum_{z=1}^{Z}\omega_z G(\boldsymbol{x}|\gamma_z,\zeta_z) \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{x}$ 为数据集；ω_z、γ_z 和 ζ_z 分别为第 z 个高斯分布的权重比、均值和斜方差；Z 为混合高斯分布中高斯分布函数的数量。高斯混合函数可以表示为

$$G(\boldsymbol{x}|\gamma_z,\zeta_z) = \frac{1}{2\pi^{D/2}\sqrt{\zeta_z}}\cdot\exp[-\frac{1}{2}(\boldsymbol{x}-\gamma_z)^{\mathrm{T}}\cdot\zeta_z^{-1}(\boldsymbol{x}-\gamma_z)] \tag{15}$$

式中，D 为数据的维度。

2.3 TD3 算法

强化学习例如 Q-learning 在求解时需要遍历整个 Q 表，每次计算都需要循环一次，且取得的动作必须是离散的。为了提高求解速度以及应对连续性问题，DRL 的概念被提出。所采用的 TD3 算法在深度确定性策略梯度(deep deterministic policy gradient，DDPG)算法的基础上，增加了两个状态网络解决 Q 值高估问题[17]。

2.3.1 评价网络

TD3 算法的评价网络包括了两个计算 Q 值的评价函数，即 $Q_1(s_t,a_t|\theta_1)$和 $Q_2(s_t,a_t|\theta_2)$，设 m_t 为 t 时刻目标评价函数结果，即[17]：

$$m_t = r_t + \tau\min_{j=1,2}Q'_j(s_{t+1},a_{t+1}|\theta'_j) \tag{16}$$

式中：r_t 为时刻 t 的奖励值；τ 为折扣系数；$Q'_j(\cdot)$为第 j 个目标评价函数；s_{t+1}为时刻 $t+1$ 的状态；a_{t+1}为时刻 $t+1$ 的动作；θ'_j为第 j 个目标评价函数的参数。

评价网络损失函数为

$$L(\theta_j) = E\{[m_t - Q_j(s_t,a_t|\theta_j)]^2\},j = 1,2 \tag{17}$$

式中，$E(\cdot)$为数学期望计算函数。其梯度计算公式为：

$$\nabla_{\theta_j}J(\theta_j) = E\{[m_t - Q_j(s_t,a_t|\theta_j)]^2\cdot\nabla_{\theta_j}Q_j(s_t,a_t|\theta_j)\},j = 1,2 \tag{18}$$

$$\theta_{j,t+1} = \theta_{j,t} - \alpha\nabla_{\theta_j}J(\theta_j),j = 1,2 \tag{19}$$

式中：$\nabla_{\theta_j}J(\theta_j)$为评价网络下降梯度；$\alpha$ 为评价网络参数更新的学习率，取值较小。

2.3.2 动作网络

动作网络中的动作函数表达式为[18]

$$a = \pi_{\vartheta}(s_{t+1}|\vartheta) \tag{20}$$

式中：$\pi_{\vartheta}(\cdot)$ 为动作函数；ϑ 为动作函数的参数。

梯度可以表示为：

$$\nabla_{\vartheta} J(\vartheta) = E\{\nabla_{a} Q(s_t, a_t | \theta) \cdot \nabla_{\vartheta}[\pi_{\vartheta}(s_t) + \varphi]\} \tag{21}$$

$$\vartheta_{t+1} = \vartheta_t - \beta \nabla_{\vartheta} J(\vartheta) \tag{22}$$

式中：φ 为目标动作函数中增加的噪声，为了降低求解中过拟合造成智能体动作的选择陷入局部最优中，在目标动作函数中都选择增加了较小的噪声；β 为动作函数的学习率。

目标动作函数的表达式为：

$$a' = \pi_{\vartheta'}(s'_{t+1} | \vartheta') + \varphi \tag{23}$$

$$\varphi \sim \mathrm{clip}[\mathrm{N}(0, \delta), -e, e], e > 0 \tag{24}$$

式中：δ 为方差；e 为取值截断位置。式(24)表示 φ 为一个服从正态分布中的噪声。

目标动作函数和目标评价函数的相关参数通过设置平滑系数进行软更新，即：

$$\theta'_{t+1} = \zeta \theta_t - (1 - \zeta)\theta'_t \tag{25}$$

$$\vartheta'_{t+1} = \zeta \vartheta_t - (1 - \zeta)\vartheta'_t \tag{26}$$

式中：θ' 为目标动作函数的参数；ζ 为平滑系数；ϑ' 为目标评价函数系数。

算法详细的流程如图 2 所示。

3　算例分析

算例采用的相关数据来自网上开源数据。负荷预测详细结果如图 3 所示，从图中可以看出基于 DNN 的预测模型能够较好进行日前预测。为更好地验证所提 DNN 算法的先进性，选取了线性回归算法和支持向量回归算法作为对比实验，结果如表 1 所示。常用的预测指标主要包括平均绝对误差(mean absolute error，MAE)和平均绝对百分百误差(mean absolute percentage error，MAPE)，具体的计算方式参考文献[19]。从表 1 可以看出，所提 DNN 算法在 MAE 或 MAPE 上的数值都小于其他两种方法，再次验证了所提算法的先进性。为扩大优化模型训练数据的不确定性，高斯混合模型基于预测误差结果拟合新的误差数据。将基于高斯混合模型生成的误差结果作为噪声输入到所提控制方法的训练集中，以此实现控制模型在优化中考虑预测的不确定性，同时实现预测端与运行优化二者相结合，从而获取更有效的控制策略。

高斯混合模型在不同的低维数据内都具有良好的效果，由于每个节点的电力负荷数据都不一样，因

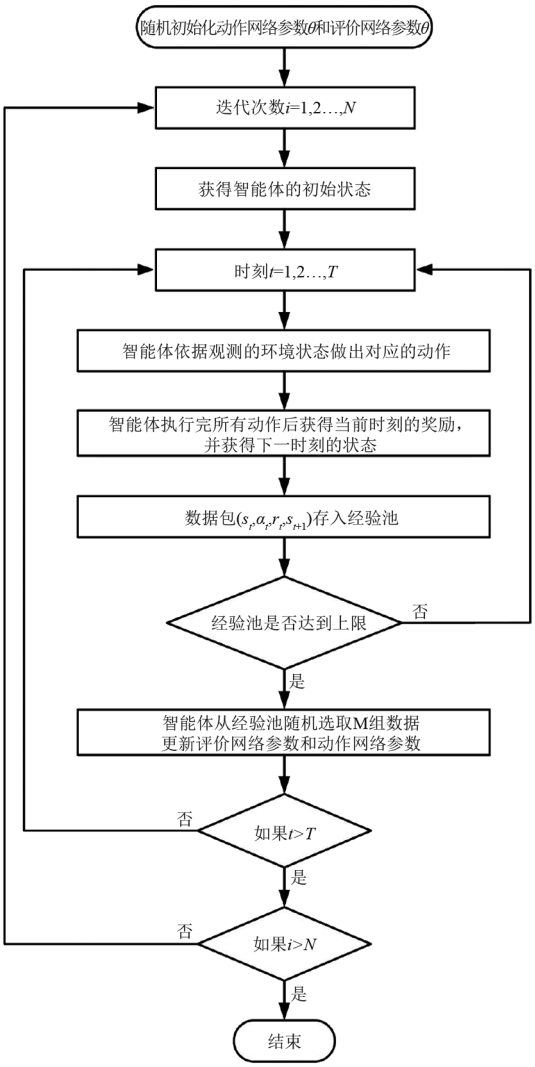


图 2　算法流程

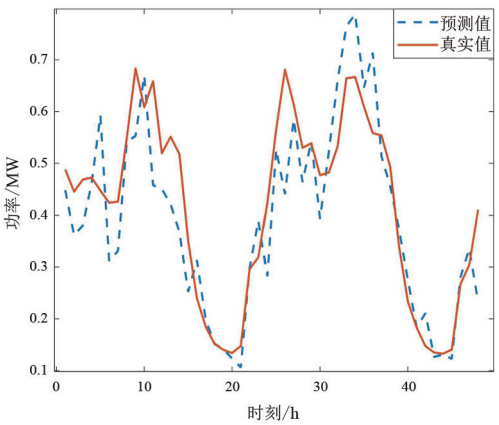


图 3　负荷预测结果

表 1　各预测方法结果对比

方法	MAE	MAPE/%
线性回归算法	0.18	16.74
支持向量回归算法	0.11	11.43
所提 DNN 算法	0.08	9.42

此须对每个节点的负荷进行拟合。选取部分节点的结果进行展示，如表 2 所示，从表中可以看出，高斯分布的数量取决于数据分布类型，高斯分布函数的详细参数也不尽相同。

表 2　高斯混合模型相关参数

节点	权重	均值	方差
1	(0.155,0.845)	$(7.4\times10^{-4},0.001\ 3)$	$(8.84\times10^{-7},9.81\times10^{-5})$
3	(0.65,0.11,0.24)	$(0.01,-0.01,8\times10^{-4})$	$(1.5\times10^{-4},8\times10^{-5},1\times10^{-4})$
5	(0.68,0.15,0.17)	$(-0.003\ 1,-1.38\times10^{-4},-0.01)$	$(3.1\times10^{-5},5.4\times10^{-8},3.9\times10^{-5})$
7	(0.29,0.32,0.39)	$(0.001\ 7,0.028,0.007\ 3)$	$(2.7\times10^{-5},5.05\times10^{-4},1.8\times10^{-4})$
9	(0.62,0.38)	$(0.001\ 5,0.001\ 3)$	$(8.7\times10^{-6},3.4\times10^{-5})$
11	(0.84,0.14,0.02)	$(-0.001\ 2,3.1\times10^{-4},0.022\ 4)$	$(2.7\times10^{-5},5.05\times10^{-4},1.8\times10^{-4})$

表 3 给出了 DDPG 以及所提 TD3 控制方法的参数设置。为验证所提负荷预测辅助 DRL 方法的有效性，选取了经典的粒子群算法（particle swarm optimization，PSO）和 DDPG 作为对比算法。DDPG 作为确定性策略优化，在求解过程中容易产生 Q 值高估问题。

表 3　DDPG 与所提方法参数设置

参数	DDPG	所提方法（TD3）
记忆库容量	12 000	12 000
奖励值折扣因子	0.95	0.98
批处理数量	64	64
训练次数	10 000	10 000
软更新因子	0.001	0.001
动作网络学习率	0.000 1	0.000 3
评价网络学习率	0.000 1	0.000 3

DDPG 与所提方法训练过程奖励的详细信息如图 4 所示。从图中可以看出，奖励值在经过前期 500 次自由探索后会急剧下降。这是因为探索过程动作值都是随机赋值，在自由探索结束后选择的动作不一定会优于自由探索阶段的动作；随着训练的继续进行，奖励值逐渐增大，3000 次以后所提方法逐渐开始收敛直到训练结束。可以看出，所提方法训练效果优于 DDPG。

为验证所提方法的有效性，用测试集验证最终效果。测试集平均成本如表 4 所示，从表中可以看出基于 TD3 算法的控制策略明显优于其他两种算法的控制策略，其与 PSO 对比经济性提升了 19.34%，相较于 DDPG 经济性提升了 11.96%。这证明了所提方法的有效性以及先进性。

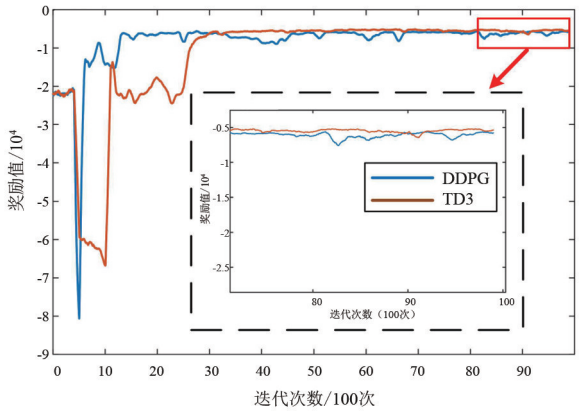


图 4　训练效果

表 4　测试集结果对比

方法	平均成本/(欧元·d^{-1})
PSO	7 331.95
DDPG	6 717.68
TD3	5 913.74

选取测试集中的某日进行详细的阐述，该日电负荷需求以及电价如图 5 所示。从图中可以看出：从 5:00 电负荷开始增加，直至 9:00 达到最大值并高负荷运转持续到 16:00 左右，然后开始缓缓降低；电价从凌晨到 8:00 一直维持在较低的价格，9:00—18:00 价格都保持比较稳定，19:00 电价增加到最大值并维持到 21:00。该日光伏和风电出力情况如图 6 所示。从图中可以看出：光伏从 9:00 开始吸收太阳能转化功率，逐渐升高在 12:00 达到最大值，随着太阳能的削减，光伏出力逐渐降低直至 18:00 降为 0 MW；风机在 10:00 前都是缓慢爬升，从 10:00—19:00 一直维持最大出力，直至 19:00 以后其出力开始缓慢降低。

储能元件在该日的出力结果如图 7 所示。从图中可以看出：在 7:00 之前，由于电价比较便宜，储能

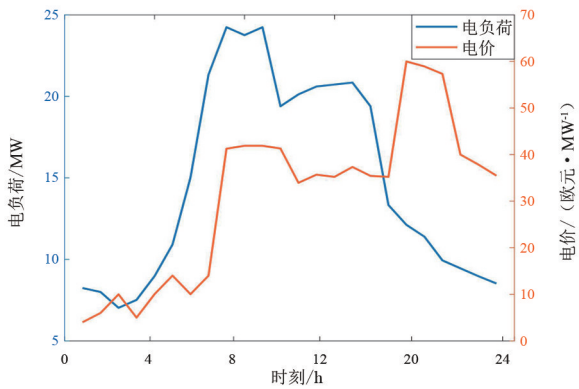


图 5　测试集某日负荷需求以及电价

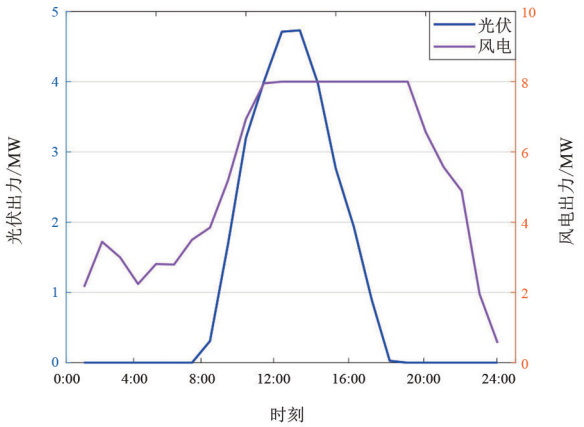


图 6　测试集某日光伏和风电出力情况

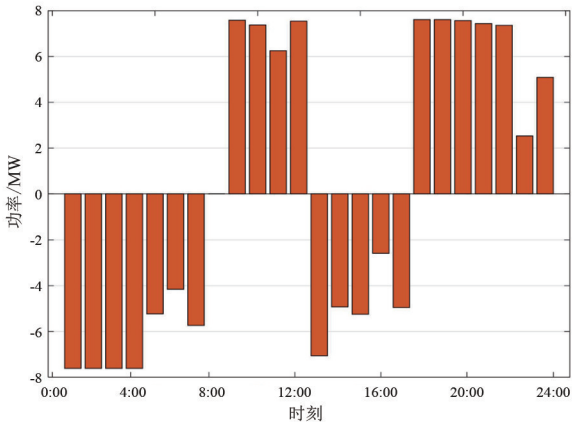


图 7　测试集某日储能元件出力结果

元件不断从主网购电实现充能;8:00—12:00 由于电价相较凌晨上涨较多,储能元件选择释放电能减少从主网购电来降低运营成本;13:00—17:00 电负荷逐渐降低,电价也相应地降低一部分,而可再生能源的出力达到了最大值,为提升可再生能源的消纳比例和应对 19:00 以后电价暴涨的情况,储能元件选择充能;在 18:00 开始释放自己的电能,从而降低微电网从主网购电成本。

采用所提控制策略该日的电压值如图 8 所示。图中的结果显示,所提控制策略在保证一天运营成本最低的同时保证了系统电压位于安全阈值范围内,即提高系统经济性的同时又保证系统的安全性,验证了所提方法的有效性。

4　结　论

提升新能源的消纳比例是实现微电网经济环保的重要举措,也是实现碳达峰、碳中和的重要途经。上面提出了一种同时考虑微电网经济性和安全性的

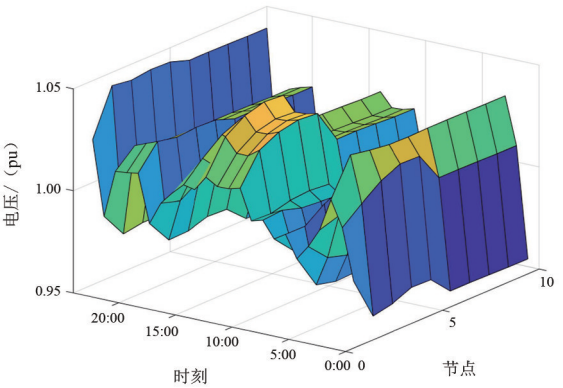


图 8　测试集某日所提方法电压值

运行实时调度模型,降低了系统运行成本。实验仿真表明:1)所提方法的性能相较 PSO 提升了 19.34%,相较 DDPG 提升了 11.96%,控制效果更好;2)所提控制策略通过历史数据训练以后可以根据实时状态做出最优的决策;3)所提方法将预测不确定性与运行优化模型相结合,提升了优化控制模型应对预测不确定的泛化能力。

参考文献

[1]　HEDAYATI-MEHDIABADI M, BALASUBRAMANIAN P, HEDMAN K W, et al. Market implications of wind reserve margin[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5161-5170.

[2]　ATZEM I, ORDONEZ L G, SCUTARI G, et al. Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 866-876.

[3]　YAN N, ZHANG B, LI W, et al. Hybrid energy storage capacity allocation method for active distribution network considering demand side response[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 1-4.

[4]　唐秀明, 朱欣科, 陈君,等. 计及负荷预测的风光柴储联供型微网系统的运行优化[J/OL]. 电气工程学报: 1-11[2023-06-09].http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20230510.1232.020.html.

[5]　李振坤, 汪璇璇, 时珊珊,等. 考虑微网间功率交互的配电网双层优化调度[J]. 南方电网技术, 2022, 16(9): 107-118.

[6]　SHUAI H, FANG J K, AI X M, et al. Optimal real-time operation strategy for microgrid: An ADP-based stochastic nonlinear optimization approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 931-942.

(下转第 58 页)

大规模可调节资源多级聚合参与互动响应数据需求及潜力分析方法

肖钰皓[1]，李 科[1]，苏 军[2]，霍耀冉[1]，孙裕策[3]，张曦元[3]

（1. 国网四川省电力公司信息通信公司，四川 成都 610041；2. 四川科锐得电力通信技术有限公司，四川 成都 610041；3. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072）

摘 要：充分调动多类型的需求侧资源参与电力系统供需互动，是促进新能源消纳，保障电网安全稳定运行的重要措施。针对区域大规模可调节资源多级聚合参与电网互动响应需求，给出了负荷侧资源的分层分级调控系统架构以及可调节负荷信息交互融合方式；然后，分析了可调节资源参与互动通信系统性能需求和动态互动决策的数据需求，提出了一种规模化可调节资源多级聚合响应的互动潜力分析方法，支撑多类资源互动响应和优化管控；最后，通过算例分析验证了所提方法的有效性。

关键词：新型电力系统；可调节资源；互动响应；潜力分析方法

中图分类号：TM 393 **文献标志码**：A **文章编号**：1003-6954(2024)01-0028-07

DOI：10.16527/j.issn.1003-6954.20240105

Interactive Response Data Demand and Potential Analysis Method for Multilevel Aggregation of Large-scale Adjustable Resources

XIAO Yuhao[1], LI Ke[1], SU Jun[2], HUO Yaoran[1], SUN Yuce[3], ZHANG Xiyuan[3]

(1. State Grid Sichuan Information & Communication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Sichuan CRD Power Communication Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Fully mobilizing multiple types of demand-side resources to participate in the supply and demand interaction of power system is an important measure to promote the consumption of new energy and ensure the safe and stable operation of power grid. Aiming at the demand of multi-level aggregation of regional large-scale adjustable resources to participate in interactive response of power grid, a hierarchical control system architecture of load-side resources and an interactive fusion mode of adjustable load information are presented. The performance requirements of interactive communication system and data requirements of dynamic interactive decision making involving adjustable resources are analyzed, and an interactive potential analysis method for multi-level aggregation response of large-scale adjustable resources are proposed to support interactive response and optimal control of multi-class resources. Finally, a numerical example is given to verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: new power system; adjustable resources; interactive response; potential analysis

0 引 言

高比例可再生能源接入电网成为能源转型必经之路，新能源大量替代常规机组，分布式能源、储能等交互式设备广泛接入，使得电力系统“双高”特征日益显著，给电网平衡调节带来巨大挑战。为确保电力系统安全稳定运行，需要实现大规模灵活性可调节资源参与电网供需互动，通过优化拓展现有控制方式提升电网控制能力。然而目前存在一些制约因素：1）在互联架构层面，新型电力系统中电力公司用户、新能源发电商、新能源聚合商、配售电公司等多种电力交易参与主体，造成现有架构难以适应多种参与主体的新能源信息交互。2）在数据共享

层面,存在源网荷储的数据信息分散且无统一规范,造成分散在众多设备、系统中的数据难以共享;终端接入系统复杂多样,数据集成与共享难度大,业务壁垒和信息集成壁垒成为阻碍新能源作用发挥的重要掣肘。3)在互动响应层面,新型电力系统受不完备信息、协同互动机制、协同控制技术等多方面限制,难以实现大规模灵活资源的多层级互动响应,限制了多类资源面向不确定性问题和复杂多变运行环境的灵活性。

新型电力系统下数量巨大的用户侧灵活资源通常采用分层聚合的形式参与电网互动,各类资源的聚合和感知技术成为关键。对于分布式电源聚合方面:文献[1]针对空调负荷建立聚合模型,求解最佳运行状态以提高负荷聚合商的利润;文献[2]以负荷目标值与实际值之差最小为优化目标构建空调负荷聚合模型,并提出了一种分组温度控制方法来优化各聚合体出力。针对独立微电网:文献[3]构建了一种考虑优先调度权的最优运行模型,负荷聚合商、微网的运营特点与需求被考虑在该模型中;文献[4]则针对拥有储能装置的负荷聚合商,提出了一种聚合商市场化优化决策框架;文献[5]在大规模电动汽车接入电网的场景下,提出了能够最小化发电成本的发电计划优化模型;文献[6]研究了电动汽车对虚拟发电厂的效益影响,提出了一种滚动时域分析方法,并构建了虚拟电厂市场化模型。

可调节资源的特征提取是实现供需互动和精准控制的关键,其技术研究主要侧重于结构特征分析和行为模式提取。在台区用户负荷结构特性分析方面,近年研究多关注负荷聚类与分类识别、负荷在线监控及预测等,如:文献[7]选取了日本东京电网、美国纽约电网及中国东北部电网等 3 个大型电网进行负荷结构特性分析,可以为台区负荷结构特性分析提供参考;文献[8]为提高各主体收益并降低电力公司储备容量需求,提出了新的可调容量上报博弈模型;文献[9]建立了一种针对低压电力用户的可调度能力评估模型,对低压电力用户负荷灵活度进行评估。然而当前可调节负荷特征提取技术通常关注于负荷数据的时域特征,利用时域模型进行求解,忽视了可调节资源的频域特征[10-11]。此外,可调节负荷的调节特性各异、种类极多,如何提取共通特征并建立可调能力的智能评估模型是可调潜力感知系统构建后要解决的问题。

国内用户侧蕴藏了巨大的可调节负荷资源。充分调动需求侧资源调控的灵活性,与新能源及常规电源进行协同运行,能够促进新能源消纳、支撑电力系统供需平衡和安全稳定运行。基于上述分析,下面结合新型电力系统建设,针对智能感知存在的控制对象分散复杂、市场环境感知困难、模型通信不尽完备等问题,进行大规模可调节资源多级聚合参与互动响应数据需求分析。并提出源荷储可调节资源参与互动响应的潜力评估方法,支持云边端架构下经济代价最小的采集和控制,对台区居民用户的用能行为与设备级特征、电网运行状态进行综合建模分析,从而更好地实现需求侧资源的优化利用。

1　大规模可调节资源参与电网互动响应架构

1.1　负荷侧资源的分层分级调控系统架构

分布式资源包括很多的种类,如现在大力发展的光伏发电设备、各种类型的电动汽车和充电桩以及空调等电气设备等。需要将相近的可调节资源进行分层分级聚合,实现电网的调控,从而在调度过程中充分发挥需求响应作用。高度聚合的分层级负荷调控系统调度架构如图 1 所示。为实现灵活性资源参与电力系统运行,分层分级调控系统架构通常包含 3 层:底层终端平台、中层管控平台和上层主网[12]。底层终端为区域中分布式光伏、储能、充电桩、中央空调、电采暖、家用空调等丰富的可调节资源,形成涵盖源-网-荷-储各类资源的可调节负荷资源池,底层终端平台负责对灵活性资源的边缘化管控;中层管控层为智能化的感知终端及面向多业务场景的边云协同提供数据服务技术,实现对分布式电源、柔性负荷、储能等多种分布式能源的有效聚

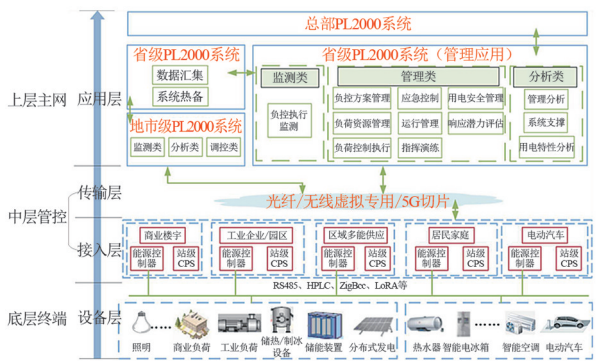


图 1　高度聚合的分层级负荷调控系统调度架构

合,中层管控平台负责对海量灵活性资源的聚合代理管控;上层主网平台通过对可调节资源集群潜力分析及优化配置,实现能源供应效益的最大化。

1.2 可调节负荷信息交互融合方式

在大规模灵活资源动态聚合的过程中,电力企业基于市场规则引导源网荷储可调节资源参与互动,采用灵活的价格策略,满足不同用户需求,扩大电力销售,其中可调节负荷信息交互融合方式至关重要[13]。针对终端层、网格层分布式资源实时调节能力参数难以生成问题,构建海量资源接口数据快速适配的互联标准协议,以实现光伏、储能的运行功率、线路运行状态等实时数据以及容量、额定功率等准实时数据采集,支持省/市/县不同层级的实时可调节能力计算,为新型电力系统安全稳定运行过程中产生的调节需求提供边界。图 2 给出了四川电网可调节负荷信息交互融合逻辑架构。

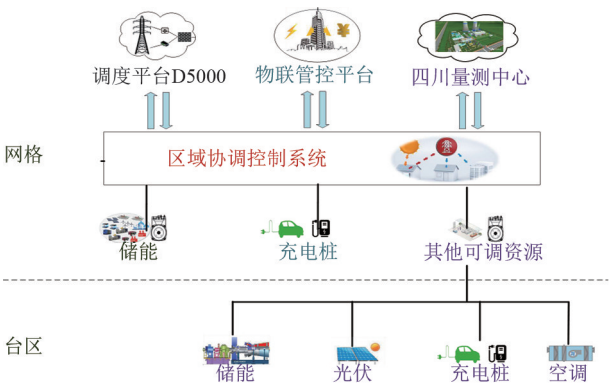


图 2 四川电网可调节负荷信息交互融合逻辑架构

借助云端的强大计算能力,可调节负荷互动系统可以协助需求响应服务供应商参与电网的负载平衡和可靠性管理。区域协同控制系统负责储存云端电网数据以及下层优化数据(边缘服务器上传的边缘计算数据以及聚合商的聚合数据),为云处理平台进一步数据优化和大数据模拟预测提供数据支持。可在用户园区、楼宇等处设置边缘计算终端,接收来自端侧采集到的数据,对接收数据进行数据预处理(数据清洗以及数据本地优化),再按照调度需求以及检测需求进行边缘计算分析,实现台区自治。同时,将本地计算数据传输给聚合商以及更上层的云处理平台和数据中心进行三层协调调度,调整本地调控方案以及任务卸载方案,保证边缘计算效果最优。网络层由不同规模的聚合商和相关通信设备组成,目的是促进需求响应资源用户和计算资源之间的交互,并且能够实现需求响应资源之间的交互。

2 互动响应感知通信与数据需求

2.1 可调节资源参与互动的通信系统要求

通信系统服务质量(quality of service,QoS)是保证可调资源能够实时、可靠地参与电力系统调节服务的关键。QoS 中的通信带宽、时延、可靠性等指标都会影响可调节资源与电网能否完成及时、准确和可靠的互动[13]。调峰调频等业务对系统 QoS 的指标需求如表 1 所示。

表 1 典型业务通信指标

场景/业务	带宽	时延	可靠性/%
调频	按 100/km 2 个终端估算:4.8 Mb/s	<50 ms	二次 99.99
调峰	按 100/km 2 个终端、秒级上报、分钟级控制估算:0.82 Mb/s	<6 s	99.99
紧急需求响应	按 100/km 2 个终端估算:16 Mb/s	<50 ms	99.999
邀约需求响应	按 150/km 2 个终端、轮询机制、分钟级上报估算:2.74 b/s	<1.1 s	99.999
清洁能源消纳	按 150/km 2 个终端估算:2.74 Mb/s	<3 s	99.99
电力市场交易	按交易成员 1000 个估算:1.33 Mb/s	<10 s	99.99

2.2 可调节负荷动态互动决策的数据需求

电力企业通过采用市场规则和灵活的价格策略,可以实现源网荷储互动,以满足各种用户需求。未来的能源互联场景下需要针对复杂情况做出决策。图 3 给出了边缘计算动态策略库加载分析流程,针对电网削峰填谷、各种辅助服务等业务场景,可以动态选择业务目标和优化目标,之后根据闭环反馈方法制定新的运行策略,以最大化整体效益。

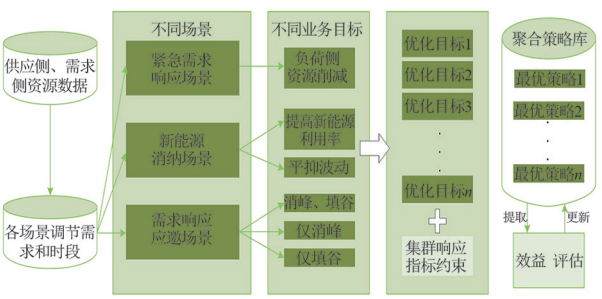


图 3 边缘计算动态策略库加载分析流程

低压配电网中的电气设备结构复杂多样,有些电气量信息不能直接由底层传感器获得,需要借助已有感知信息进行数据融合与估计。数据融合技术可以对电力系统中的大数据进行有效处理,包括不同类型、来源、时间和空间的数据,并提取它们的特

点和关联度,从而进一步获取有效的信息[14]。低压配电网信息融合需要结合数据融合技术与各类对象数据特征,才能实现理想的效果。

3　可调节资源多级聚合参与互动响应潜力分析方法

3.1　可调节负荷资源多级聚类方法设计

负荷侧资源是参与源网荷储互动的关键。在市场机制下,各类数量多、容量小、类型复杂的灵活资源会参与电力系统的需求响应、调峰、调频等各类业务。由于可调节资源数量多、容量小,存在模型复杂、难以直接应用于地区电网调度运行等问题,需要对大规模的可调节资源进行分层聚合。按照 110 kV、35 kV 以及 10 kV 3 个层级进行负荷侧灵活资源的分层,分层多级聚合如图 4 所示。对于不同等级的区域电网的各电力用户的划分方法和聚类方式各有不同,由该配电网的负荷侧市场主体代理决定。电力市场主体响应前提是需要按照电力交易需求,事前提交负荷用电计划,事后由电网企业给出实际用电情况,满足电力交易结算的偏差、响应电量以及实际用电的费用结算需求。

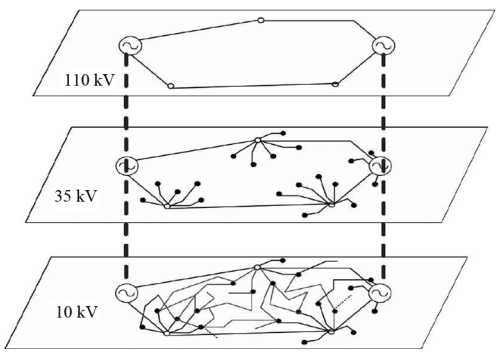


图 4　按电压等级进行多级聚类

3.2　可调节资源互动响应潜力分析

3.2.1　可调节负荷资源单体与需求响应行为分析

1)可调节负荷资源响应特征建模

可调节负荷资源响应特征建模,可从以下两方面考虑:1)引导负荷资源主体主动参与,如在负荷设备的应用界面设定用电模式,对每一种模式进行量化建模;2)对负荷资源主体的用电规律建立模型。此处主要考虑前者,在仿真平台中建立各可调节负荷资源的运行模式,每一种运行模式对应每一种特征参数设定,表现出各种激励水平下的可调资源响应特征[15]。

下面将温控负荷作为分析案例,图 5 给出了温度负荷的控制模型。当实时电价与参考电价产生差值时,将以线性斜率改变温度设置,进而改变负荷数值。电价上升时的上浮斜率为 r_{high},电价下降时的下浮斜率为 r_{low}。则资源设定的浮动斜率 r 可计算为

$$r = \begin{cases} r_{\text{high}}, & \Delta p \geqslant 0 \\ r_{\text{low}}, & \Delta p < 0 \end{cases} \tag{1}$$

对于可调节温控负荷资源 j,其控制方程为

$$\begin{cases} r_j = \dfrac{\Delta T / \Delta T_{\max}}{\Delta p / \sigma^*} \\ \Delta T = T_t - T_{t-1} \end{cases} \tag{2}$$

式中:r_j 为设定温度相对变化量大小与价格相对变化幅度的比值;ΔT 为设定温度变化量;$\Delta T_{\max}$ 为温度变化极限;Δp 为电价变化量;σ^* 为 1 天内电价波动的标准差;T_t 为温控负荷在 t 时刻的温度。

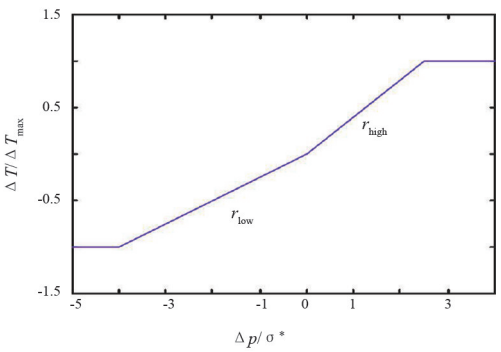


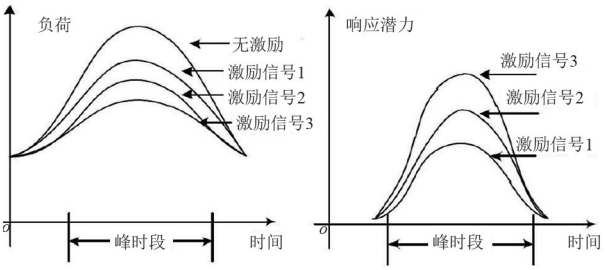
图 5　温度负荷的控制模型

2)需求响应资源潜力评估

结合不同激励下的可调节资源响应模式,评估不同激励下的可调节资源响应潜力。以可调节资源参与需求响应削峰时段为例,如图 6 所示。图 6(a)分别给出了不同激励信号下的可调节资源用电响应曲线;在此基础上,对各种激励下的用电曲线与无激励下用电曲线作差,即可得到各种激励下可调节资源响应潜力,如图 6(b)所示。

3.2.2　可调节负荷资源聚合体需求响应能力分析

获取评估单个用户的响应模型后,还需要提出资源聚合体响应能力模型[16]。图 7 给出了需求响应资源的梯形聚合模型,图中:P_{R} 为最大响应量;S_{r} 为上升速率;t_{r} 为上升时间;t_{h} 为响应时间;t_{f} 为下降时间。该模型以给定激励信号下的资源响应潜力为基础进行构建,综合考虑了响应容量、响应速率、响应时长等多个要素的影响。



（a）不同激励信号下的负荷曲线　　（b）需求响应潜力

图 6　用户不同激励信号下需求响应潜力

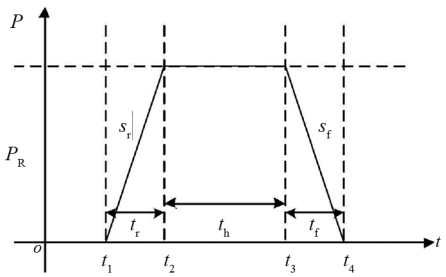


图 7　需求响应资源梯形聚合模型

按照需求响应潜力的时域特征划分不同场景，场景 i 的梯形模型用分段函数表达为

$$\begin{cases} P_i = S_{r,i}t + a_i, & t \in [t_1, t_2] \\ P_i = b_i, & t \in [t_2, t_3] \\ P_i = S_{f,i}t + c_i, & t \in [t_3, t_4] \end{cases} \tag{3}$$

式中：P_i 为场景 $i(i=1,2,3,\cdots n)$ 下的可调容量；$S_{r,i}$ 为场景 i 下梯形建模的左侧上升速率为；$S_{f,i}$ 为右侧下降速率；a_i、b_i、c_i 为分段拟合参数。

在从可调节资源类别、所属区域两个维度对可调节资源进行聚合基础上，进行可调节资源聚合群需求响应资源品质分类。可划分为3种品质类型，可调节资源聚合群需求响应资源特性如表 2 所示。

表 2　可调节资源聚合群需求响应资源特性

特性	优质型	中等型	普通型
响应容量/kW	>3000	≥1000～≤3000	<1000
响应时长/h	>3	≥0.5～≤3	<0.5
可调节资源转化率/%	>70	≥30～≤70	<30

基于大规模可调节资源参与互动响应架构，用于分析可调节资源互动响应潜力分析。精细化建模流程如图 8 所示，主要由用户聚类、数据融合、分层聚合模型建立等环节组成。

4　算例分析

以某区域电网为例，假设某母线上连有 3 条馈线，每条馈线下包含分布式光伏、电动汽车、空调、储能设备等多种可调节资源。

4.1　数据交互信息与通信架构应用

以支持区域内电网的感知信息交互系统改造建设，提升需求侧资源状态信息感知广度深度，解决区域内电网长期存在的可调节资源参与电力系统调节可靠性问题，进行互动响应数据需求分析和建设架构设计。

1）总体建设架构

通信架构建设以具备边缘计算能力的智能融合终端为核心，分别在用户层、网络层、服务层部署各类终端感知和相关通信设备，实现对用户参与电网调度所需的各项数据的采集检测，通过聚合计算节点将聚合信息上报给中央计算节点。

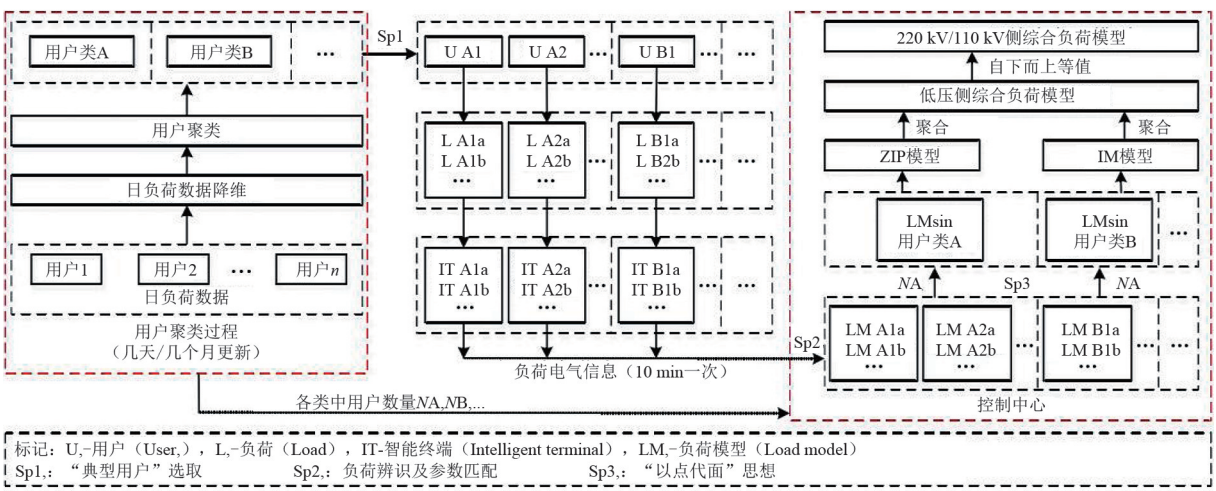


图 8　可调资源互动响应精细化建模流程

2）用户层终端感知设备差异化配置

用户层终端差异化配置主要由不同可调节资源集群配套设施的部署情况，配合相应软件 APP 实现。配置类型可分为简洁型、标准型和扩展型。简洁型终端感知设备仅需智能电能表，实现配电变压器监测、电能计量、故障研判和停电信息上报等功能，适用于农村、城乡结合部、小容量公用变压器和一般专用变压器用户。

标准型终端感知设备在简洁型基础上，增加智能断路器、无功补偿电容器、智能换相开关等设备，实现开关运行监测、电能质量治理等功能，适用于城市和重要负荷区。

扩展型终端感知设备在标准型基础上，增加充电桩、分布式能源、视频监控装置，实现充电桩有序充电管理、分布式能源接入、配电站房视频监控等功能，适用于分布式能源、充电桩集中地区和重要专用变压器用户。

3）应用成效评估

智能融合终端能够极大地扩展用户状态信息感知范围，促进了需求响应资源用户额计算资源之间的交互，大幅降低了时延，节约了运维调试时间，提升了实时性、可靠性，高效、精准实现灵活资源协同控制，提升了大规模可调节资源参与电网互动响应的能力。

4.2　仿真评估各可调节资源集群的响应潜力

根据该区域电网各资源响应特征，将资源划分为集群Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 4 类，各集群动态响应评估指标概率分布的均值仿真参数如表 3 所示。采用离散化方法将连续的各动态指标仿真数据转化成不同区间下的离散化数据。不同时间节点下每个可调节资源集群降负荷功率的概率分布在一定区间范围内变化。

由于不同时间节点下可调节资源响应功率的离散化区间与数量不同，不同时间节点下可调节资源可调区间大小也各不相同。可调节资源集群的降负荷功率取值为最大或最小值时的概率最小，这也满足实际情况下可调节资源集群的响应规律。各时间节点下各集群降负荷率评估指标多状态离散仿真结果如图 9 所示。集群Ⅱ和集群Ⅲ的离散化区间范围较大，而集群Ⅰ和集群Ⅳ的离散化区间范围相对较小。从实际调节难易程度来看，可调节资源集群可调范围的离散化区间范围越小，该集群参与响应的确定性越强，受不确定性因素的影响越小，越有利于集群参与各类电网平衡调节业务。

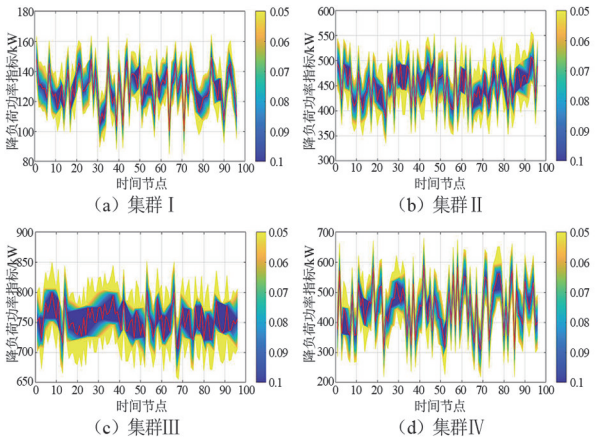


图 9　各时间节点下各集群降负荷率评估指标多状态离散仿真结果

同理对集群其他动态响应指标进行离散化处理，以集群Ⅰ为例得到图 10 所示的各动态评估指标仿真多状态概率离散化结果。在每一个时间节点下，集群响应潜力每个动态指标为一个概率性序列，通常以该概率性序列期望作为可调节资源集群互补协调响应潜力分析依据。为从多个角度评估可调节资源集群响应能力，图 11 给出了集群Ⅰ和集群Ⅱ动态响应潜力评估指标的雷达图。集群响应潜力的综合评估结果可由蓝色区域面积代表。本算例中虽然集群Ⅰ参与响应时反应时间较快，但是其最大可降负荷功率和响应速率较小，导致集群Ⅰ蓝色区域面积较小，综合评估结果较差。集群Ⅱ参与响应时反应时间较慢，但是其他动态指标都较大，因此在一些对反应时间要求较低的业务场景下，具有较大的可调节潜力。

为进一步分析不同业务场景下可调节资源集群的响应潜力，结合所采用的聚合响应感知方法，获取灵活资源在调峰、调频、紧急需求响应和新能源消纳

表 3　可调节资源集群动态响应评估指标概率分布的均值仿真参数

集群	最大调节功率/kW	反应时间/min	平均响应速率/（kW · min^{-1}）	响应持续时间/min	稳态响应持续时间/min	响应恢复速率/（kW · min^{-1}）
集群Ⅰ	[100, 150]	[1, 3]	[40, 90]	[10, 15]	[8, 13]	[60, 90]
集群Ⅱ	[400, 500]	[2, 5]	[80, 170]	[14, 32]	[12,28]	[80, 170]
集群Ⅲ	[700, 800]	[4, 7]	[80, 120]	[25, 60]	[28, 52]	[80, 120]
集群Ⅳ	[300, 600]	[5, 9]	[30, 60]	[20, 70]	[30, 65]	[40, 60]

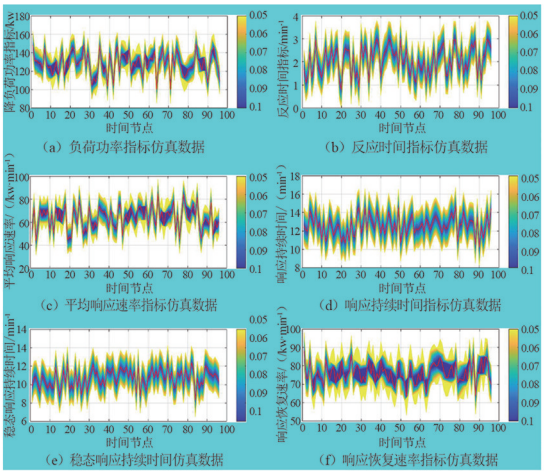


图 10　各时间节点下集群Ⅰ各动态响应评估指标多状态离散仿真结果

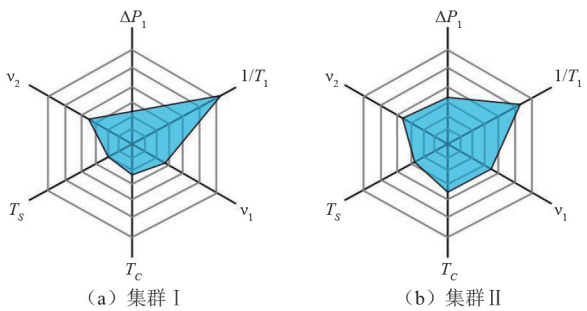


图 11　单时间节点下各集群动态响应潜力评估指标期望

4 个典型业务场景下不同动态响应指标需求仿真数据,如表 4 所示。其中,调峰业务场景对可调节资源集群反应时间和响应速率要求较低,但是对参与调峰可调节资源集群的响应容量要求较高,而调频与紧急需求响应业务场景下,可调节资源集群必须具备较小的反应时间,并且调节速率也要求较高。由于新能源发电存在短时间的波动性和长时间的峰谷差,因此新能源消纳场景下需要两种尺度的调节资源参与响应。较长时间尺度的新能源消纳问题可视为一类调峰问题加以考虑,因此新能源消纳业务场景主要针对短时间尺度内新能源波动性的平滑消纳场景构建需求仿真数据。

表 4　典型业务场景下各动态指标需求仿真数据

业务	容量/kW	T_1/min	v_1/(kW·min^{-1})	T_c/min	T_s/min	v_2/(kW·min^{-1})
调峰	150	10	40	20	17	50
调频	100	2	100	2	1	80
紧急需求响应	120	3	90	10	8	100
新能源消纳	80	5	80	4	3	70

5　结　论

新型电力系统下大规模灵活资源需要通过动态聚合方法参与电网互动,区域大规模可调节资源互动响应潜力感知和分析技术是关键。考虑用户主体类别与其时空特性、用户行为差别对不同弹性负荷资源响应能力具有影响,采用分层分级的负荷侧资源调控系统架构以及可调节负荷信息交互融合方式,能够降低可调节资源精细化信息获取困难。结合可调节资源参与互动通信系统性能需求和动态互动决策的数据需求,所提出的规模化可调节资源多级聚合响应的互动潜力评估分析方法,可反映各类资源集群化后的对外响应特性,适配新型电力系统复杂多变的运行状态,有效支撑多类资源互动响应和优化管控。

参考文献

[1] QI N, CHENG L, XU H L, et al. Smart meter data-driven evaluation of operational demand response potential of residential air conditioning loads[J]. Applied Energy, 2020, 279: 115708.

[2] 王蓓蓓,胥鹏,王宣元,等.需求响应分布鲁棒建模及其大规模潜力推演方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):33-41.

[3] 朱玉杰. 电采暖负荷可调节能力评估与集群控制策略研究[D].吉林:东北电力大学,2019.

[4] PARK Jeong Eun, PARK So Mang, CHOI Won Seok, et al. Electrical characteristics analysis of bonded cells for shingled modules [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2020, 20(11):6653-6658.

[5] 吴昆霖. 基于电力大数据及算法挖掘技术的用户用电行为分析研究[J].现代农机, 2020(5):56.

[6] 赵阳,胡诗尧,杨书强,等.售电市场环境下基于数据驱动的用户用电行为分析[J].电力需求侧管理, 2020, 22(4):45-50.

[7] 朱天怡,艾芊,贺兴,等.基于数据驱动的用电行为分析方法及应用综述[J].电网技术,2020,44(9): 3497-3507.

[8] 孙毅,杨艳敏,许鹏,等. 基于云模型的用户群负荷调控算法[J]. 电网技术,2017,41(8): 2611-2617.

[9] 傅质馨,李紫嫣,朱俊澎,等."双碳"目标下需求侧管理机制研究综述及展望[J].电力信息与通信技术,2023,21(2):1-12.

(下转第 71 页)

“双碳”目标下新型电力系统 PEST-SWOT 分析

栗奕博[1],代清钊[1],杨富麟[2],孙　冬[1],张晓春[1],曾　博[2]
(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京　102206;2. 华北电力大学电气与工程学院, 北京　102206)

摘　要:随着“双碳”目标的提出,中国将加快构建适应新能源比例不断提升的新型电力系统,大力发展低碳能源是实现“双碳”目标的必然路径。首先,研究了“双碳”目标与新型电力系统的耦合关系,分析新型电力系统发展现状;其次,考虑中国新型电力系统所处环境和自身特性,从宏观、微观两个层面,采用 PEST-SWOT 分析方法,全面分析新型电力系统建设过程中政治、经济、社会、技术方面自身的优劣势,以及面临的机遇与威胁;最后,基于上述分析,在不同发展战略下提出针对性政策建议和有效措施,为新型电力系统建设提供参考和借鉴。

关键词:“双碳”目标; 新型电力系统; PEST-SWOT 分析; 发展战略
中图分类号:TM 71　**文献标志码**:A　**文章编号**:1003-6954(2024)01-0035-08
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240106

PEST-SWOT Analysis of New Power System under "Dual Carbon" Goal

LI Yibo[1], DAI Qingzhao[1], YANG Fulin[2], SUN Dong[1], ZHANG Xiaochun[1], ZENG Bo[2]
(1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Electrical and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the proposal of "dual carbon" goal, China will accelerate the construction of new power system that adapts to the increasing proportion of new energy, and vigorously developing low-carbon energy is an inevitable path to achieve the "dual carbon" goal. Firstly, the coupling relationship between "dual carbon" goal and new power system is studied, and the development of new power system is analyzed. Secondly, considering the environment and its own characteristics of new power system in China, from the macro and micro levels, the PEST-SWOT analysis method is adopted to comprehensively analyze its own advantages and disadvantages in politics, economy, society and technologies in the construction of new power system, as well as the opportunities and threats faced. Finally, based on the above analysis, targeted policy suggestions and effective measures are put forward under different development strategies to provide a reference for the construction of new power systems.

Key words: "dual carbon" goal; new power system; PEST-SWOT analysis; development strategy

0　引　言

2020 年,中国宣布了 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和的目标愿景[1]。现阶段,“双碳”目标实现面临着减排幅度大、转型任务重、时间窗口紧等诸多挑战,中国碳排放主要来源于电力、建筑、工业生产、交通运输、农业等领域,其中能源电力比例最大,为 40%左右[2]。2021 年 3 月 15 日,习近平总书记在中央财经委员会第九次会议上提出深化电力体制改革,构建以新能源为主体的新型电力系统[3]。实现“双碳”目标需要进行能源变革、技术变革、产业变革和社会变革,能源电力行业既要保障供应安全,满足经济社会发展需要,又要实现全面绿色转型[4]。随着“新电气化”引领终端电能替代加速推进,绿色消费比重将持续提升,电力转型发展对于实现“双碳”目标将起到决定性作用[5]。

现阶段,针对“双碳”背景下新型电力系统的研

基金项目:国网四川省电力公司经济技术研究院、新型电力系统研究院科技项目“双碳目标下四川新型电力系统建设理论方法研究”(SGSCJY00NYJS2200058)

究主要集中在理论研究和应用研究两个方面。在理论研究方面,文献[6]分析了电力系统转型现状下新型电力系统的内涵、构建原则与思路,并合理划分新型电力系统的发展阶段,针对性提出各阶段的发展建议。文献[7]分析了制约新型电力系统发展的难点以及各利益相关者关系,提出了构建新型电力系统的促进机制。文献[8]结合中国新能源发展现状,分析了安全稳定、优化调度、送出消纳等多重挑战,从源侧、网侧、荷侧提出构建以新能源为主体的新型电力系统发展路径。文献[9]从碳计量与碳追踪、碳规划与碳轨迹、碳减排与碳优化、碳市场与碳交易 4 个方面提出了新型电力系统“碳视角”的研究框架。文献[10]从能源供应的经济和政策不确定性与低碳转型带来的能源供应安全两个方面分析长期规划模型面临的挑战。在应用研究领域,文献[11]将电力系统不确定性调度模型分为 Wait-and-See 和 Here-and-Now 两种类型,归纳总结对应求解方法,探讨了不确定优化调度在新型电力系统中的应用。文献[12]提出了新型电力系统背景下电力设备高效运行和智能维护的基本特征和技术体系,详细阐述了电力设备数字化和智能化、新型电网设备状态评估等关键技术研究现状和进展,探讨了研究和应用中还需要解决的主要问题。文献[13]提出一种适用新型电力系统需求的储能多目标协同调控方法,可实现多时间尺度上功率和能量的高效平衡,为利用储能技术应对新型电力系统的关键挑战提供支撑。

可以看出,现阶段研究方向主要集中在新型电力系统发展阶段及路径、总体架构、应用场景等,从源网荷储、机制体制等方面对新型电力系统发展路径进行规划;较少有结合新形势新政策下,从宏观和微观层面对新型电力系统进行具体分析,并从政策、经济、社会、技术等多维度提出对应发展策略。鉴于此,通过结合“双碳”目标愿景,研究“双碳”目标与新型电力系统的耦合关系,阐述新型电力系统发展现状,并运用 PEST-SWOT 分析方法,全方位分析新型电力系统发展的优势、劣势、机遇和挑战。在此基础上,为中国新型电力系统发展提出针对性政策建议和具体措施。

1 “双碳”目标下新型电力系统发展现状

1.1 新型电力系统助力实现“双碳”目标

“双碳”目标与新型电力系统之间存在着紧密联系,“双碳”为新型电力系统构建指明了发展方向,在实现“双碳”目标的过程中,电力行业作为主力,能源行业作为主要战场。为实现“双碳”目标,需提升非化石能源消费比重,保证未来 5 年内每年递增 1%,在 2035 年,满足新增电量的 80%均来自非化石能源发电。考虑到新能源未来会逐渐转变为主要能源,需要进行技术攻关和体制改革,并采取有效措施应对。新型电力系统的构建是一项长期且复杂的系统工程,在不同的发展阶段均有所差异,随着实现“双碳”目标的进程而有所变化。未来,新型电力系统将以新能源为主体,以数字信息技术为驱动,在保障电力供应安全、绿色可持续发展等方面发挥重要作用。

与之对应,新型电力系统则可以看作实现“双碳”目标的枢纽平台。新型电力系统是以确保能源电力安全为基本前提,以满足经济社会高质量发展的电力需求为首要目标,以大规模新能源供给消纳体系建设为主线任务,以技术创新和体制机制创新为基础保障的新时代电力系统[14],是践行新形势下能源安全战略的重要举措,是实现“双碳”目标的关键核心。构建新型电力系统,要从两端发力推进“两个替代”,即电力生产侧实施清洁替代、能源消费侧实施电能替代,实现源端减碳、终端脱碳。清洁低碳发展已成为未来趋势,新型电力系统是对传统电力系统的继承与发展,其基础理论、技术产业和体制机制面临新的变革,需要不断推进新型电力系统构建和技术发展,为实现“双碳”目标做出更大贡献。

1.2 新型电力系统发展现状

现阶段,中国新型电力系统正处于加速转型阶段,电力供应保障能力稳步提升,电力技术创新能力不断加强,电力体制改革攻坚成效显著,电力绿色低碳转型也在不断加速进程。以新型电力系统的转变、继承与进化为基础,通过新、旧电力系统的对比,从源、网、荷、储各环节分析新型电力系统的发展变化过程。

1)从供给侧来看,传统电力系统主要以化石能

源为主。随着“双碳”目标等政策的提出,新型电力系统将发展成为以新能源为主体、以煤电等化石能源为辅助的新型电力系统。新型电力系统不但强调新能源的主体性,更倾向整体性,这不仅仅是“量”的改进,还会带来“质”的变化。以新能源为主体,这意味着未来新能源发电装机将占据主导地位。

2)从电网侧来看,随着新能源的大量并网,由于其难预测、波动大、易受天气和气候影响等特点,给电网的安全稳定带来巨大的冲击。传统电力系统一般只注重电网的安全稳定运行,新型电力系统还需要注重供电可靠性,提升调频、调压能力,挖掘灵活性资源等,以适应新能源大量接入带来的环境变化。

3)从负荷侧来看,随着社会的不断发展,社会总用电量不断增加。随着电能替代工作推进,多元化用电设备不断涌现,第三产业和居民的用电负荷占比不断攀升,新型电力系统负荷特性向柔性、生产与消费兼具型转变。

4)从储能侧来看,因电力即产即用的特性,任何时候生产量和需求量都需要严格匹配。以新能源为主体的电力系统因风光等新能源出力的不确定性会影响电力系统实时电力电量平衡,储能可有效解决新能源出力与用电负荷时空不匹配的问题,实现新能源充分消纳利用。在新型电力系统推进过程中,集中式和分布式储能需结合发展。当前,新能源发展呈现出集中式与分布式并举的态势,新型电力系统的网架结构将向“主干网架+中小型电网及微型电网”柔性互联形态发展,与此相适应,储能行业应推动集中式和分布式储能相结合发展。

2　新型电力系统 PEST-SWOT 分析

2.1　PEST-SWOT 方法理论

PEST-SWOT 方法是一种经过整合和创新后的战略分析方法,PEST 分析是指对目标所处的宏观环境进行分析,包括政治(politics)、经济(economy)、社会(society)、技术(technology)4 个方面;SWOT 分析是对目标所处微观环境进行分析,包括优势(strengths)、劣势(weaknesses)、机遇(opportunities)、威胁(threats)4 个方面[15]。将两种分析方法结合,从整体角度运用系统思维对目标进行详细分析,得到政治、经济、社会、技术 4 个方面存在的内部优势和劣势,以及现阶段面临的外部机遇和威胁,通过分析得到针对性较强的发展策略。

2.2　PEST-SWOT 模型分析

下面从宏观、微观环境两个层次对中国新型电力系统领域进行探讨,分析新型电力系统发展现状,并提出对应发展战略和政策建议。建立 PEST-SWOT 分析模型,结果如表 1 所示。

表 1　新型电力系统 PEST-SWOT 分析矩阵

PEST-SWOT	优势(S)	劣势(W)	机遇(O)	威胁(T)
政治(P)	政府加大力度支持新型电力系统发展	新型电力系统体制机制亟需完善	国家能源局发布《新型电力系统发展蓝皮书》	电力市场法制建设滞后阻碍电力体制改革
经济(E)	节能高效、安全可靠	灵活性资源成本上升	市场交易机制与体系建设不断完善	缺乏市场化电价机制
社会(S)	用户需求催动下的电力系统多元化发展	能源分布不均衡	终端用能领域电气化水平提升	电力供应安全形势愈发严峻
技术(T)	电力电子技术和数字化技术在能源电力系统得到广泛应用	科技创新能力亟需提升	新型电力系统技术正在加速演变	系统调节能力不足制约发展

2.3　政治环境(P)

2.3.1　优势(S):政府加大力度支持新型电力系统发展

近年来,国家能源局制定 2022 年能源工作“路线图”,提出提升电力系统调节能力;国家发展改革委发布《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》,提出加强新型电力系统顶层设计。2023 年 7 月份,全国出台能源电力相关政策合计 43 条,8 月份达到 63 条,涵盖绿证、电力消纳、电力安全、能源低碳技术等方面。可以看出政府层面大力支持新型电力系统发展建设,明确为新型电力系统发展方向提供指导。同时各省市积极配合响应国家号召,着力构建省级新型电力系统。在行业内部,国家电网、南方电网也相继公布构建新型电力系统的行动指南并制定发展路径。

2.3.2　劣势(W):新型电力系统体制机制亟需完善

现阶段中国电力体制改革只取得了阶段性成果,电力体制机制改革并不顺利,电价平衡机制、煤电合作机制、新能源管理体制等问题不断涌现。随着电力体制改革逐步深入,矛盾逐渐显露,电力市场自身不协调和不平衡的问题仍难以完全解决,同时

相关领域部分既定方针政策尚未实现。

2.3.3 机遇(O):《新型电力系统发展蓝皮书》发布

为全面贯彻落实二十大精神,近日国家能源局发布《新型电力系统发展蓝皮书》,提出了整体架构和重点任务。蓝皮书为下个阶段新型电力系统发展指明了方向,随着相关政策方案和体制机制逐步健全,可以预料到未来新型电力系统将处于良好的政策环境中,迎来新的发展机遇。

2.3.4 威胁(T):电力市场法制建设滞后阻碍电力体制改革

英国、美国等发达国家电力市场化改革的关键因素之一在于通过立法提供制度保障。现阶段中国市场经济发展迅速,电力体制改革也逐渐深入,但法制建设却逐步滞后,《电力法》作为基础法直到现在仍未修订完善,已经成为电力体制改革不可避免的一处阻碍。

2.4 经济环境(E)

2.4.1 优势(S):节能高效、安全可靠

现阶段中国正处于经济转型阶段,经济结构持续优化,经济发展更加注重效率和质量,注重对低碳清洁能源的开发利用,这与新型电力系统的特点相符合。新型电力系统的经济性,体现在节能高效、安全可靠等方面。首先,新型电力系统与传统电力系统相比,拥有更高效的节能功能,可以实现较大范围内的额外节能,从而减少能源消耗与碳排放,带来一定经济效益。此外,新型电力系统拥有智能化管理功能,可以最大限度地提高电力系统的运行效率,可以实现自动调度和有效的发电利用,确保电力系统的可靠运行,节约相关电力企业的运行管理成本。

2.4.2 劣势(W):灵活性资源成本上升

随着技术进步和规模化发展,风电、光伏上网环节已经可与化石能源竞争,但随着新能源比例的增大,系统平衡成本、安全保障成本将成为电力系统的成本增量。近年来,中国用电负荷峰谷差率持续扩大。结合国网能源研究院近期对“十四五”的相关分析,国网经营区的负荷增速将高于用电量增速,到2025 年,最大预测日峰谷差将达到 400 GW,最大日峰谷差率增至 35%。随着新能源渗透率的提升,系统需要增加更多的灵活性资源来满足运行和消纳要求;同时还需要增加电压支撑、惯量支撑和系统备用等,来应对高比例新能源发电并网带来的电压、频率以及特殊天气条件下的供电安全问题,可以说灵活性资源成本上升成为了制约新型电力系统发展的关键性问题。

2.4.3 机遇(O):市场交易机制与体系建设不断完善

在电力体制改革背景下,依托国家政策支持,中国电力市场建设稳步推进,绿色电力交易机制和市场体系建设初步形成,电力市场体系向多层次方向发展,中长期和辅助服务市场实现全覆盖。与此同时电力市场化交易机制也不断完善,充分发挥了市场资源配置的决定性作用。

2.4.4 威胁(T):缺乏市场化电价机制

近些年来,电价在大多数情况下均由政府确定,显然政府定价模式不能体现电力企业的真实成本,也很难根据市场供需变化进行动态调整,不利于电力企业发展。如何建立完全市场化下的电价机制,由市场来主导电价,是电力市场化建设面临的一大难题。

2.5 社会环境(S)

2.5.1 优势(S):用户需求催动电力系统多元化发展

随着社会不断进步,电力相关应用领域也随之逐渐拓展,用电需求也变得复杂多样,个性化和低碳化成为了新的消费理念,催动电力系统多元化发展,产业链和业务模式不断演变,从而满足多样化的用户用能需求。

2.5.2 劣势(W):能源分布不均衡

从中国的能源资源分布情况来看,西部地区以及东北地区地大物博,风光等新能源资源禀赋条件良好。据资料显示,86%的风能资源、96%的太阳能资源以及 81%的水能资源均分布在上述区域。而中东部地区能源分布较少;但是人口密集和工业生产区域较多,用能需求较大,占据全国约 2/3 的用电量,因此导致了能源分布的不均衡问题。西北地区的大型新能源基地与能源负荷需求大的区域相距较远,电能难以就地消纳,因此导致弃风、弃光现象的发生,制约新能源的发展。

2.5.3 机遇(O):终端用能领域电气化水平提升

随着社会的不断发展,总用电量不断增加,多元化用电设备不断涌现,第三产业和居民用电负荷不断攀升,负荷特性逐步向柔性、生产与消费兼具型转变,终端用能领域电气化水平不断提升,以电代油、以电代煤等方式能够帮助电力系统提升新能源消纳水平,为新型电力系统带来新的发展契机。

2.5.4 威胁(T):电力供应安全形势愈发严峻

现阶段国内能源供应相对紧张,煤炭、天然气等

能源价格持续上涨,再加上新能源本身出力的不确定性,导致部分地区电力供应紧张。未来一段时间,中国电力需求仍将持续增长,体现尖峰负荷特征。同时电力供应的可靠替代仍未形成,届时电力供应安全形势将愈发严峻,面临“双高”“双峰”等挑战,保障电力可靠供应难度大幅增加,导致部分时段部分地区电力供需紧张。

2.6　技术环境(T)

2.6.1　优势(S):电力电子技术和数字化技术的广泛应用

电力电子技术和数字化技术在能源电力系统日益广泛应用并深度融合,在此背景下,新能源、分布式电源、微电网纷纷加快发展进程。与此同时,电力技术水平持续提升,清洁能源装备制造产业链基本完备,一大批新技术、新模式、新业态蓬勃兴起。

2.6.2　劣势(W):科技创新能力亟需提升

现阶段电力核心技术装备国产化水平相比国外先进水平仍然处于落后状态,科技创新能力亟需提升。中国在能源电力领域已形成完整供应链和产业链,但同其他能源电力科技强国相比仍存在一些不足,新型核电、高温材料等核心技术装备长期被国外垄断,支撑新型电力系统构建的“卡脖子”技术和核心装备亟需攻关突破。

2.6.3　机遇(O):新型电力系统相关技术加速演变

能源电力与信息技术的深度融合,将为能源互联网产业的发展提供技术支撑。在电网科技创新领域,相关技术正在加速演变发展。未来新型电力系统要加快开展新能源友好并网、电力系统仿真分析及安全高效运行等关键技术装备的集中攻关和示范试验,以支撑大规模高比例新能源并网、保障电网安全稳定运行和促进电网数字化转型升级,为促进相关产业升级与开拓国际市场带来更多推动与支持[16]。

2.6.4　威胁(T):系统调节能力不足制约发展

随着可再生能源的大量接入,电力系统平衡调节能力亟待增强。新能源间歇性等特点能够快速消耗电力系统灵活调节资源,使电力系统调节能力面临掣肘。全国新能源利用率总体保持较高水平,但局部地区仍存在弃风、弃光现象,2023 年 1—4 月,蒙东地区弃风率为 14.1%,青海弃光率为 5.4%。未来,新能源大规模高比例发展对系统调节能力提出了巨大需求,区域性新能源高效消纳风险增大,制约新能源高效利用,阻碍了新型电力系统的发展。

3　新型电力系统发展战略

通过 PEST-SWOT 分析,可以看出新型电力系统发展过程中在政治、经济、社会和技术环境下,存在着优势和机遇,但同时也面临着诸多难题和挑战。下面遵循利用优势、克服劣势、把握机遇、化解威胁的原则,面对不同情境提出针对性发展战略,为构建新型电力系统提供理论支撑与实践指导。对应发展战略及应对措施如图 1 所示。

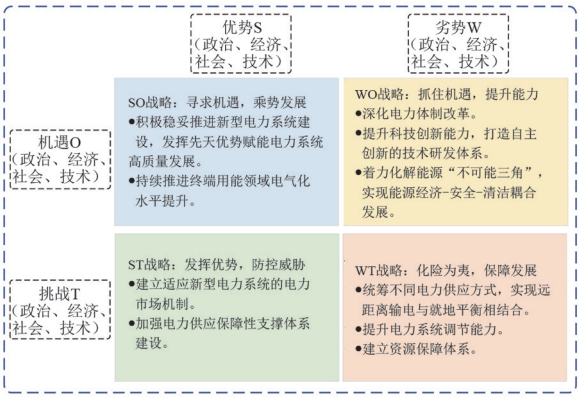


图 1　基于 PEST-SWOT 分析的新型电力系统发展战略

3.1　SO 战略:寻求机遇,乘势发展

在 SO 战略下,内外部形势良好,应采取积极的发展战略,利用政策、技术等现有优势条件,扬长避短,同时抓住市场交易体系不断完善等发展机遇并寻求现有形势下新的发展机遇。

1)积极稳妥推进新型电力系统建设,发挥先天优势赋能电力系统高质量发展

现阶段新型电力系统发展具备优势,同时也面临着诸多发展机遇。随着相关政策方案和体制机制逐步健全,可以预料到未来新型电力系统将具备良好的政策前景。政府承担着制定新型电力系统发展战略的重要责任,同时政府强有力的资金支持也是新型电力系统建设项目落地的关键。新形势下,应由中央政府设计新型电力系统建设的总体框架,地方政府制定适合自身资源禀赋及发展要求的地区差异化发展战略。政府层面应同时围绕高比例可再生能源、源网荷储互动环境下的电力系统安全稳定运行,远近结合、科学谋划电力系统转型的发展方向和路径,统筹规划、建设、运行、市场、科研等各项工作,建立稳定的管理体系。

2)持续推进终端用能领域电气化水平提升

为了实现“双碳”目标,需要改变消费者的能源消费习惯,提升电能占终端能源消费比例。预计到2025 年,电能占终端能源消费比例要达到 35%以上,力求减少 4.8×10^8 t 左右的二氧化碳排放量。现阶段,需要积极挖掘需求侧灵活性资源潜力,推进智慧能源城市、智慧能源小区建设;提高用户侧电制氢、电供暖、电动汽车充电等设施负荷灵活性;鼓励用户侧以电代替其他能源,利用市场手段调整用电需求,抑制不合理的能源消费。

3.2 WO 战略:抓住机遇,提升能力

在 WO 战略下,自身处于劣势,但同时外部存在发展机遇,新型电力系统应在弥补自身劣势的同时,抓住外部机遇,加快发展进程。

1)深化电力体制改革

针对中国电力系统体制机制现存问题,以适应新型电力系统为目标导向,深化电力体制改革。首先,要健全统一多层次市场体系,推进省、区、市以及区域电力市场建设,加强不同类型市场间的衔接程度;其次,加强交易品种之间衔接,完善中长期和辅助服务市场,积极推进现货市场建设;然后,推进市场主体多元化发展,制定并完善新兴市场主体参与市场机制体系;最后,推进治理能力与治理体系现代化,加强电力统筹规划和电力监管,持续加快电力法律法规修订工作。

2)提升科技创新能力,打造自主创新的技术研发体系

高质量建设国家实验室,充分发挥大型国有企业技术创新龙头作用,建立工程技术研究中心、国家能源研发创新平台,完善科技创新考核和激励机制,支撑新型电力系统建设所需的关键技术和“卡脖子”技术攻关研发。强化科技研发的多向整合,推进跨领域、跨行业协同创新,推进新型电力系统与其他领域“跨界融合”的发展。

3)着力化解能源“不可能三角”,实现能源经济-安全-清洁耦合发展

安全性、经济性、清洁性作为能源的重要属性,三者之间属于辩证统一的关系。“双碳”目标下,安全稳定、经济可行、清洁低碳是实现可持续发展的关键方向,决定了“不可能三角”问题或将长期存在。为实现能源经济-安全-清洁的耦合发展,首先,需要根据不同时期的发展阶段和政策目标协调处理三者关系,依靠相关技术进步和体制机制的创新,见招拆招,先解决安全性和经济性问题,再解决低碳环保问题,实现不断提升破解相关难题;然后,需要着重构建现代能源体系,强化供应链的安全与稳定,提升能源产业链现代化水平,同时推动能源结构绿色低碳转型;最后,也需要有为政府和有效市场引领,发挥好政府政策引导作用,通过市场化高效配置能源。

3.3 ST 战略:发挥优势,防控威胁

在 ST 战略下,新型电力系统的发展应充分利用自身优势,同时寻找新的发展机遇,防控外部威胁。

1)建立适应新型电力系统的电力市场机制

现阶段绿色电力交易机制和市场体系建设持续发展,应抓住当前机遇,不断完善新型电力系统中的市场机制。积极探索不同市场类型和交易机制的差异,在电能市场建设方面,设计完善双边交易规则与跨区域交易规则,研究现货市场交易机制;在辅助服务市场建设方面,完善需求侧响应机制;在碳市场建设方面,丰富碳市场交易品种和交易方式,设计合理的碳市场机制。同时稳步推进各项电价改革,提高消费者积极性,优化市场结构,创造出公平透明的电价市场环境。

2)加强电力供应保障性支撑体系建设

面对电力供应安全形势愈发严峻的威胁,应加强电力供应保障性支撑体系建设,统筹绿色与安全,推动保障性支撑电源建设,大力发展常规水电、气电、核电,推动煤电清洁低碳发展、优化发展布局,依托技术创新提升新能源可靠替代能力,构建多元化电力供应体系。

3.4 WT 战略:化险为夷,保障发展

在 WT 战略下,内外部形势较为严峻,需要在解决中国能源分布不平衡等劣势、提升系统平衡调节能力规避风险的同时,采取政策、技术等保障措施保证新型电力系统的正常发展。

1)统筹不同电力供应方式,实现远距离输电与就地平衡相结合

中国现阶段能源分布不均衡的问题严重阻碍了新能源的发展,导致部分地区弃风、弃光现象频发。在此背景下西北地区需要提升新能源就地消纳水平,同时不断优化输电通道配套电源结构,持续提升清洁能源电量比例。东、中部地区要加强受端交流网架建设,为跨省跨区通道提供坚强网架支撑,依托省区外电力与本地电源共同满足新增电力需求,最终实现“电从远方来”与“电从身边来”相辅相成,远距离输电与就地平衡相结合。

2)提升电力系统平衡调节能力

提升系统调节能力是实现新能源大规模消纳的必要条件。未来较长一段时间内,结合潜力规模和经济性来看,应以火电灵活性改造、抽水蓄能电站、电化学储能、可调节负荷为主次,加快提升电力系统平衡调节能力。

3)建立资源保障体系

全面推进新型电力系统建设必须基于完备的资源保障体系,需要从政策、资金及技术 3 个方面考虑。在政策保障方面,需要从规划建设、运行消纳等方面加强新能源政策体系顶层设计,完善电力市场机制体系,完善先进高效的电力行业治理体系,完善政策保障;在资金保障方面,加快新能源补贴退坡,推动新能源平价上网,完善投融资和财税政策体系;在技术保障方面,应推动电力系统源网荷储各环节技术水平升级,重点从源网荷储各环节挖掘技术发展潜力,推动新型电力系统快速发展。

4　结　论

落实“双碳”目标,构建新型电力系统是时代赋予的责任和使命,电力行业责任重大。上面深入研究分析了新型电力系统发展现状以及内涵,并基于 PEST-SWOT 理论从宏观、微观环境两个层次对中国新型电力系统领域进行了分析探讨,研究发现新型电力系统内部和外部环境既有优势也有劣势,在进行策略抉择时,应充分发挥其优势,弥补自身劣势,防控或消除其负面效应,促进新型电力系统稳步发展。

整体来看,新型电力系统构建需要考虑内外部环境,从政治、经济、社会、技术多层次共同推进。在政治层面,需要完善相关政策方案和体制机制,发挥政府政策引领作用,推动源网荷储规划同步进行,远近结合、科学谋划电力系统转型的发展方向和路径;在经济层面,需要深化电力体制改革,推动构建全国统一电力市场体系,完善中长期和辅助服务市场,积极推进现货市场建设,通过市场化高效配置能源,体现经济性;在社会层面,应统筹不同电力供应方式,实现远距离输电与就地平衡相结合,解决能源分布不均衡问题,同时加强电力供应保障性支撑体系建设,构建多元化电力供应体系;在技术层面,应提升科技创新能力,打造自主创新的技术研发体系,支撑新型电力系统建设所需的关键技术和“卡脖子”技术攻关研发。此外,考虑到新型电力系统的建设过程是一项长期复杂的系统工程,在后续研究中应继续深入研究电力系统灵活性资源、新能源大基地特高压建设等新领域,从更多角度深入分析研判新型电力系统发展路径。

参考文献

[1] 庄贵阳.我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J].人民论坛,2021(18):50-53.

[2] 张英杰.构建以新能源为主体的新型电力系统的发展路径研究[J].电工技术,2022(18):172-174.

[3] 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.

[4] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].中国电机工程学报, 2021,41(S1):28-51.

[5] 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.

[6] 舒印彪, 陈国平, 贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.

[7] 赵剑波,王蕾.“十四五”构建以新能源为主体的新型电力系统[J].中国能源,2021,43(5):17-21.

[8] 张金平,周强,王定美,等.“双碳”目标下新型电力系统发展路径研究[J].华电技术,2021,43(12):46-51.

[9] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等.新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J].电网技术,2022,46(3):821-833.

[10] 黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J].中国电机工程学报,2023,43(2):555-581.

[11] 黎静华,谢育天,曾鸿宇,等.不确定优化调度研究综述及其在新型电力系统中的应用探讨[J].高电压技术,2022,48(9):3447-3464.

[12] 盛戈皞,钱勇,罗林根,等.面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J].高电压技术,2021,47(9):3072-3084.

[13] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等.新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(1):158-169.

[14] 周劼英,张晓,邵立嵩,等.新型电力系统网络安全防护挑战与展望[J].电力系统自动化,2023,47(8):15-24.

[15] HUANG Yanling, CHEN Jialin. Analysis of Development

of "Blockchain Technology + Supply Chain Finance" Based on PEST-SWOT Model[J]. Academic Journal of Business & Management,2023,5(8):27-33.

[16] 张传远,赵久勇,王光磊, 等.新型电力系统的新能源挑战和数字化技术研究[J].科技与创新,2023(10):7-10.

作者简介:

栗奕博(1999),男,硕士研究生,研究方向为综合能源、电力市场;

代清钊(1998),男,硕士研究生,研究方向为能源金融;

杨富麟(1998),男,硕士研究生,研究方向为储能;

孙　冬(1973),女,研究生导师,副教授,研究方向为能源金融;

张晓春(1972),女,研究生导师,副教授,研究方向为能源经济及可持续发展、电力市场理论与应用;

曾　博(1987),男,博士生导师,副教授,研究方向为综合能源系统优化规划、能源互联网等。

(收稿日期:2023-06-09)

(上接第 14 页)

[10] YANG Lin, JIANG Xiaolan, HAO Yanpeng, et al. Recognition of natural ice types on in-service glass insulators based on texture feature descriptor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(1):535-542.

[11] 张烨,冯玲,穆靖宇,等.输电线路绝缘子覆冰厚度图像识别算法[J].电力系统自动化,2016,40(21):195-202.

[12] 林刚,王波,彭辉, 等. 基于强泛化卷积神经网络的输电线路图像覆冰厚度辨识[J].中国电机工程学报,2018,38(11):3393-3401.

[13] WANG Bo, MA Fuqi, GE Leijiao, et al. Icing-EdgeNet: a pruning lightweight edge intelligent method of discriminative driving channel for ice thickness of transmission lines [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12

[14] HE Lifu, LUO Jing, ZHOU Xiudong, A novel deep learning model for transmission line icing thickness prediction[C]. 2021 IEEE 5th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), IEEE, 2021:733-738.

[15] DAN Handong, HU Bo, SHEN Xiang, et al, Prediction model for transmission line icing thickness based on ISSA-WNN[C]. 2022 5th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering (AEMCSE), IEEE, 2022:338-342.

[16] SUN Wei, WANG Caifei. Staged icing forecasting of power transmission lines based on icing cycle and improved extreme learning machine [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,208:1384-1392.

[17] 张思建,林志赟,颜钢锋.基于电容传感器的架空输电线覆冰厚度检测方法[J].电力系统自动化,2011,35(17):99-102.

[18] 马国明,李成榕,蒋建,等.架空输电线路覆冰监测用光纤光栅风速传感器的研制[J].中国电机工程学报,2011,31(13):128-134.

[19] BARAT Adil, GUO Qingrui, FAN Fangjun, et. al. Analysis and design of transmission line icing monitoring system based on optical fiber sensing[C]. 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), IEEE, 2022:1846-1849.

[20] WEI Jie, HAO Yanpeng, FU Yuan, et al. Experimental study on glaze icing detection of 110 kV composite insulators using fiber Bragg gratings[J]. Sensors, 2020, 20(7):1834.

[21] HE Ling, YI Jizhao, WANG Yanming, et al. Application research of transmission line icing monitoring based on optical fiber sensing technology[C]. 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), IEEE, 2022:1838-1842.

[22] SIEGL A, NEUMAYER M, BRETTERKLIEBER T. Fibre optical Ice sensing: sensor model and icing experiments for different ice types[C]//2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, 2020. DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9128617.

[23] 全国裸电线标准化技术委员会.圆线同心绞架空导线:GB/T 1179—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

作者简介:

吴天宝(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为输变电运检技术;

马小敏(1988),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网智能运检技术;

刘益岑(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘;

刘小江(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘;

庄　杰(1976),男,博士,副教授,研究方向为嵌入式 AI 系统、通信与信号处理。

(收稿日期:2023-06-02)

新型电力系统下储能技术的应用场景及商业模式研究

黄艾熹，王俐英，曾　鸣，祝金荣
（华北电力大学经济与管理学院，北京　102206）

摘　要：“双碳”目标的提出，对现有的能源体系产生了一定影响，传统能源体系需要向清洁、低碳方向进行转型与升级。储能技术是能源体系转型的重要支撑，能够进一步规避间歇性能源对电网的冲击，提高电力系统的经济性与安全性，提升电网运行的可靠性。针对新型电力系统下储能技术的应用场景及商业模式，结合当前能源发展要求与方向，深入探讨了储能技术的分类和特性，分析了储能技术在发、输、配、用电领域中的应用场景，并提出现阶段及未来可行的储能商业模式，从而推进电力行业绿色低碳高质量发展，确保能源体系转型下电网的安全稳定运行。

关键词：新型电力系统；储能技术；应用场景；商业模式
中图分类号：TM 464　**文献标志码：**A　**文章编号：**1003-6954(2024)01-0043-07
DOI：10.16527/j.issn.1003-6954.20240107

Research on Application Scenarios and Business Models of Energy Storage in New Power Systems

HUANG Aixi，WANG Liying，ZENG Ming，ZHU Jinrong
(School of Economics and Management，North China Electric Power University，Beijing 102206，China)

Abstract：The proposal of "dual carbon" goal has had a certain impact on the existing energy system，requiring the transformation and upgrading of the existing traditional energy system towards a clean and low-carbon direction. Energy storage is an important support for the transformation of energy system，which can further avoid the impact of intermittent energy on power grid，improve the economy and security of power system，and improve the reliability of power grid operation. Therefore，the development of energy storage is crucial. Based on the current energy development requirements and directions，the specific classifications and characteristics of energy storage are deeply discussed，the application scenarios of energy storage in the fields of power generation，transmission，distribution and consumption are analyzed，and a viable energy storage business model at the present stage and in the future is proposed，so as to promote the green，low-carbon and high-quality development of power industry and ensure the safe and stable operation of power grid under the transformation of energy system.

Key words：new power system；energy storage；application scenarios；business model

0　引　言

中国一直将能源安全作为维系国家社会和谐稳定、经济快速发展的关键战略性问题。以新能源为核心的新型电力系统，其多能互补的特征打破新能源发展瓶颈，其多态融合的特征打造了更多新场景、新业态，具多元互动特征的产消者进一步涌现。然而，随着集中式和分布式新能源的大规模并网，以及跨区域负荷的大量集结、新能源发电和消纳格局的巨大变化，传统调控方式已经很难满足新能源发电、消纳的需求。

当前，风电、光伏发电容量在电力系统中所占比例持续增加，大规模随机性电力的集中接入使得电网在功率平衡和稳定控制等方面的问题日益复杂，使电力系统的安全运行面临极大的挑战[1]。而具有快速响应能力的储能技术的接入能够有效实现电力系统在各种工况下功率和能量的平衡。储能技术的发展，对改善电网特性以及实现风电、光伏大规模并网有重要作用。截至 2022 年年底，全国已投运新

型储能项目装机规模达 8.70 TW[2]，比 2021 年年底增长 110%以上，未来还有逐渐上升的趋势。分省域来看，截至 2022 年年底，山东、广东等沿海城市以及宁夏、内蒙古等西北部沿海城市的储能项目建设如火如荼，累计装机规模和新增装机规模排名均排在全国前列[3]，在国家日益重视新能源建设的基础上，通过沿海以及西北内陆地区的以点带面，带动储能项目建设蓬勃发展。新的技术路线、技术创新层出不穷，但发展还有一些问题须解决，如：政策缺少长效机制，收益存在很大不确定性；储能电站成本居高不下；标准体系尚未形成等。

中国电网原储能模式以抽水蓄能为主，但其地理位置和调节能力均有限制，近几年的发展速度有所放缓[4-5]。发展具有适用范围广、适应性强等特点的新型储能，对于应对高比例可再生能源、高比例电器电子设备以及高比例分布式能源的新一代电网发挥着至关重要的作用。开展储能技术的发展及应用研究，对于匹配新型电力系统的建设进程，助力中国“双碳”目标的实现具有重要意义[6]。因此，下面对新型储能技术进行分类梳理，详细阐述其在电力系统发、输、配、用电领域的应用场景，并研究未来可行的储能商业模式。

1 储能技术分类及特性

储能的形式有很多种，根据能量的转换形式，储能可分为电气储能、电化学储能、热储能以及机械储能。

1.1 机械储能

1）抽水蓄能

抽水蓄能是一种将抽水和发电结合在一起，将势能和电能相互转化的能量储存方法。抽水蓄能电站的建设周期为 6～8 年；运行效率全站为 75%；成本为 0.15～0.25 元/kWh[7]。而其缺点在于建造受地理条件限制，具有合适落差的高低水库通常远离负荷中心。

2）压缩空气储能

压缩空气储能，工作原理是：利用电网的非高峰期，将空气压缩并储存在枯竭井、大型地下洞室、蓄水层里；在用电高峰期，以一种特殊构造的燃气涡轮机，释放储存的压缩空气进行发电。压缩空气蓄能系统具有运行周期长的特点。该系统建设、运营费用低廉，经济实用，安全可靠。但是，这种方法对储气库的选择有很大的限制，目前仅局限于试点项目，尚未达到广泛的商业可行性。

3）飞轮储能

飞轮储能是利用能量转换的原理，依靠电动机带动飞轮以高速度旋转储能，再利用旋转飞轮带动发电机发电，实现能量转换的储能方式。作为一种新型的物理储能方式，飞轮储能与传统化学电池相比，具备有以下特性：充放电迅速，整个系统的充/放电过程在极短时间内就可完成，飞轮储能系统效率约 90%[8]，工作效率较高。尽管飞轮具有潜在的应用场景，但由于能量密度低且价格昂贵，因此不适合在大型城区实现。

1.2 电磁储能

电磁储能包括超导磁储能及超级电容器储能，属于功率型储能技术。

1）超导磁储能

超导磁储能是一种利用超导线圈将电能转换为磁能进行储存，并在电网需要时迅速释放的储能方式，其功率输送的速度是极快的，可以达到毫秒级。鉴于其转换与循环的效率相对较高，具有较高的比容量及功率密度。

2）超级电容器储能

超级电容器具有循环效率高，能够快速充放电的特点。利用超级电容器储能具有高功率密度及高循环次数且工作温度限制少等优点，其特点是运行时间短、负载平稳、峰值电能质量好。但限制其应用的关键在于较低的能量密度、较高的自放电速率和较高的成本。

1.3 蓄热

蓄热是指通过相应的装置储存热力学能（热）。蓄热器主要是以水为载热体间接储蓄热的蒸汽，蓄热器中的水有两个作用，一是作为介质满足蒸汽和水进行热交换，二是作为储存热能的载热体。蓄热具有较低的体积能量密度，因此需要大容量才具有经济性。由于存在热量损失且无法长期储存热量，因此在空间有限的城市网格规模应用中，其有效性会降低。

1.4 电化学储能

化学储能通常是指电池储能，在储能效率、储放电速率及储能密度方面具一定的优势。目前在电网规模化应用中广泛采用铅酸电池、钠硫电池、锂电

池、液流电池,每一种都有不同的化学性质和市场成熟度。

1)铅酸电池

目前,铅酸电池在中国的后备电源行业得到最广泛的应用。铅酸电池优点为储能容量大,成本相对低廉,维护成本低;缺点为储能密度相对低、循环寿命较短、自放电率高,具有重金属污染,放电深度问题等。

2)锂电池

与铅酸电池相比,锂电池在充放电效率、安全性、能量密度方面都有很大的优势,可以采用串联和并联的方式实现高压和高容量。因此锂电池越来越成为储能应用的首选电池,并且由于其具有灵活的伸缩性,能够服务于小型微电网到大型能源存储系统等不同网格规模的电网和分布式应用。但是锂电池在使用寿命上还存在明显缺陷[10]。

3)钠硫电池

钠硫电池具有较高的能量密度和充放电效率,以及较低的运行成本、较小的占地面积且易于维护而备受关注。然而,钠硫电池存在放电深度低、循环寿命短等问题,且需在 300 ℃以上的高温条件下才能保证安全运行。

4)液流电池

液流电池具有高功率的输出,可以进行能量转换且传输安全稳定,可进行深度的放电与大电流放电,并不需要进行特殊保护。液流电池可用于稳定新能源发电的波动,辅助调峰;但是与其他成熟技术(如锂离子)相比,其能量密度差、占地面积大、成本高,使得液流电池在分布式应用中不太理想。

综上所述,将储能技术的分类及特性进行总结归类,如图 1 所示。

2　储能技术应用场景研究

截至 2023 年 8 月底,全国累计发电装机容量约为 2.76 TW,同比增长 11.9%。其中,太阳能发电装机容量约为 510 GW,同比增长 44.4%;风电装机容量约为 400 GW,同比增长 14.8%[11]。

可再生能源的大规模接入,加大了发电端出力的波动性,也对电网的承受能力提出挑战,新能源稳定并网需要配备调峰、调频装置,储能在其中将发挥至关重要的作用。

2021 年 7 月中国明确提出到 2025 年储能装机规模达到 30 GW 以上[12],随后出台了相关储能支持政策,确定了储能市场配置比例以及新型储能发展实施方案。中国储能市场日趋完善,集中式电站配置储能基本已成定势,未来分布式电站有望相应配置储能。随着 2021—2025 年风光装机容量的扩大,预计各地的储能保障政策会进一步扩容,推动储能规模的扩张和行业发展。

2.1　发电领域

从发电侧的角度看,储能的需求终端是发电企业。由于不同电源对电网的冲击程度不同,且负荷端的不确定性会造成源用动态失配,因此电源侧的储能需求场景呈现多样化,如平滑电源输出、负荷跟踪、系统调频等。

2.1.1　应用场景

1)平滑电源输出

运用储能技术,将发电厂低谷电量进行储存并在高峰时段释放,整体提高机组的利用率;根据新能源的发电特点,将新能源弃风、弃光时段的电量进行储存,在电网有需求时段释放,降低新能源弃风、弃

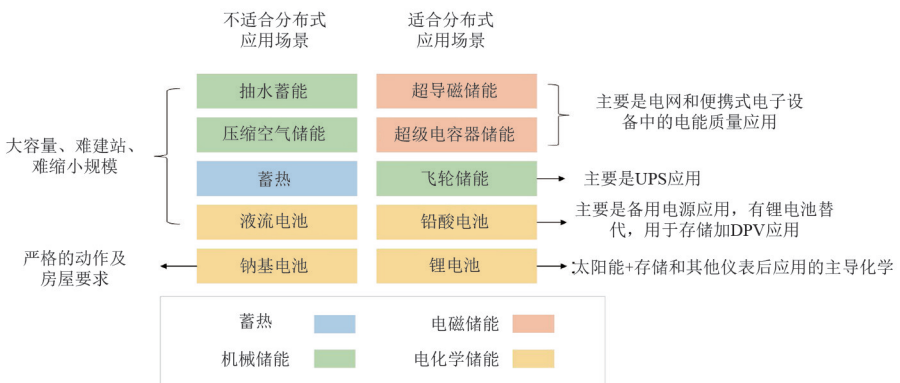


图 1　储能技术的分类及特性

光、弃水率等。通过毫秒级响应速度,储能系统可对光伏、风电等新能源进行跟踪计划出力,平滑电能输出功率,保证电网的功率平衡和运行安全,达到削峰填谷的目的。

同时,利用储能系装置削峰填谷后,可减少火电机组调峰成本。火电机组承担调峰任务时必须预留一定的发电容量,以满足对应的峰位负荷需求,这导致火电机组不能满发增加机组运行的额外成本。利用储能系装置削峰填谷后,可以减少负荷峰值,释放燃煤发电中一定容量的装置,提高燃煤发电的利用率和经济性。

2)负荷跟踪

负荷跟踪是通过调节储能输出功率,快速完成电网用电侧与发电侧的电能平衡,实现调峰运行的一种辅助服务。电力负荷根据发电机运行的实际情况细分为基本负荷和爬坡负荷。负荷跟踪则主要应用于爬坡负荷,合理地负荷跟踪调整就能让传统能源机组平稳过渡到调度指令水平。

3)系统调频

发电及用电设备想要持续稳定高效长久的运作,就必须把频率波动维持在一个稳定区间,因此频率调节至关重要。在传统能源结构中,电网短时间内的能量不平衡是由传统机组(主要是火电和水电)通过响应自动发电控制(automatical generation control,AGC)信号来进行调节的。由于传统能源电网无法应对新能源并网发电带来的电网调度问题等的挑战,也无法满足“双碳”下的电网需求。相比之下,储能装置由于响应快速、运行灵活,可以满足系统运行的调频需求而产生动态效益,成为适配新电网需求的调频资源。

2.1.2 发电侧储能配置要求

近年,各省在新增发电项目时对配置储能系统提出了要求,总体配储比例为新建装机容量的 5%~10%,连续放电时长为 2~4 h。除少数省份只对部分项目配储或鼓励性配储外,90%以上的地区都提出强制性配储要求,如表 1 所示。现实需求和政策推动是未来几年国内储能装机的主要驱动因素。

2.2 输配电领域

在输电领域中,利用储能技术实时配合电力负荷波动,可快速缓解负荷与发电之间的供需矛盾,通过快速的充放电实时调整频率波动。在稳定电压方面,储能技术能在电网有功功率变化时维持电压的稳定,可大幅提高电能质量。同时,通过储能技术可在输电阻塞的区域提供暂时的电能储存,助力消纳当地的可再生能源,缓解输电阻塞、减缓电网投资。储能技术在输配侧的应用场景主要为:

表 1 各地区配储要求

省级行政区	配置要求	省级行政区	配置要求
河北	10%	安徽	10%,1 h
山西	5%~20%	福建	10%
辽宁	10%~15%	江西	10%,1 h
吉林	部分,10%	山东	10%,2 h
江苏	鼓励	河南	10%,2 h
浙江	鼓励	湖北	10%
湖南	10%~20%,2 h	青海	10%,2 h
海南	10%	内蒙古	15%,2~4 h
贵州	10%	广西	5%~10%,2 h
云南	鼓励	宁夏	10%,2 h
陕西	10%~20%,2 h	天津	10%~15%
甘肃	5%~20%,2 h	新疆	10%~15%,2 h

资料来源:各地方政府网站,中国证券研究部

1)电网调峰:储能系统通过高储低放实现发电和用电解耦以及负荷灵活调节,达到削减负荷峰谷差,实现电力系统负荷水平控制和负荷转移等。

2)缓解输配电阻塞:安装在电网线路上游的储能系统,可以在电网线路阻塞时储存过剩的电能,后续当负荷不足时及时放电,补足缺少的容量。

3)延缓输配电设备扩容时间:对在高峰特定时段出现自身容量不足以支撑负荷水平时,客户侧储能可缓解用电缺口,既满足电网负荷侧的需求,也一定程度延缓配电网升级改造时间,推迟了输配电网的基础设施投资,有效减缓电网扩容速度。对有直流电源需求的用户,建设储能设备并与不间断电源组成联合装置,可实现正常供电,确保开关元件正常工作。

4)无功支持:无功支持是在发电侧和输配电侧提升电能质量的方式。在动态逆变器、通信和控制设备的帮助下,电池可以通过调节输出的无功功率来调节输配电线路的电压,确保电网线路的电压稳定、安全、可靠运行。

2.3 用户端的应用场景

将能量存储技术运用到用户端,能够达到节能降耗的目的。结合分时电价,用户利用储能设备在电价较低时存储、电价较高时释放电能,有效平抑峰谷负荷及电费。在用电容量方面,利用储能设备移

峰填谷,减少了变压器或其他输配电设施的最高负荷需求,降低了容量费用。

用户侧储能电站主要应用场景包括大用户峰谷差套利、促进分布式能源消纳、提升用能质量和参与需求响应等。大用户峰谷差套利是在利用峰谷电价差实现用户侧的盈利。微电网系统中有较大比例的分布式新能源电源,配置储能系统可以调节发电与负荷之间的平衡,最大化地利用可再生能源。提升用能质量的储能可以通过电力电子器件的控制,利用储能冗余容量改善生产过程中出现的功率因数低、电压不平衡等电能质量问题。需求响应储能系统通过高储低放参与需求响应,获得补贴或优惠电价。随着未来需求侧管理政策的完善,需求响应带来的效益也将进一步增加。

综上,储能技术在发、输、配、用电场景可简要汇总如图 2 所示。

3　储能技术可行商业模式研究

3.1　峰谷套利

峰谷套利是目前最主要最流行的商业模式,是根据峰谷分时电价,利用储能设备在谷时储能峰时释放,通过电价差除去转换损耗后获取收益。国家发改委在 2021 年印发的《关于进一步完善分时电价机制的通知》,明确提出:当系统峰谷差率大于 40% 的地方,峰谷电价差不得低于 4∶1,其余地区不得低于 3∶1;尖峰电价上浮比例不得低于 20%[13]。峰谷价差不断扩大,为储能型储能产业的规模化发展提供了条件。

储能系统参与一个完整充放电循环的峰谷套利收益为

$$E_{\mathrm{W}} = Q \cdot D_{\mathrm{OD}} \cdot (\eta^{\mathrm{dis}} p_t^{\mathrm{dis}} - \eta^{\mathrm{ch}} p_t^{\mathrm{ch}}) \tag{1}$$

式中:E_{W} 为储能电站峰、谷电价差套利收益,元;Q 为储能设施总容量,kWh;D_{OD} 为储能设施充放电深度,%;p_t^{dis}、p_t^{ch} 分别为 t 时刻的充、放电价格,元/kWh;η^{dis}、η^{ch} 为储能设备的放、充电效率,%。

3.2　辅助服务

随着新能源容量不断扩大,新能源系统的出力不稳定,风电、光伏等弱惯量系统对电网安全稳定影响较大。根据 2021 年的《电力辅助服务管理办法》提出了新的电力辅助服务内容,明确了转动惯量、快速频率响应等新型辅助服务;提出新型储能、电动汽车充电网络等新产业新业态也亟须市场化机制引导推动发展[14]。中国现阶段电力辅助服务市场的交易品种包括调频、调峰、AGC、无功调节、黑启动服务等多个品种。但目前仍处于建设初期,大部分省市多以调峰为主、调频为辅,最近 1~2 年,其他备用市场才逐步诞生。

3.2.1　调峰服务

储能调峰是指在电网有调峰需求时,储能电站根据自愿参与市场交易的原则,按照电力调度机构要求和指令储存和释放电力而提供的调峰服务。电力调度机构依据“按需调用、公平调度”原则,在保障电网安全运行前提下,按照社会成本最优化原则,电力调度机构应优先调用无偿及报价较低的储能资源。

储能调峰市场结算应综合考虑实时市场调用结果和市场成员实际执行情况等因素,实行日清月结。储能调峰辅助服务补偿费用计算周期为 15 min,补

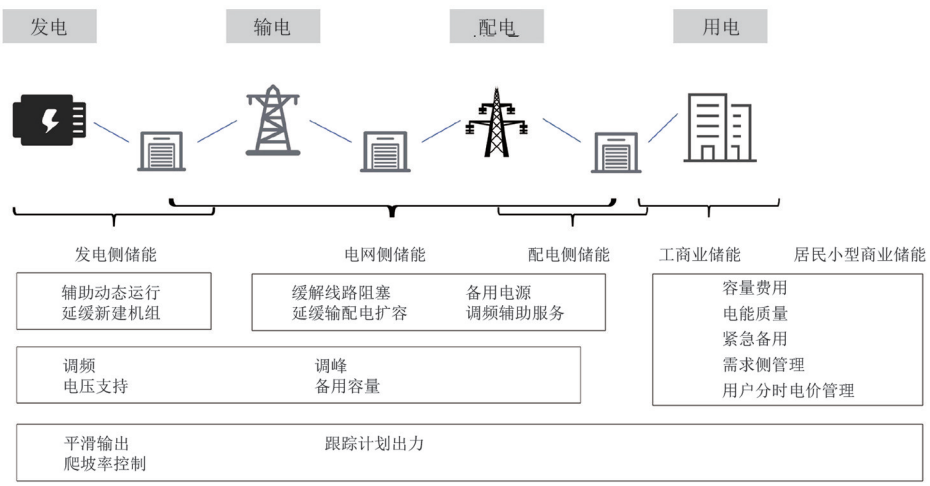


图 2　储能技术应用场景

偿电量为其计算周期内参与电网调峰的充电电量，补偿价格为出清结算价格，储能调峰补偿费用为补偿电量×补偿价格。市场初期，按照“日前报价、实时出清”交易机制，部分省份的储能依照火电机组第一档调峰辅助服务交易结算价格优先出清；部分省将储能参与调峰补偿价格报价上限暂按 0.3 元/kWh 执行，后期将根据市场发展情况适时调整。

3.2.2 调频服务

在电网频率偏差偏离目标频率时，并网主体通过协调调速系统、功率控制系统[15]，快速调整有功出力，减少电网频率偏差。调频已经成为许多电厂的重要收入来源之一。新型储能也被允许参与调频服务市场。目前，在许多地区，调频辅助服务已经成为储能电站重要的收益来源。

参照常规的电厂机组为标准，储能设备参与调节的收益为“容量补偿+里程补偿”，储能设备的调频收益为

$$R_{tp} = W_C + W_M \tag{2}$$

式中：W_C为储能容量收入；R_{tp}为调频收入；W_M为里程收入。

容量补偿按储蓄式调频容量确定并进行补偿，计算方式为

$$W_C = P_{AGC} F \times C_C \tag{3}$$

式中：P_{AGC}为储能调频控制时自动发电控制 AGC 上、下可调节容量，MW；C_C 为容量的月度补偿价格，元/(MW·月)。

里程补偿由调节性能、调节里程、市场出清价格决定，参与调频市场的市场主体可获得调频里程补偿。计算方法为

$$W_M = M_I \times M_F \times K \times C_F \tag{4}$$

式中：M_I 为调频市场服务费总盘子调节系数；M_F 为调频里程，MW/月；K 为调频性能综合指标，不大于 1，一般为 0.5~0.98；C_F 为市场出清价格，元/MW。

3.2.3 AGC 服务

AGC 服务是并网电源点提供的有偿辅助服务之一，电源点在规定的出力调整范围内，跟踪电力调度交易机构下发的指令，按照一定调节速率实时调整发电出力，满足电力系统频率要求的服务[16]。

1）调节容量补偿

各种 AGC 控制模式均可获得容量补偿费用。调节容量补偿费用与提供调节容量服务的供应量正相关，计算公式为

$$T_M = \sum_d T_d \times R \tag{5}$$

式中：T_M 为 AGC 容量服务供应量的月度累计补偿费用；T_d 为 d 日 AGC 容量服务供应量 $d=1,2,\cdots$；R 为调节容量补偿费用单价，元/ MWh。

T_d 为当日每个调度时段的容量服务供应量累计之和，未投入 AGC 的调度时段，其容量服务供应量为 0。调度时段的容量服务供应量＝调度时段征用的场站 AGC 调节容量(MW)×调度时间(h)，AGC 调节容量为场站当前出力点在 5 min 内向上可调容量与向下可调容量之和。

2）调节电量补偿

AGC 投调频控制模式时，调节电量补偿费用＝AGC 实际调节电量(MWh)×电量调节单价(元/ MWh)；AGC 投其他控制模式时，不对调节电量进行补偿。

4）无功调节

独立储能电站无功电压补偿分为向系统注入无功功率及吸收无功功率，分别计费。根据调度要求，独立储能电站遵照电压曲线调度指令，迟相功率因数低于 0.90 时多将无功功率注入系统，进相功率因数低于 0.97 时多吸收系统的无功功率。

对独立储能电站注入无功功率维持系统电压水平的服务供应量，按照无功调节单价 R_2 的标准进行补偿，R_2 一般为 1 元/(Mvar·h)；对独立储能电站吸收无功功率防止系统电压过高的服务供应量，按照 $15R_2$的标准补偿。。

3.3 **需量管理**

在大工业用户侧配置储能系统，当基本电价按照最大需量(一般取一个月中每 15 min 平均负荷的最大值)计价时，综合利用储能设备移峰填谷，可有效地减少负荷高峰峰值，降低需量电费，提高用户收益。

在部分分布式能源(如风电)自发自用余电上网模式下，通过储能装置低充高放可以提高该分布式能源的填峰作用，从而降低用户的电费支出[17]。需量控制的收益根据需量电费的计算方式不同主要分为以下两种：

1）需量申报方式：即用户每个月预先申报下个月的最大需量，然后再根据下个月的实际需量进行收费。

$$E_D = \begin{cases} D_{plan}P_D & D_{actual} \leqslant D_{plan} \\ D_{actual}P_D & D_{plan} \leqslant D_{actual} \leqslant 1.05D_{plan} \\ (2D_{actual} - 1.05D_{plan})P_D & D_{actual} \geqslant 1.05D_{plan} \end{cases} \tag{6}$$

式中:E_D 为月需量费用,元;D_{plan} 为核定需量,kW;D_{actual} 为实际需量,kW;P_D 为需量电价,元/kW。

2)按时收取方式:即电网根据实际使用情况收取需量费用,其计算公式为

$$E_D = D_{actual}P_D$$

4 结　论

储能技术可以实现风力光伏发电功率的平稳输出,消除昼夜峰谷差,为新能源发电提供调峰调频和备用容量辅助服务,确保新能源发电平稳、安全接入电网,有效降低弃风、弃光现象,在新型电力系统中有着很大的应用前景[18]。上面系统地将储能技术分类为机械储能、电磁储能、蓄热、电化学储能,并对各类储能技术的特性进行分析;同时,结合储能应用特点,分析了储能技术在电力系统中发、输、配、用 4 个环节的具体应用场景和作用;并针对国家“双碳”目标的实际要求,提出 3 种储能可行性的商业模式,给出了具体的收益计算方式,以期对储能系统建设的设备选型和工程应用提供有益的参考。

参考文献

[1] 王彩霞,时智勇,梁志峰,等.新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J].电力系统自动化, 2021, 45(16):37-48.

[2] 叶伟. 市场规模不断增长,技术路线百花齐放,储能产业驶入发展快车道[N].中国高新技术产业导报, 2023-04-17(12).

[3] 方彬楠,袁泽睿.截至 2022 年底全国已投运新型储能项目装机规模达 870 万千瓦 锂离子电池储能技术仍处于绝对主导地位[N].北京商报,2023-02-13(2).

[4] 余晓鹏,李晓萌,张忠,等. 抽蓄电站提供多时间尺度备用的优化策略[J].储能科学与技术, 2022, 11(2):573-582.

[5] 王虎. “双碳”目标下储能技术的发展及应用[J].电力与能源, 2022, 43(6):469-471.

[6] 保伟中,王一依,唐志军,等. 储能电站盈利模式及运营策略优化研究[J].电气技术与经济, 2022(5):36-39.

[7] 马骏毅,陈蕾,王弘法,等. 飞轮储能的特性及其研究状况[C]//2015 年江苏省城市供用电学术年会论文集.南京:江苏省城市供用电学术委员会, 2015:176-182.

[8] 董舟,王宁,李凯,等. 储能技术分类及市场需求分析[J].中国金属通报, 2019(11):181-182.

[9] Daniel Barbeau, Conor McKenna, Britta von Oesen, Colin Smith, Hua Fang, Himanshu Pande, Chris Billinger, Jessica Xiao. Key Value Drivers for Grid-Scale Merchant Storage [R]. CohnReznick Capital& Black & Veatch, https://www.cohnreznickcapital.com, 2022.

[10] 刘秋华,杨圣城,刘鑫. 分布式储能商业模式分析与展望[J].电力需求侧管理, 2023, 25(1):67-73.

[11] 梁谦刚. 需求旺盛风电光伏装机规模有望持续增长[N]. 证券时报,2023-09-27(A06).

[12] 佚名.国家发展改革委 国家能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见[J].电力设备管理,2021(7):16-17.

[13] 张振,陈思锦.完善分时电价机制 促进能源绿色低碳发展——国家发展改革委有关负责同志就《关于进一步完善分时电价机制的通知》答记者问[J].中国经贸导刊,2021(16):4-6.

[14] 曾鸣,王雨晴.提升电力系统综合调节能力 支撑新型电力系统建设——解读《电力并网运行管理规定》《电力辅助服务管理办法》[J].中国电力企业管理, 2022(1):8-10.

[15] EUROPEAN COMMISSION. Energy Storage-Underpinning a decarbonised and secure EU energy system [R]. EUROPEAN COMMISSION, 2023.

[16] Dawn M. Pinnock, Anthony J. Fiore. Strategic Guide to Deploying Energy Storage in NYC [R]. DCAS Energy Management, 2022.

[17] 戴安,岳萌萌,吴凯槟. 分布式光伏、储能应用价值及商业模式研究[J].工业加热, 2022, 51(10):61-64.

[18] 任畅翔,刘娇,谭杰仁. 源网荷侧新型储能商业模式及成本回收机制研究[J].南方能源建设, 2022, 9(4):94-102.

作者简介:

黄艾熹(1999),男,硕士研究生,研究方向为电力市场;

王俐英(1997),女,博士研究生,研究方向为综合能源系统、电力市场;

曾　鸣(1957),男,教授,研究方向为能源互联网、综合能源系统、需求响应与需求侧管理等;

祝金荣(1973),男,副教授,研究方向为能源市场、预测理论与方法等。

(收稿日期:2023-05-25)

大长度高压直流电缆中电荷的产生、测量及释放研究综述

王洁铭[1],刘巧珏[1],崔智桐[2],蔡致坤[3],胡武生[4]

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106;2. 台达电子企业管理(上海)有限公司,上海 201209;
3. 上海华为技术有限公司,上海 201206;4. 国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 211100)

摘 要:碳减排作为能源转型的核心驱动力之一,能够有效促进清洁能源发展,缓解全球温室效应。在全球能源互联网发展的背景之下,用于长距离、跨地区输电的大长度直流电缆在电力互联网中占据着重要地位。同时,直流电缆工作时间较长,维护工作较为困难,而电缆中又不可避免会出现电荷积累问题,其中的残余电荷将威胁电缆的安全运行,降低电缆的使用寿命,甚至可能造成电缆故障。因此,有必要对大长度直流电缆的电荷问题开展相关研究。从直流电缆中电荷的产生、测量和释放 3 个方面进行概述,总结了近年来相关研究中的热点问题,对未来热门研究方向给出参考。所做研究对大长度直流电缆的在线监测和寿命评估均具有重要的指导意义。

关键词:高压直流电缆; 老化; 空间电荷; 表面电荷

中图分类号:TM 851 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2024)01-0050-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240108

Review on Charge Generation, Measurement and Dissipation in Large-length HVDC Cable

WANG Jieming[1], LIU Qiaojue[1], CUI Zhitong[2], CAI Zhikun[3], HU Wusheng[4]

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, Jiangsu, China; 2. Delta Electronics (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201209, China;
3. Shanghai Huawei Technologies Co., Ltd., Shanghai 201206, China;
4. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: Carbon emission reduction, as one of the core drivers of energy transformation, can effectively promote clean energy development and mitigate global greenhouse effect. In the context of the development of global energy internet, large-length HVDC cables for long-distance and cross-regional power transmission occupy an essential position in power internet. However, the accumulation of electric charges in large-length HVDC cables is inevitable, and would threaten the safe operation of cables, reduce their service life and might even cause insulation fault. Therefore, it is necessary to study the electric charges in large-length HVDC cables. A brief overview of electric charge generation, measurement and release in HVDC cables is provided, and the important research issues in recent years are summarized, which has important guiding significance for both online monitoring and life assessment of large-length HVDC cables.

Key words: HVDC cables; ageing; space charge; surface charge

0 引 言

随着化石燃料资源日益紧张,环境污染问题愈发显著,可持续发展已经成为世界能源发展的主题。2016年,中国提出了构建全球能源互联网的倡议,即在国与国之间的电能互补基础上,构建一个多能协调、资源优化配置的全球性平台。大长度直流电缆因其传输能量大,可实现长距离跨区域输电的优势,在能源互联网输电工程中占据着重要地位[1-2]。随着海上新能源的开发,大长度直流海底电缆在直流输电领域的地位也逐渐提升[3],已成为近年来国内外研究热点。

大长度直流电缆在运行过程中,电荷是威胁其

基金项目:中央高校基本科研业务费项目(NS2023013);国家自然科学基金青年项目(51907089);江苏省自然科学基金青年项目(BK20190421)

安全可靠运行的关键因素之一。电荷会造成直流电缆的绝缘老化、使用寿命缩短[4],甚至可能造成线路故障,对电力系统造成巨大危害[5]。通常,电荷聚集初期容易造成电缆老化,而温度、充放电次数以及使用时间都是电缆老化的影响因素。研究表明,随着温度的升高,电缆的击穿强度下降,电荷积聚程度提高[6];多次充放电形成的电老化会使电缆绝缘产生更深层次的陷阱,进而更加剧了电荷的积累[7]。同理,随着电缆使用时间的增加,绝缘热氧化老化程度增加,绝缘结晶度降低,从而导致陷阱深度的增加[8]。

当电荷积聚到一定程度后,还有可能发生局部放电,甚至导致电缆出现运行故障。通常,当电荷积聚造成局部场强提高到正常场强的数十倍时,不仅会出现局部放电现象,还会造成不可逆的树枝状绝缘劣化,并进一步加剧电荷积聚。当局部电场强度超过介质的击穿场强时,亦或局部电场与其他附加电场或外施工频电场叠加时,都会造成绝缘击穿,进而引发电力事故[9]。

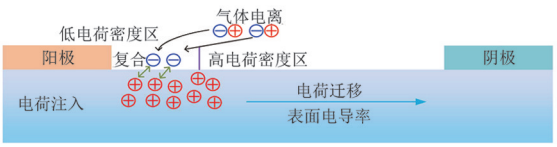
综上所述,电缆长时间运行不可避免会出现电荷积累及绝缘老化,而电荷积累反过来又会加剧老化。因此,如何减少电荷积累、准确测量并且及时采取措施释放残留电荷,对于保障大长度直流电缆的安全运行、延长电缆使用寿命至关重要。基于近年来国内外研究学者所取得的研究成果,下面将从电荷的产生机理、测量方法及电荷释放三方面进行综述,并对未来大长度直流电缆的研究方向进行探讨。

1　电荷产生机理

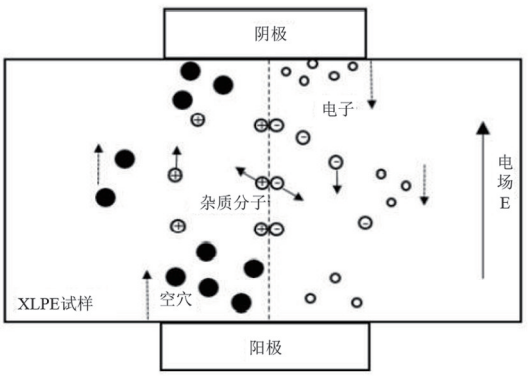
通常,在大长度直流电缆中存在的电荷包括表面电荷和空间电荷,其中,表面电荷一般分布在绝缘层的外表面[10],空间电荷一般存在于绝缘材料内部的杂质附近[11]。

电缆绝缘中产生表面电荷的途径可分为接触式和非接触式。其中,接触式主要是指由金属电极向材料表面注入电荷以及绝缘材料和气隙之间摩擦产生电荷;非接触式主要是指由电晕放电产生的带电粒子的迁移和积聚[12]。固体绝缘中表面电荷的形成机理如图 1(a)所示[13]。当绝缘材料受到高压电极极化后,电荷被注入在绝缘表面,这些电荷在切向电场的作用下向低压电极移动。开始时高压电极附近电荷量较大,当绝缘周围气体发生电离时,气体电离产生的负离子会中和电极附近的部分电荷,使远离电极处的电荷残留在绝缘表面。

电缆绝缘内部空间电荷来源主要包括两种,如图 1(b)所示[14]:一种是场致发射的载流子被绝缘中的陷阱捕获所形成的空间电荷,也被称为同极性电荷;另一种是在电场较低的情况下,绝缘材料内部的杂质电离后产生离子,而离子迁移后形成空间电荷,这类电荷也被称为异极性电荷。



(a) 表面电荷积聚机理

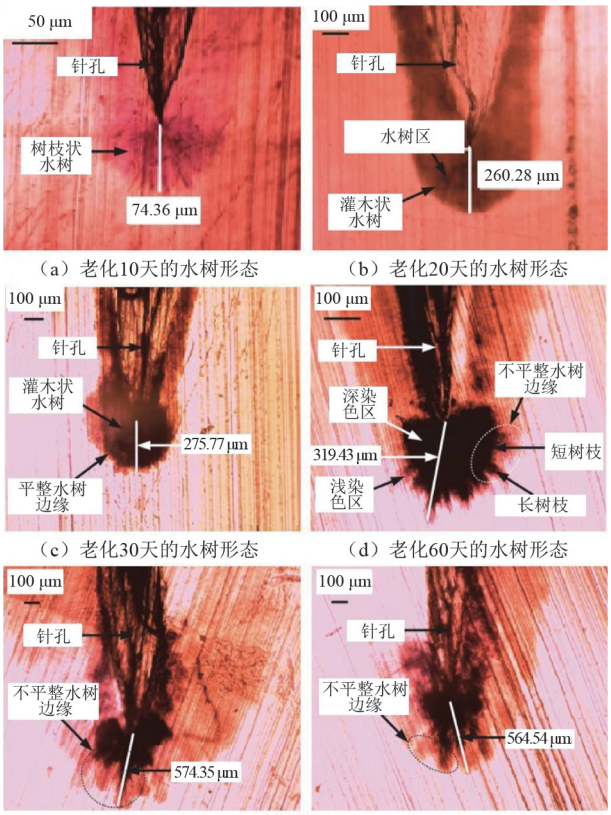


(b) 绝缘内部空间电荷形成

图 1　固体绝缘中的表面电荷和空间电荷

通常,空间电荷产生于靠近电极的位置,随着电缆运行时间的增加,绝缘材料的结晶度逐渐降低,陷阱能量密度逐渐增加,这时空间电荷会残留在电缆绝缘内部而非靠近电极[15]。电荷陷阱的形成原因主要包括运行过程中电缆绝缘的物理变化和受热发生的化学变化,杂质、介质聚合物链的断裂、不同原子组合成新的化学键以及运行过程中形成的绝缘水树枝等都会吸附周围环境中的电荷[16]。其中,水树枝在电缆运行过程中是不可避免的,主要和电缆长时间运行达到的老化程度有关,并且这个过程是不可逆的。文献[17]通过对带有针孔缺陷的交联聚乙烯(cross-linked polyethylene,XLPE)绝缘电缆反复充放电进行加速老化,观察到不同老化时间绝缘水树枝形态,如图 2 所示。该研究发现,电缆内部由于电老化造成水树面积不断增大,每次充放电都会造成空间电荷残留在水树枝中,导致水树部分的电场发生畸变,会吸引更多的电荷聚集,造成空间电荷的积累加剧。

此外,直流电缆内部空间电荷的积聚和电缆运



（a）老化10天的水树形态　（b）老化20天的水树形态

（c）老化30天的水树形态　（d）老化60天的水树形态

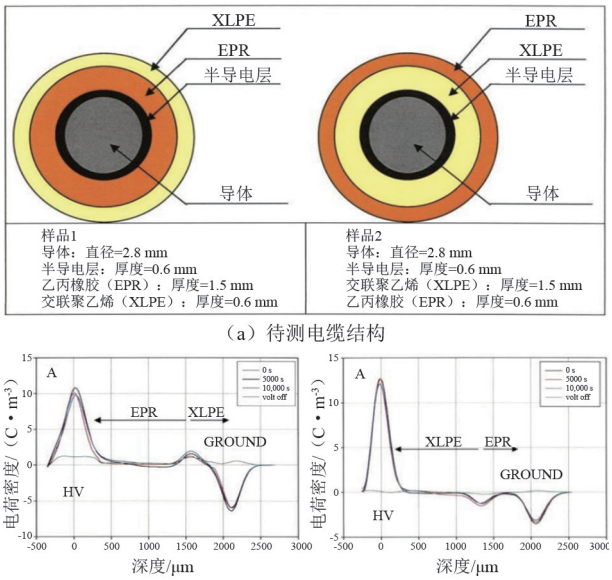
（e）老化90天的水树形态

图 2　不同老化时期的绝缘水树形态[17]

行时的环境温度有关，不同温度下空间电荷的积聚现象不同。文献[18]的研究表明，空间电荷积聚和电荷迁移率有关，在运行初始阶段由于外部环境温度较低，电荷迁移率很低，容易出现空间电荷包，空间电荷大量积累；而当电缆运行一段时间后，环境温度升高，此时电荷迁移率增加，空间电荷包数量减少，积累的空间电荷也会相应地减少。

最后，在不同绝缘介质的交界面将会出现空间电荷积聚现象。根据 Maxwell-Wagner 理论，这种现象主要是由介电常数与电导率之比（ε_r/ρ）不连续造成的。该比值越大，空间电荷积累程度就越大[19-20]，这也对电缆的制造、加工工艺提出了更高要求。

通常，电缆与电缆附件的交界面处 ε_r/ρ 最大，空间电荷积累最严重，因此主绝缘和附件之间的配合是抑制空间电荷的关键[21]。文献[22]研究了多种绝缘材料复合电缆的界面空间电荷特性，所用的两种绝缘材料复合电缆截面及各自在 25 ℃下的空间电荷分布如图 3 所示。结果表明，造成空间电荷在不同材料界面处聚集的原因是界面处的电场畸变，其本质是两种材料的电导率和相对介电常数存在差异。由于电缆的老化不可避免且不可逆，以目前的技术水平无法限制绝缘陷阱吸附电荷，只能采取技术手段改善空间电荷积累程度。



（a）待测电缆结构

（b）样品1中的空间电荷分布　（c）样品2中的空间电荷分布

图 3　电缆样品的空间电荷分布（25 ℃、29 kV/mm）[22]

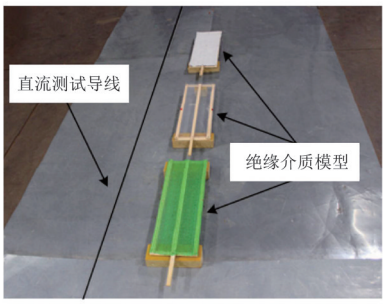
综上所述，虽然表面电荷和空间电荷在位置和成因上有所差别，但是二者之间也有如下共同点：首先，在实际高压直流电缆的运行中，电荷的产生是不可避免的；其次，电荷的产生与电缆的运行状态、所处的电磁环境、温度等因素息息相关。因此，为了避免电缆中的电荷造成不必要的危害，准确测量电荷量并及时消散电荷是至关重要的。

2　电荷测量方法

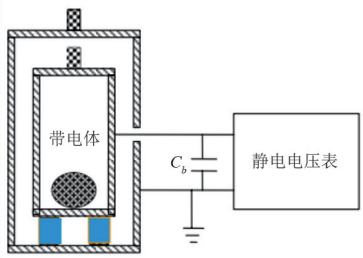
2.1　总电荷测量方法

总电荷一般是指单位长度电缆所积累的电荷量，反映了整根电缆中剩余的电荷总量，包括空间电荷量和表面电荷量。通常，表面电荷分布相对均匀，可以通过感应法进行测量。文献[23]基于电磁感应原理，采用法拉第笼测量了直流导线通电后 3 种绝缘材料表面电荷量，得到了不同绝缘材料对电荷捕获能力的差异，实验装置和测量原理如图 4 所示。该方法虽然具有原理简单、计算方便等优点，但也有局限性。面对大尺寸的高压直流电缆，法拉第笼尺寸受限，且由于每段电缆工作环境存在差异，测量结果不能反映电缆运行时的实际带电程度。

对于空间电荷来说，可以采用热刺激电流法（thermally stimulated current，TSC）进行测量，该方法广泛应用于绝缘材料的极化程度和陷阱能级测



（a）实验装置



（b）法拉第笼测量原理

图 4　感应法测量表面电荷的装置及原理[23]

量[24]。TSC 法测量空间电荷量的原理是利用温度刺激使被俘获在绝缘陷阱的空间电荷释放出来,再通过测量迁移电流获得空间电荷量。实际测量中,一般先测量待测绝缘材料受激发的去极化电流,再对电流-温度曲线图积分得到所测试样的空间电荷量[25]。TSC 测试系统原理如图 5 所示[26],先闭合开关 S_1 使试样极化,极化完成后迅速将试样冷却;待冷却完毕后断开开关 S_1,闭合开关 S_2,同时对试样进行升温并测量短路电流,电流计外接计算机,利用温度和电流数据得到 TSC 曲线。该方法的优点是简单实用,但是由于通过实验测到的电流不仅包含脱陷电荷所形成的电流,还包含偶极子和界面极化电荷所形成的电流,因此无法精准测量绝缘内部的空间电荷量。

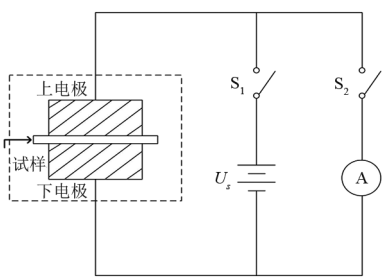


图 5　TSC 测试系统原理[26]

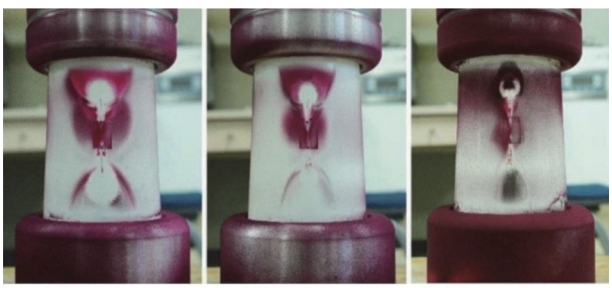
2.2　电荷密度的测量

相比于总电荷测量,电荷密度测量更关注于局部电荷聚集的程度,在工程应用中具有十分重要的地位。电荷密度的测量分为表面电荷的测量和空间电荷的测量。固体绝缘中表面电荷的测量方法主要是表面电位计法和粉末图形法,二者对比如表 1 所示。其中,表面电位计法是使用静电计利用高斯定理进行电荷测量[27],表面电位计包括静电容静电计、动电容静电计、反馈式静电计[28]。粉末图形法基于电荷异性相吸原理,将混合后的白色滑石粉和红色过氧化铁粉末撒在介质表面,振动后形成电荷图像[29]。1978 年,N.Ando 在通电后的电缆截面喷洒粉末,得到了 XLPE 绝缘电缆截面的电荷分布情况[30]。

表 1　表面电荷测量方法特点

方法	优点	缺点
表面电位计法	操作简单 平台搭建方便	存在电荷泄露问题 测量精度低
粉末图形法	实验装置简单 测量结果直观 可操作性强	对电缆绝缘的表面电荷无法进行在线测量

由表 1 可知,利用表面电位计和粉末图对电缆表面电荷密度测量均存在局限性。为了保证较高的测量精度,表面电位计在操作时应保证介质和电极表面良好接触。粉末图形法在测量时会对电缆造成破坏,无法做到对电缆电荷分布的实时监测,但是该方法经过改进,在其他电力设备的表面电荷测量中得到应用。文献[31]对在不同绝缘气体和气压下工作的带电绝缘子喷洒粉末,观测到绝缘表面的电荷积聚现象,同时也观察到绝缘子表面的电场畸变现象,如图 6 所示。



（a）N_2, 0 MPa　（b）N_2, 0.2 MPa　（c）SF_6, 0 MPa

图 6　粉末图形法测量绝缘子表面电荷分布

在测量电缆内部空间电荷方面,当前主流方法是压力波法、电声脉冲法以及热脉冲法。其中,压力波法使用阶跃压力波或脉冲压力波进行测量,利用压力波在介质中不均匀变化产生开路电压或短路电流,间接获得空间电荷密度;该方法要求前置放大器和主放大器频带宽、噪声低、分辨率高、信号畸变小[32]。电声脉冲法是在试样上外加直流矩形脉冲,使介质-电极交界面产生应力脉冲波,最后通过压

电换能器接收声信号以计算空间电荷密度分布[33]。热脉冲法基本原理与压力波法相同，利用光脉冲照射金属电极会产生热脉冲，在脉冲传播时产生不均匀变化，检测电路中产生的电压或电流信号[34]。

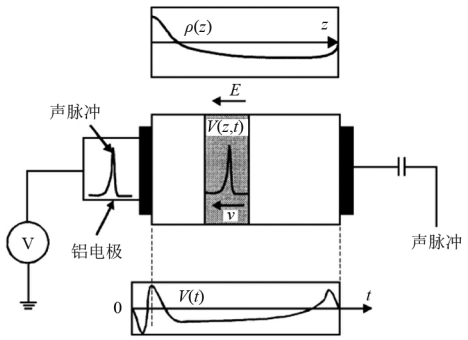
3 种测量方法的特点如表 2 所示[35-37]。由表 2 可知，相较于热脉冲法，电声脉冲法和压力波法的精确度更高，且不会对样品造成破坏，在测量时满足相关要求即可获得准确的空间电荷分布。而热脉冲法在操作和数据处理方面还存在不足之处，仍需要改进。因此，电声脉冲法和压力波法是当前应用最广泛的两种电荷测量方法。文献[38]利用电声脉冲法和压力波法对规格相同的电缆中的空间电荷进行测量，原理如图 7 所示。通过实验对比可知，电声脉冲法测量空间电荷的信号微弱，高温下电缆空间电荷测量困难；压力波法测量空间电荷的信号较强，适合于厚电缆绝缘中空间电荷的测量。

表 2　3 种空间电荷测量方法对比

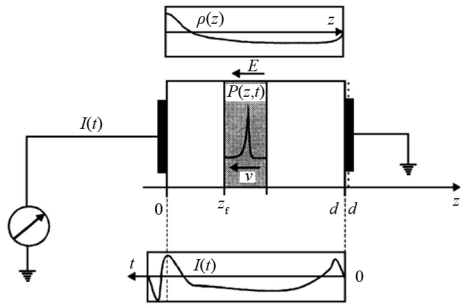
方法	优点	缺点
电声脉冲法	无损测量 简单方便 信号分析简单	电压等级要求较高 不适合厚绝缘测量
压力波法	无损测量 简单方便	噪声干扰较大 易受环境影响
热脉冲法	操作简单 响应速度快	信号处理复杂 试样发生化学变化 测量精度低

随着计算机技术的日新月异，其在数据获取、理论计算和仿真模拟方面具有极大的优越性。在实验时，既可以利用计算机进行数据采集和后处理，显著提高实验效率；也可以利用计算机进行数值模拟，预测实验现象，降低实验成本，提高容错率。

在电缆空间电荷分布以及电场分析预测方面，文献[39]建立了电导率模型和双极电荷传输模型，利用有限元仿真结合电场和热场影响得到了和实验结果相一致的仿真结果，如图 8(a)所示，验证了双极电荷传输模型在高压电缆空间电荷分布研究中的适用性，利用仿真可以代替复杂的实验过程。文献[40]通过建立双极电荷传输模型，利用有限元法模拟了不同激励下的电荷积聚程度，得到了不同时刻的空间电荷分布，如图 8(b)、(c)所示，在直观展示绝缘内部空间电荷密度分布的同时，还显著提高了研究效率。文献[41]建立了一种电缆寿命计算模型，设计了一款专门计算电缆寿命的软件，可对在役电缆进行实时监测，保证电缆的安全稳定运行。

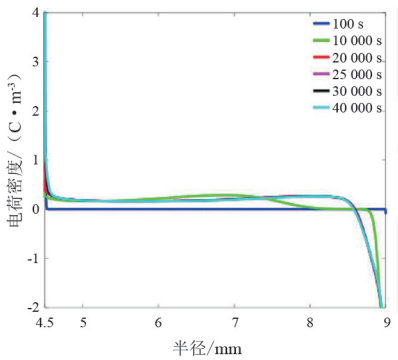


(a) 电声脉冲法

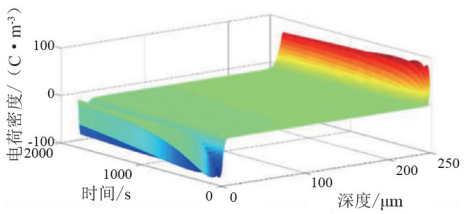


(b) 压力波法

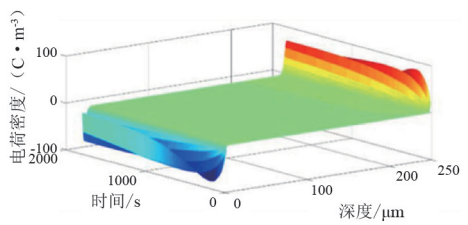
图 7　电缆空间电荷测量方法[38]



(a) 空间电荷密度随时间变化二维仿真结果[39]



(b) 空间电荷密度方波激励下的仿真结果[40]



(c) 空间电荷密度脉冲波激励下的仿真结果[40]

图 8　利用有限元仿真获得的空间电荷密度分布

综上所述，无论是实验测量还是仿真模拟，都是为了全面准确地掌控电缆中的电荷分布情况，并对

存在异常电荷聚集的电缆进行及时干预,避免其进一步发展成局部放电甚至绝缘击穿,从而保障电缆运行安全,延长电缆使用寿命。

3　电荷释放

电荷的消散与电缆绝缘的陷阱深度、陷阱密度以及载流子迁移率有关。通常,电力电缆两端都设有接地装置用来释放残留的空间电荷,但是对于长时间运行的电力电缆,电荷消散到安全运行指标以下往往需要很长的时间[42]。因此,大长度直流电缆需采取额外措施。现阶段,电荷释放主要有两种途径:1)基于电荷产生机理,从源头处尽可能减少电荷的积聚;2)基于电荷测量手段,实现及时电荷释放。

在抑制电荷产生方面,典型措施是在电缆绝缘中添加极性基团,人为制造捕获电荷的陷阱,当电荷陷入这些人为制造的绝缘陷阱后,就可以达到均匀分布的效果,进而有效抑制空间电荷积累。文献[43]研究发现,在交联聚乙烯绝缘电缆中接枝氯乙酸烯丙基酯(CAAE)可以使电缆绝缘中产生大量电荷陷阱,从而降低电荷迁移率,提高电荷注入势垒,抑制空间电荷积累和电荷载流子输运。文献[44]通过在交联聚乙烯绝缘电缆中引入三羟甲基丙烷三甲基丙烯酸酯(TMPTMA)作为交联剂,引入电荷陷阱,有效抑制了空间电荷积累。值得注意的是,上述手段只能尽量减少电荷产生,随着时间的发展以及环境因素的逐渐恶化,仍须采取额外手段及时释放已产生的电荷。

如今,对于残留电荷的释放问题,研究人员仍在积极开展探索。对离线电缆的电荷快速消散,目前已有研究学者提出两种可行思路。第一种思路是采用脉冲刺激法,即在高压直流电缆停止运行时,通过在电缆两端施加高频脉冲电压刺激电荷脱陷。目前,该方法主要用来测量固体绝缘的表面电位,但对未来研究电荷释放问题提供了较大启发。文献[45]利用高频脉冲观察油纸绝缘中电荷输运特性,如图 9 所示。结果表明,随着脉冲频率的增加,绝缘陷阱数量逐渐减小,陷阱深度也出现变化。在一定的频率范围内,可同时减小陷阱密度和陷阱深度,从而降低陷阱对电荷的束缚作用,加速电荷的脱陷过程。

第二种思路是采用交流放电法,该方法是基于绝缘水树等效电阻具有非线性特性。文献[46]研究表明,直流电缆线芯的放电回路等效电阻极小,线芯等效电容 C_X 积累的电荷会瞬间释放;绝缘层放电回路由绝缘水树等效电阻 R 以及水树枝等效电容 C 构成,放电时间常数通常较大,进而导致放电时间较长。通过给直流电缆施加交流电压,利用绝缘水树的非线性特性,可有效减小绝缘水树等效电阻,从而实现电荷的快速释放,如图 10 所示。

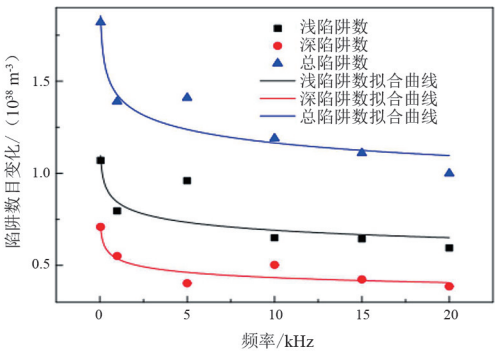
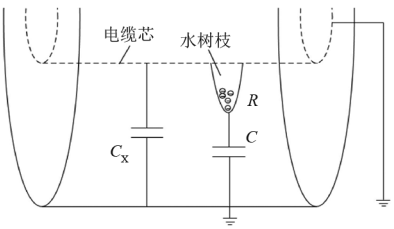
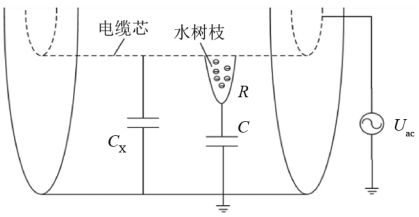


图 9　高频方波脉冲下油纸试样陷阱数目变化[45]



（a）对电缆进行接地放电



（b）对电缆进行交流放电

图 10　交流放电法的等值回路[46]

当前,电缆电荷释放研究仍存在两个尚未解决的关键问题:1)如何实现在役电缆的电荷释放,现有的相关电荷释放研究均为离线电缆的电荷释放,不免造成工程延误、工程效率低等问题;2)如何评估已释放电荷的电缆剩余使用寿命,需要系统深入地研究电缆剩余寿命和电缆绝缘之间的关系,准确预估电缆剩余寿命对减少工程成本,避免资源浪费具有重要的工程意义。

4 结 论

随着“双碳”目标的提出,电力能源广泛应用于生产生活的各个方面,电能需求量的逐年提升对大长度直流高压电缆提出了更高要求。上面对大长度直流高压电缆的电荷问题进行了综述。首先,阐述了直流高压电缆内部表面电荷和空间电荷的产生机理;其次,系统梳理了国内外对于表面电荷和空间电荷测量的研究成果;最后,从抑制电荷积聚和电荷释放两个方面分别论述了减少电缆电荷集聚的重要性与挑战性。

未来,大尺度直流高压电缆中的电荷研究主要集中在如下关键问题:首先,如何实现在役电缆的电荷释放,现有的相关电荷释放研究均为离线电缆的电荷释放,不免造成工程延误、工程效率低等问题;其次,如何对已释放电荷的电缆进行剩余寿命评估,以最大程度地避免资源浪费;最后,如何充分利用数字模拟计算电缆内部残留空间电荷,以寻求更可靠的电荷释放方案。

参考文献

[1] WANG X. HAO J Q, XIONG J Z, et al. Comparison and analysis of three pulse injection methods in the pulsed electroacoustic technique used for long cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34(4): 17-31.

[2] LI Zhonglei, DU Boxue. Polymeric insulation for high-voltage dC extruded cables: challenges and development directions [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 34(6): 30-43.

[3] LUX J, OLSCHEWSKI M, SCHAEFER P, et al. Real-time determination of depth of burial profiles for submarine power cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 1079-1086.

[4] WANG Shuchao, ZHOU Quan, Liao Ruijin, et al. The impact of cross-linking effect on the space charge characteristics of cross-linked polyethylene with different degrees of cross-linking under strong direct current electric Field[J]. Polymers, 2019, 11(7): 1149-1177.

[5] HE Dongxin, MENG Fansong, LIU Hongshun, et al. The influence mechanism of semiconductive material on space charge accumulation in HVDC cable accessory[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1479-1486.

[6] 刘继平, 王浩鸣, 唐庆华, 等. 热老化对直流 XLPE 绝缘性能的影响研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7): 80-85.

[7] GAO Chaofei, HE Dongxin, ZHOU Yifan, et al. A study on the space charge characteristics of AC sliced XLPE cables[J]. IEEE Access, 2019, 7: 20531-20537.

[8] YU Jingzhe, CHEN Xiangrong, MENG Fanbo, et al. Numerical analysis of thermo-electric field for AC XLPE cables with different service times in DC operation based on conduction current measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 900-908.

[9] KANEKO D, MAEDA T, ITO T, et al. Role of number of consecutive voltage zero-crossings in propagation of water trees in polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(4): 708-714.

[10] 陈曦, 王霞, 吴锴, 等. 温度梯度场对高直流电压下聚乙烯中空间电荷及场强畸变的影响[J].电工技术学报, 2011, 26(3): 13-19.

[11] BHUTTA M S, YANG L J, MA Z P, et al. Significance of space charge accumulation DC endurance of XLPE under varying insulation thickness[C]. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), IEEE, 2019: 1-4.

[12] 高宇, 王明行, 赵宁, 等. 固体绝缘材料表面电荷特性的研究进展[J].高电压技术, 2018, 44(8): 2628-2645.

[13] LIU Yanqin, WU Guangning, GAO Guoqiang, et al. Surface charge accumulation behavior and its influence on surface flashover performance of Al2O3-filled epoxy resin insulators under DC voltages[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(5): 055501.

[14] 周远翔, 吴优, 张灵, 等.预交联对 XLPE 直流电缆料空间电荷特性的影响[J].绝缘材料, 2022, 55(3): 23-31.

[15] CHEN Xiangrong, DAI Chao, YU Linwei, et al. Effect of thermal ageing on charge dynamics and material properties of 320 kV HVDC XLPE[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1797-1804.

[16] MEUNIER M, QUIRKE N. Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators[J]. Journal of Chemical Physics, 2000, 113(1):369-376.

[17] LI Kangle, ZHOU Kai, ZHU Guangya. Toward understanding the relationship between the microstructure and propagation behavior of water trees [J]. IEEE

Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1116-1124.

[18] 易姝慧, 王亚林, 彭庆军, 等. 温度对交联聚乙烯中的空间电荷积累以及迁移的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19):5796-5803.

[19] 王霞, 余栋, 张宇巍, 等. 硅脂涂覆料对 XLPE/EPDM 复合介质界面电荷积聚和击穿特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14):4281-4287.

[20] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. Part 1: insulation/semicon interface[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2007, 23(6):11-19.

[21] 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.

[22] DELPINO S, FABIANI D, MONTANARI G C, et al. Feature article-Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. Part 2: insulation interfaces[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(1): 14-24.

[23] MA Wenzuo, LU Tiebing, WANG Donglai, et al. Experimental study on surface charge distribution of insulating film under the HVDC test wire[C]. 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), IEEE, 2014:1-6.

[24] YANG Chun, ZHANG Ying, HE Lijuan, et al. Study on the trap distribution in polyimide thin film based on TSDC method [C]. 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin Univercity Science and Technology, 2009:911-913.

[25] Zhu Yuanwei, Li Shengtao, Li Tengfei, et al. Trap parameters analysis of oil-paper insulation by thermally stimulated depolarization current[C]. 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), IEEE, 2015:108-111.

[26] 周凯, 吴广宁, 邓桃, 等. 纳米复合绝缘材料的热刺激电流测试研究[J].中国电机工程学报,2007, 27(18):76-82.

[27] GAO Y, DU B X, MA Z L, et al. Effect of cross-linking temperature on charge decay behavior in XLPE[C]. Proceedings of the 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics IEEE, 2010:1-4.

[28] 汪沨, 邱毓昌, 张乔根, 等. 冲击电压作用下绝缘子表面电荷的积聚[J]. 高电压技术, 2002, 28(8):7-8.

[29] 王新新, 刘微粒, 王强, 等. 绝缘子表面电场及电荷的测量[J].高电压技术, 2011, 37(3):732-738.

[30] ANDO N, NUMAJIRI F. Experimental investigation of space charge in XLPE cable using dust figure[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1979, EI-14(1): 36-42.

[31] 徐洋, 刘卫东, 高文胜. 使用粉尘图法测量交流电压下 GIS 绝缘表面电场电荷分布的影响因素研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(3):205-212.

[32] 胡明, 刘淑军, 杨建军, 等. 挤包绝缘高压直流电缆应用现状与研究展望[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 42-55.

[33] 任瀚文, 李庆民, 李承前, 等. 电声脉冲法测量系统的等效传输线模型及声学特性分析[J]. 高电压技术, 2021, 47(4):1485-1495.

[34] COLLINS R E. Analysis of spatial distribution of charges and dipoles in electrets by a transient heating technique[J]. Journal of Applied Physics, 1976, 47(11):4804-4808.

[35] 郁利超. 160 kV 直流电缆绝缘材料老化特性及击穿特性研究[D]. 保定:华北电力大学,2017.

[36] CHEN Zelong, ZHOU Kai, YIN You, et al. Review of insulation rejuvenation technology of water tree aged XLPE cables[J]. Insulating Materials, 2019, 51(10): 1-6.

[37] 张冶文, 潘佳萍, 郑飞虎, 等. 固体绝缘介质中空间电荷分布测量技术及其在电气工业中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(8):2603-2618.

[38] ZHU Zhien, YANG Liming, GUO Shizhong, et al. Comparison between PEA and PWP method of space charge measurement in model cable[C]. 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), IEEE, 2015:907-910.

[39] ZHAN Yunpeng, CHEN George, HAO Miao, et al. Comparison of two models on simulating electric field in HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1107-1115.

[40] REN Hanwen, LI Qingming, LI Chengqian, et al. Numerical simulation of the space charge accumulation inside solid insulation subjected to special polarization conditions[J]. Physica Scripta, 2020, 95(4):045807.

[41] PARISE G, MARTIRANO L, PARISE L, et al. A Life loss tool for an optimal management in the operation of insulated LV power cables[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1):167-173.

[42] 刘刚, 谢月, 杨婉琪, 等. 高压退役电缆空间电荷特

性[J]. 高电压技术, 2016, 42(11):3607-3615.

[43] ZHAO Xindong, SUN Weifeng, SUN Hong. Enhanced insulation performances of crosslinked polyethylene modified by chemically grafting chloroacetic acid allyl ester[J]. Polymers(Basel), 2019, 11(4):592.

[44] QIU Peng, CHEN Junqi, SUN Weifeng, et al. Improved DC dielectric performance of photon-initiated crosslinking polyethylene with TMPTMA auxiliary agent[J]. Materials (Basel), 2019, 12(21):3540.

[45] 李晓楠, 刘凯, 杨雁, 等.高频表面电荷输运对油纸绝缘局部放电的影响[J].中国电机工程学报,2022, 42(3):1223-1233.

[46] 霍振星. 基于 10 kV XLPE 电缆的绝缘老化分析研究[D]. 天津:天津大学,2009.

作者简介:

王洁铭(1997),男,硕士研究生,研究方向为高电压技术;

刘巧珏(1991),女,博士,副研究员,研究方向为高电压与绝缘技术、脉冲功率及放电等离子体技术;

崔智桐(1999),男,硕士,工程师,从事电力电子变换相关研究工作;

蔡致坤(1995),男,硕士,工程师,从事电力电子变换相关研究工作;

胡武生(1996),男,硕士,工程师,从事高电压与绝缘技术的研究工作。

(收稿日期:2023-09-03)

(上接第 27 页)

[7] MAO S, DONG Z W, SCHULTZ P, et al. A finite-time distributed optimization algorithm for economic dispatch in smart grids[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(4): 2068-2079.

[8] GARCIA-TORRES F, BAEZ-GONZALEZ P, TOBAJAS J, et al. Cooperative optimization of networked microgrids for supporting grid flexibility services using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021, 12(3): 1893-1903.

[9] SHUAI H, FANG J K, AI X M, et al. Stochastic optimization of economic dispatch for microgrid based on approximate dynamic programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2440-2452.

[10] 胡维昊, 曹迪, 黄琦,等. 深度强化学习在配电网优化运行中的应用[J]. 电力系统自动化: 2023,47(14): 174-191.

[11] FU Q M, HAN Z C, CHEN J P, et al. Applications of reinforcement learning for building energy efficiency control: A review[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 50: 104165.

[12] 阮应君, 侯泽群, 钱凡悦,等. 基于深度强化学习的分布式能源系统运行优化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(17): 7021-7030.

[13] 刘俊峰, 陈剑龙, 王晓生,等. 基于深度强化学习的微能源网能量管理与优化策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3794-3803.

[14] LIN X Y, XU X H, WANG Z R. Deep Q-learning network based trip pattern adaptive battery longevity-conscious strategy of plug-in fuel cell hybrid electric vehicle[J]. Applied Energy,2022,321: 119378.

[15] SANTOS O L D, DOTTA D, WANG M, et al. Performance analysis of a DNN classifier for power system events using an interpretability method[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107594.

[16] YEO T, SHIGEMATSU N, KATORI T. Dynamically recrystallized grains identified via the application of Gaussian mixture model to EBSD data[J]. Journal of Structural Geology, 2023, 167: 104800.

[17] FUJIMOTO S, Hoof H V, MEGER D. Addressing function approximation error in actor-critic Methods[J].https://arxiv.org/pdf/1802.09477v3.pdf

[18] HONG J C, ZHANG T Z, ZHANG Z, et al. Investigation of energy management strategy for a novel electric-hydraulic hybrid vehicle: Self-adaptive electric-hydraulic ratio[J]. Energy, 2023, 278: 127528.

[19] DING Y P, DANG Y G. Forecasting renewable energy generation with a novel flexible nonlinear multivariable discrete grey prediction model[J]. Energy, 2023, 227: 127664.

作者简介:

李龙胜(1976),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型电力系统;

冯文韬(1996),男,硕士, 研究方向为新型电力系统;

潘可佳(1982),男,硕士,高级工程师,研究方向为新型电力系统;

郑言蹊(1994),女,硕士,研究方向为电力数据服务;

邓冰妍(1996),女,硕士,研究方向为电力大数据分析;

景致远(1999),男,硕士,研究方向为电子信息、智能电网。

(收稿日期:2023-06-27)

基于 BP 神经网络和 SSA-SVM 的接地网腐蚀速率组合预测

张 衡[1],刘 闯[2],刘 炬[2],严文帅[2],刘云飞[2],陈海旭[3,4]
(1. 福州亿力电力工程有限公司,福建 福州 350000;2. 国网湖北省电力有限公司荆门供电公司,湖北 荆门 448000;3. 三峡大学电气与新能源学院,湖北 宜昌 443000;4. 国网福建省电力有限公司福州供电公司,福建 福州 350000)

摘 要:为提高接地网腐蚀速率预测精度,提出了一种接地网腐蚀速率组合预测方法。首先,采用 SSA 算法对 SVM 进行优化,建立接地网 SSA-SVM 腐蚀预测速率模型;然后,采用 6-11-1 的 BP 神经网络对 SSA-SVM 模型的预测残差进行修正,建立了基于 BP 神经网络和 SSA-SVM 的接地网腐蚀速率组合预测模型;最后,采用接地网腐蚀实验数据进行算例分析。结果表明,所提接地网腐蚀速率组合模型预测结果的均方根误差、平均相对误差和相关系数分别为 0.192、4.98%和 0.974 6,在模型稳定性、预测精度、预测结果与实际值的相关性均优于其他模型,验证了所提模型的正确性和优越性。

关键词:接地网; 腐蚀速率; 组合预测; 麻雀搜索算法; 支持向量机; BP 神经网络
中图分类号:TM 73 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2024)01-0059-06
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240109

Combination Forecasting for Corrosion Rate of Grounding Grid Based on BP Neural Network and SSA-SVM

ZHANG Heng[1], LIU Chuang[2], LIU Ju[2], YAN Wenshuai[2], LIU Yunfei[2], CHEN Haixu[3,4]
(1. Fuzhou Yili Power Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350000, Fujian, China ; 2. State Grid Jingmen Electric Power Supply Company, Jingmen 448000, Hubei, China; 3. College of Electrical and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443000, Hubei, China; 4. State Grid Fuzhou Electric Power Supply Company, Fuzhou 350000, Fujian, China)

Abstract: In order to improve the prediction accuracy of grounding grid corrosion rate, a combined prediction method of grounding grid corrosion rate was proposed. Firstly, the SSA algorithm is used to optimize the SVM, and the SSA-SVM corrosion prediction rate model of the grounding grid is established. Then, the prediction residual of the SSA-SVM model is modified using the 6-11-1 BP neural network, and a combined prediction model of the grounding grid corrosion rate based on BP neural network and SSA-SVM is established. Finally, an example is analyzed by using the experimental data of grounding grid corrosion. The results show that the root-mean-square error, average relative error and correlation coefficient of the prediction results of the combined model of grounding grid corrosion rate proposed in this paper are 0.192, 4.98% and 0.974 6, respectively. The model stability, prediction accuracy, and correlation between the prediction results and the actual values are better than other models, which verifies the correctness and superiority of the model.

Key words: grounding grid; corrosion rate; combination forecast; sparrow search algorithm; support vector machine; BP neural network

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907104)

0 引 言

随着中国经济的飞速发展,电力负荷需求量日益增长,为了满足人们不断增长的用电需求,电网正朝着大容量和特高压的方向发展[1-2]。接地网是电力系统重要的保护装置,对保障人身、设备和电网的安全具有重要作用[3]。接地网的主要成分是碳钢和镀锌钢,这些材料长期埋在地下,在土壤化学成分的作用下,容易发生腐蚀,严重时导致接地网断裂造成安全事故[4-6]。对接地网腐蚀速率进行预测,及时准确掌握其腐蚀情况,对于保障电网安全运行具有重要意义。

传统接地网腐蚀速率计算方法通常需要进行开挖,这种方法耗费人力、物力[7]。随着人工智能的发展,人们开始采用智能算法进行接地网腐蚀预测。文献[8]采用核主成分分析法确定了接地网腐蚀速率的主要影响因素;采用改进斑点鬣狗算法(improved spotted hyena optimization,ISHO)优化最小二乘支持向量机(least squares support vector machine,LSSVM)的参数,建立了基于 ISHO-LSSVM 的接地网腐蚀速率预测模型;采用海南省接地网腐蚀实验数据进行算例分析,取得了较高的预测精度,验证了该模型的实用性。文献[9]采用改进果蝇算法(update fruit fly optimization algorithm, UFOA)对 BP 神经网络的阈值和权值进行优化,建立了基于 UFOA-BP 的接地网腐蚀速率预测模型;采用 24 座变电站接地网腐蚀数据对模型的正确性进行了验证,结果表明该模型预测精度高达 92%。文献[10]利用人工蜂群算法(artificial bee colony,ABC)对支持向量机(support vector machine,SVM)进行了参数寻优,建立了基于 ABC-SVM 的接地网腐蚀速率预测模型,并在模型输入量中增加了接地材料的电阻率,将接地网腐蚀预测精度提高到 93%。但上述模型均未进行误差修正,导致预测效果不够理想。

下面采用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm,SSA)对 SVM 的惩罚系数和核系数进行优化,构建 SSA-SVM 模型;在此基础上采用 BP 神经网络对 SSA-SVM 模型进行残差修正,建立基于 BP 神经网络和 SSA-SVM 的接地网腐蚀速率组合预测模型,并用接地网腐蚀样本数据验证模型的正确性和实用性。

1 SSA-SVM 模型

1.1 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法是 2020 年提出的一种新型优化算法,其原理是麻雀群搜索食物的行为[11]。大自然中的麻雀是群居的,在捕食过程中,麻雀种群分为头雀和追随者。头雀经验丰富,种群地位高,更容易获得食物,其作用是带领追随者寻找食物,头雀的位置更新公式为

$$\boldsymbol{X}_{i,j}^{h+1}=\begin{cases}\boldsymbol{X}_{i,j}^{h}\cdot\exp\left(\dfrac{-i}{\theta\cdot h_{\max}}\right), & R_2<S_{\mathrm{T}}\\ \boldsymbol{X}_{i,j}^{h}+Q\cdot\boldsymbol{I}, & R_2\geqslant S_{\mathrm{T}}\end{cases}\tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{X}_{i,j}^{h}$和 $\boldsymbol{X}_{i,j}^{h+1}$分别为第 h 次迭代和第 $h+1$ 次迭代时麻雀 i 在第 j 维上的位置;θ 为随机数,取值范围为[0,1];$h_{\max}$为最大迭代次数;Q 为随机数,服从标准正态分布;$\boldsymbol{I}$ 为单位行矩阵;S_{T} 为安全值;R_2 为警戒值。

麻雀在自然界中会受到蛇、猫、鹰等天敌的威胁,S_{T} 和 R_2 表示捕食区域是否安全,如果 $R_2<S_{\mathrm{T}}$,表示捕食区域安全;反之,$R_2\geqslant S_{\mathrm{T}}$ 时,表示捕食区域不安全,此时,头雀带领追随者去其他地方,并更新位置。

追随者采用式(2)进行位置更新。

$$\boldsymbol{X}_{i,j}^{h+1}=\begin{cases}Q\cdot\exp\left(\dfrac{\boldsymbol{X}_{\mathrm{worst}}^{h}-\boldsymbol{X}_{i,j}^{h}}{\theta\cdot h_{\max}}\right), & i>\dfrac{B}{2}\\ \boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}^{h+1}+\|\boldsymbol{X}_{i,j}^{h}-\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}^{h+1}\|\cdot\boldsymbol{I}\cdot\boldsymbol{A}^{+}, & \text{其他}\end{cases}\tag{2}$$

式中:B 为麻雀种群容量,当 $i>\dfrac{B}{2}$ 时,追随者适应度较差,不能得到食物,则需要更新位置;$\boldsymbol{X}_{\mathrm{worst}}^{h}$ 为第 h 次迭代时适应度最差的位置;$\boldsymbol{X}_{\mathrm{p}}^{h+1}$ 为第 $h+1$ 次迭代时的最佳捕食位置;$\boldsymbol{A}$ 为行矩阵,元素取值为 1 或者-1,其中 $\boldsymbol{A}^{+}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})^{-1}$。

为了适应生存环境,麻雀的警惕性很高,一旦发现异常情况便通知种群快速撤离,因此,在 SSA 算法中,设置一定数量的侦查雀,以便能够及时发现异常情况。侦查雀采用式(3)进行位置更新。

$$\boldsymbol{X}_{i,j}^{h+1}=\begin{cases}\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}^{h}+b(\boldsymbol{X}_{i,j}^{h}-\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}^{h}), & f_i>f_{\mathrm{g}}\\ \boldsymbol{X}_{i,j}^{h}+r\cdot\dfrac{(\boldsymbol{X}_{i,j}^{h}-\boldsymbol{X}_{\mathrm{worst}}^{h})}{(f_i-f_{\mathrm{w}})+\zeta}, & f_i=f_{\mathrm{g}}\end{cases}\tag{3}$$

式中:ζ 为步长修正参数,取值为 $\zeta=10e^{-50}$;r 为随机数,取值范围为(0,1);$\boldsymbol{X}_{best}^{h}$ 为第 h 次迭代时适应度最好的位置;f_i 为麻雀 i 的位置;f_w 为最佳捕食点;f_g 为最差捕食点。当 $f_i>f_g$ 时,表示麻雀适应度较差,距离食物较远,容易遭到天敌攻击;当 $f_i=f_g$ 时,表示麻雀适应度最差,距离天敌很近,需要马上撤离,更新位置。

1.2　支持向量机

支持向量机是一种用于解决分类和回归问题的机器学习方法,利用二次规划方法进行求解,可以有效防止算法陷入局部最优,对于小样本回归问题,也能很好地解决[12]。

SVM 的回归原理是将样本数据映射到高维空间,然后根据结构最小化原则建立回归函数,公式为

$$f(x)=\boldsymbol{\omega}\varphi(x)+b \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{\omega}$ 为权向量;$\varphi(x)$ 为非线性函数;b 为偏置系数。

对于回归问题,需要将不敏感损失函数引入,并在合适的松弛度下进行回归拟合,根据拟合误差最小建立目标函数,得到优化模型为

$$\begin{aligned}&\min\left[\frac{1}{2}\|\boldsymbol{\omega}\|+C\sum_{k=1}^{S}(\xi_k+\xi_k^*)\right]\\&\text{s.t.}\quad \boldsymbol{\omega}\varphi(x_k)-y_k+b\leqslant\varepsilon+\xi_k^*\\&\qquad y_k-\boldsymbol{\omega}\varphi(x_k)-b\leqslant\varepsilon+\xi_k\\&\qquad \xi_k\geqslant 0,\xi_k^*\geqslant 0\end{aligned} \tag{5}$$

式中:C 为惩罚系数,$C>0$;ε 为不敏感损失函数;S 为样本容量;ξ_k 为样本 k 正松弛度;ξ_k^* 为样本 k 负松弛度。

为了对式(5)进行求解,引入拉格朗日函数并对各变量求偏导,利用对偶原理进行求解可得

$$\begin{aligned}&\max\Big[-\frac{1}{2}C\sum_{k.l}^{S}(\alpha_k-\alpha_k^*)(\alpha_l-\alpha_l^*)K(x_k,x_l)-\\&\qquad\varepsilon\sum_{k=1}^{S}(\alpha_k+\alpha_k^*)+\sum_{k=1}^{S}y_k(\alpha_k-\alpha_k^*)\Big]\\&\text{s.t.}\quad\sum_{k=1}^{S}(\alpha_k-\alpha_k^*)=0,\alpha_k、\alpha_k^*\in[0,C]\end{aligned} \tag{6}$$

式中:$K(x_k,x_l)$ 为核函数,$K(x_k,x_l)=\varphi(x_k)\varphi(x_l)$ 表示高维空间的内积计算;α_k、α_k^* 均为拉格朗日乘子。

由此可以得到回归函数为

$$f(x)=\sum_{k=1}^{S}(\alpha_k-\alpha_k^*)K(x_k,x_l)+b \tag{7}$$

核函数的选择会影响 SVM 的回归效果,为了提高 SVM 的泛化性,采用径向基核函数,其表达式为

$$K(x_k,x_l)=\exp(-\gamma\|x_k-x_l\|^2) \tag{8}$$

式中,γ 为核系数,$\gamma\in(0,+\infty)$。

1.3　SSA-SVM 腐蚀速率预测模型

研究表明,土壤的含水率、孔隙率、电阻率、Cl^-、SO_4^{2-} 和接地网电阻增长速率是影响接地网腐蚀速率的主要因素[13]。为此,以上述 6 种特征量为输入量,以腐蚀速率为输出量,采用 SSA 算法对 SVM 的惩罚系数和核系数进行优化,构建接地网 SSA-SVM 腐蚀速率预测模型,实施步骤如下:

1)根据样本容量将样本数据划分为训练集和测试集并将其归一化,公式为

$$x_n'=\frac{x_n-x_{min}}{x_{max}-x_{min}} \tag{9}$$

式中:x_n、x_n' 分别为特征量 n 的原始值及归一化后的值;x_{max} 和 x_{min} 分别为特征量 n 的最大值和最小值。

2)设置 SSA 算法和 SVM 的相关参数,包括麻雀种群规模、最大迭代次数、惩罚系数和核系数的搜索范围。

3)设定模型输出结果的均方根误差为适应度函数,适应度函数的计算公式为

$$f=\frac{1}{S}\sqrt{\sum_{k=1}^{S}(y_k-y_k^*)^2} \tag{10}$$

式中:y_k 为接地网 k 实际腐蚀速率;y_k^* 为接地网 k 预测腐蚀速率。

4)初始化麻雀种群,并根据式(10)计算个体适应度值,适应度值最小的个体为头雀,其余为追随者。

5)利用式(1)更新头雀的位置,处在安全区域的个体展开搜索,如果捕食区域不安全,头雀带领追随者去其他地方并更新位置。

6)利用式(2)更新追随者的位置,如果出现 $i>\frac{B}{2}$,追随者无法得到食物,则需要更新位置。

7)将此次迭代得到的适应度值与最优适应度值比较并更新最优适应度值,同时利用式(3)对侦查雀的位置进行更新。

8)判断是否满足迭代终止条件,若满足,则输出惩罚系数和核系数的最优值;若不能满足,则返回步骤 3 继续迭代。

9)将最优值赋给 SVM,建立接地网 SSA-SVM 腐蚀速率预测模型。

2 接地网腐蚀速率组合预测模型

2.1 BP 神经网络

1986 年,科学家 Rumelhart 在对神经网络研究的基础上提出了一种误差反向传播的多层前馈网络,即 BP 神经网络[14]。BP 神经网络通常由输入层、隐含层和输出层组成,在学习过程中利用学习误差不断修正权值和阈值,直到获得满意的学习效果。由于 BP 神经网络本身已经学习并储存大量的映射关系,能够很好地处理非线性问题,目前已得到广泛应用。

2.2 组合预测模型的建立

为了提高接地网腐蚀速率预测精度,采用 BP 神经网络对 SSA-SVM 模型的预测残差进行修正,建立基于 BP 神经网络和 SSA-SVM 的接地网腐蚀速率组合预测模型。组合预测模型的建模思路是:以接地网腐蚀速率影响因素作为 BP 神经网络预测模型的输入量,以 SSA-SVM 腐蚀速率预测模型预测值与实际值之间的偏差值 Δ_k 作为输出量,组成新的训练样本(x_k,Δ_k),建立 3 层 BP 神经网络模型,对 Δ_k 进行预测,再与 SSA-SVM 腐蚀速率预测模型预测值求和即可得到组合模型的预测结果为

$$y_{\Delta_k} = y_k^* + \Delta_k \tag{11}$$

式中:y_{Δ_k} 为组合模型腐蚀速率预测值;y_k^* 为 SSA-SVM 模型腐蚀速率预测值;Δ_k 为 BP 神经网络误差输出值。

根据组合预测模型的建模思路,可得流程如图 1 所示。

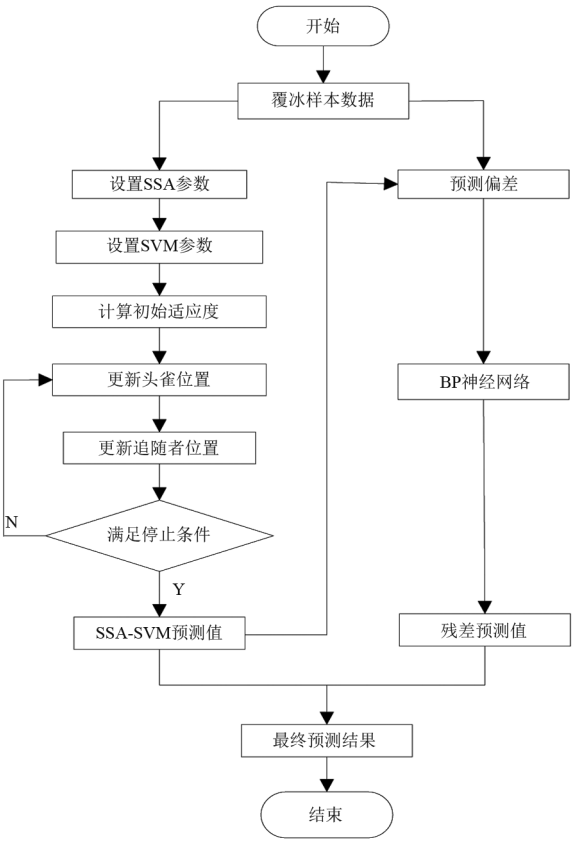


图 1 组合模型流程

3 仿真分析

采用文献[13]中的接地网腐蚀实验数据进行算例分析,腐蚀实验数据共获得 72 组样本数据,训练集和测试集分别取前 60 和后 12 组,分别用于模型训练和精度检验,测试集样本如表 1 所示。

表 1 测试集样本

样本编号	含水率/%	孔隙率/%	电阻率/(Ω·m)	Cl^-/(mg·kg^{-1})	SO_4^{-2}/(mg·kg^{-1})	电阻增长速率/(倍·a^{-1})	腐蚀速率/(g·dm^{-2}·a^{-1})
61	23.56	42.77	36.57	248.10	442.9	0.38	6.63
62	23.76	37.96	20.25	58.63	103.2	0.50	3.48
63	19.11	26.03	117.10	87.31	397.4	0.86	7.42
64	24.20	37.84	70.19	35.71	248.3	0.68	6.53
65	20.07	37.72	74.19	134.20	562.0	0.81	6.90
66	30.54	48.03	110.50	134.70	629.5	0.40	8.33
67	33.98	53.67	37.22	104.30	532.1	0.23	6.51
68	28.48	27.58	102.30	89.24	446.6	0.45	6.79
69	22.72	37.11	76.04	37.09	397.4	0.47	5.83
70	28.86	31.10	99.39	181.90	690.8	0.67	10.12
71	23.26	36.01	119.90	235.60	377.7	0.73	9.59
72	34.29	42.32	116.70	32.77	307.4	0.35	7.99

首先采用 SSA 算法对 SVM 进行优化,建立接地网 SSA-SVM 腐蚀预测速率模型。SSA 算法的参数设置如下:设置最大迭代次数为 200,种群规模为 20,头雀比例为 0.2,侦查雀比例为 0.1。SVM 的惩罚系数 C 和核系数 γ 的搜索范围设置为[0,100]。利用训练集样本进行训练,SSA 算法找到的最优解为 $C=26.15$、$\gamma=0.804$。将 C 和 γ 的最优解代入 SVM 模型,对测试集样本进行预测,预测结果如表 2 所示。

表 2　SSA-SVM 模型预测结果

样本编号	腐蚀速率实际值/($g\cdot dm^{-2}\cdot a^{-1}$)	腐蚀速率预测值/($g\cdot dm^{-2}\cdot a^{-1}$)
61	6.63	6.38
62	3.48	3.91
63	7.42	7.57
64	6.53	6.07
65	6.90	7.29
66	8.33	8.70
67	6.51	7.04
68	6.79	7.50
69	5.83	5.86
70	10.12	9.57
71	9.59	9.04
72	7.99	8.02

接下来采用 BP 神经网络对 SSA-SVM 模型的残差进行预测,BP 神经网络输入层和输出层神经元分别为 6 个和 1 个,隐含层神经元数通常由经验公式确定,具体为

$$m=\sqrt{p+q}+\beta \tag{12}$$

式中:p 为输入层神经元数;q 为输出层神经元数;m 为隐含层神经元数;β 为常数,取值为 1~10 之间的整数。

根据式(12),确定 m 的取值范围为[4,13],设置输出层训练函数为 trainlm 函数,传递函数为 logsig 函数,学习精度取 10^{-9},学习率取 0.1%,训练次数为 1000 次,隐含层数量在 4~13 之间取值。通过反复训练,当隐含层神经元数为 11 时,BP 神经网络训练过程中的均方根误差最小,具体实验结果如图 2 所示。

由此可以建立 6-11-1 结构的 BP 神经网络预测模型,得出含水率、孔隙率、电阻率、Cl^-、SO_4^{2-}、接地网电阻增长速率与 SSA-SVM 模型腐蚀速率预测残差的映射关系。BP 神经网络预测模型的输出结果如表 3 所示,结合式(11),即可得到组合模型的预测值。

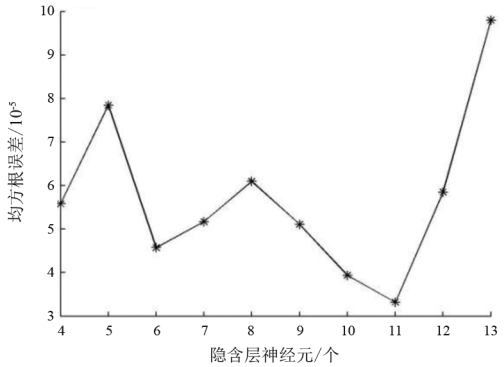


图 2　隐含层不同神经元数的训练误差

表 3　BP 神经网络及组合模型预测值

样本编号	BP 神经网络残差预测值/($g\cdot dm^{-2}\cdot a^{-1}$)	组合模型预测值/($g\cdot dm^{-2}\cdot a^{-1}$)
61	0.051	6.43
62	-0.042	3.87
63	-0.013	7.56
64	0.077	6.15
65	-0.050	7.24
66	-0.209	8.49
67	-0.043	7.00
68	-0.132	7.37
69	-0.023	5.84
70	0.180	9.75
71	0.131	9.17
72	0.010	8.03

为了比较各模型的预测效果,采用均方根误差、平均相对误差、相关系数等 3 个指标进行分析,它们的表达式分别为:

$$\varepsilon_{\mathrm{MSE}}=\frac{1}{S}\sum_{k=1}^{S}(y_k-y_k^*)^2 \tag{13}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{MAPE}}=\frac{1}{S}\sum_{k=1}^{S}\left|\frac{y_k-y_k^*}{y_k}\right|\times 100\% \tag{14}$$

$$R=\sqrt{\frac{\left(S\sum_{k=1}^{S}y_k^*y_k-\sum_{k=1}^{S}y_k^*\sum_{k=1}^{S}y_k\right)^2}{\left[S\sum_{k=1}^{S}(y_k^*)^2-\left(\sum_{k=1}^{S}y_k^{*2}\right)\right]\left[S\sum_{k=1}^{S}y_k^2-\left(\sum_{k=1}^{S}y_k\right)^2\right]}} \tag{15}$$

表 4 给出了 SSA-SVM 模型和所提组合模型对测试集样本预测的各类误差。从均方误差和平均相对误差上看,组合模型在 SSA-SVM 模型的基础上进一步降低,可见利用组合模型对接地网腐蚀速率预测时的波动性更小,预测精度更高;从相关系数上看,组合模型在 SSA-SVM 模型的基础上进一步提高,可见组合模型的腐蚀速率预测值与实际值相关性更好。

表 4 SSA-SVM 模型和组合模型预测效果比较

模型	ε_{MSE}	ε_{MAPE}/%	R
SSA-SVM 模型	0.274	6.46	0.953 7
组合模型	0.192	4.98	0.974 6

为了进一步验证基于 BP 神经网络和 SSA-SVM 的接地网腐蚀速率组合预测模型相比 BP 神经网络和支持向量机在接地网腐蚀预测方面的优越性,采用文献[9]和文献[10]中接地网腐蚀速率预测模型进行对比分析,利用文献[15]中的 72 组样本数据进行仿真分析,其中训练集样本容量为 60,测试集样本容量为 12,采用组合模型、UFOA-BP 模型、ABC-SVM 模型分别对测试集样本进行预测。3 种模型的预测结果和误差指标分别如图 3 和表 5 所示。由图 3 可知,相比 UFOA-BP 模型和 ABC-SVM 模型,组合模型的预测结果更接近实际值。对比表 5 中的数据可以看出,所提组合模型在均方根误差、平均相对误差和相关系数上均优于其他两种腐蚀速率预测模型,验证了所提接地网腐蚀速率预测模型的正确性和优越性。

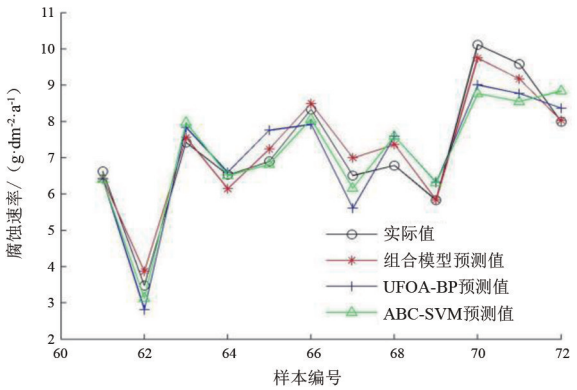


图 3 3 种模型腐蚀速率预测结果

表 5 3 种模型误差对比

模型	ε_{MSE}	ε_{MAPE}/%	R
组合模型	0.192	4.98	0.974 6
UFOA-BP 模型	0.413	7.92	0.922 4
ABC-SVM 模型	0.368	6.73	0.943 1

4 结 论

上面以含水率、孔隙率、电阻率、Cl^-、SO_4^{2-} 和电阻增长速率等 6 个特征量为输入量,以腐蚀速率为输出量,采用 SSA 算法对 SVM 进行优化,在此基础上采用 BP 神经网络进行残差修正,建立了基于 BP 神经网络和 SSA-SVM 的接地网腐蚀速率组合预测模型;采用接地网腐蚀实验数据进行算例分析,并与现有接地网腐蚀速率预测方法进行对比,验证了所提接地网腐蚀速率预测模型的正确性和优越性。

参考文献

[1] 董曼玲,李星,杨帆,等.基于支路电压扰动的接地网腐蚀缺陷诊断研究[J].高压电器,2021,57(8):47-53.

[2] 林肖斐,夏圣峰,吴簪麟,等.基于 IWPA 优化 LSSVM 的输电线路接地网腐蚀预测研究[J].电瓷避雷器,2022(1):1-7.

[3] 王小军,高广德,吴田,等.基于 PSOEM 优化 LSSVM 的接地网腐蚀预测研究[J].智慧电力,2020,48(11):68-73.

[4] 李文彬,王勇,冯砚厅,等.基于改进 CL-ML 方法的接地网不开挖腐蚀速率预测模型[J].电力科学与工程,2021,37(4):49-54.

[5] 詹花茂,郭明鑫,刘春江,等.基于正则化最小二乘法的接地网腐蚀状态评估方法[J].腐蚀与防护,2022,43(6):79-85.

[6] 黄欢,刘彦辰,高翔,等.基于组合模型的接地网腐蚀速率预测算法[J].计算技术与自动化,2019,38(3):79-83.

[7] 陈敬友,付明,张军,等.基于改进粒子群算法的接地网腐蚀诊断研究[J].电力大数据,2020,23(9):26-33.

[8] 王海涛,陈明,文中,等.基于 KPCA-ISHO-LSSVM 的接地网腐蚀速率预测[J].智慧电力,2022,50(2):62-68.

[9] 程宏伟,高莲,于虹,等.基于改进果蝇算法优化 BP 神经网络的接地网腐蚀速率预测模型[J].电测与仪表,2022,59(11):71-78.

[10] 刘渝根,陈超.基于人工蜂群算法优化支持向量机的接地网腐蚀速率预测模型[J].电力自动化设备,2019,39(5):182-186.

[11] 张萍,陆霞,孟庆鹤.基于多策略麻雀搜索算法的微电网容量优化配置[J].电气技术,2023,24(1):1-9.

[12] 刘闯,何沁鸿,卢银均,等.输电线路 PSOEM-LSSVM 覆冰预测模型[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):131-137.

[13] 陈超. 接地网腐蚀速率预测方法研究[D].重庆:重庆大学,2019.

[14] 晏生莲,巩永旺,潘琳鑫.基于 BAS-BA 优化 BP 神经网络的轴承故障诊断方法[J].计算机与数字工程,2022,50(10):2317-2321.

[15] 郭阳阳. 基于神经网络的海南变电站土壤对 Q235 钢的腐蚀预测研究[D].保定:华北电力大学,2016.

作者简介:

张 衡(1994),男,助理工程师,研究方向为输电线路运行与检修。

(收稿日期:2023-05-14)

输电线路规划方法和寿命周期成本综述

杨　丹[1],倪　江[1],杨迎昕[1],焦一飞[1],齐韵英[2],许　潇[2],刘俊勇[2]
(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都　610095;
2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都　610065)

摘　要:按照传统标准设计的输电线路规划存在效率低和资本浪费等问题。经济研究表明,采用优化设计和科学成本管理方法的输电线路建设对于节省资本投资具有重要意义。因此,从输电线路扩建规划方面进行了探讨研究,以帮助在输电线路建设和运营方面做出更明智的决策。首先,通过综述国内外的研究论文,概述了输电线路规划的基础理论,系统梳理了输电线路规划的方法,包括确定性方法、启发式方法、元启发式方法等,分析了各种方法的优缺点;然后,在经济评估方面考虑线路建设、运行、维护等多个阶段的费用,提出了寿命周期成本分析,更全面地评估输电线路规划方案的经济性。

关键词:输电线路; 输电规划; 经济寿命; 寿命周期成本
中图分类号:TM 715　**文献标志码**:A　**文章编号**:1003-6954(2024)01-0065-07
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240110

Overview of Economic Planning Methods and Life Cycle Cost for Transmission Lines

YANG Dan[1], NI Jiang[1], YANG Yingxin[1], JIAO Yifei[1], QI Yunying[2], XU Xiao[2], LIU Junyong[2]
(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610095, Sichuan, China;
2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In the past, transmission line planning based on standard designs suffered from inefficiency and capital wastage. Economic studies show that employing optimal design and scientific cost management for transmission line construction is crucial for saving capital investment. So the review of research efforts in transmission expansion planning is given to facilitate more informed decision-making regarding the construction and operation of transmission lines. By surveying domestic and international research articles, the fundamental theories of transmission line planning are outlined. The methods for transmission line planning, including deterministic, heuristic and metaheuristic approaches, are systematically delineated and their respective strengths and weaknesses are analyzed. Then, for economic evaluation, a life cycle cost analysis is proposed to account for expenses across multiple phases such as line construction, operation and maintenance, which can more comprehensively evaluate the cost-effectiveness of any given transmission planning scheme.

Key words: transmission line; transmission planning; economic life; ife cycle cost

0　引　言

随着能源消费的不断增长,电力负荷需求也不断攀升[1-3],供电质量和电力系统的安全稳定运行至关重要。输电线路在将电力从发电厂输送到用户的过程中发挥着重要作用[4]。为了满足不断增长的电能需求,电力行业面临着建设新发电站和输电线路以及升级和改善现有设施的挑战,因此输电线路的规划和运行成为了一个重要课题。

输电线路的设计是一个复杂的过程,涉及各种设计参数的选择,包括导体类型、直径和结构、塔架类型和高度以及基础设计。这些设计参数的相互关

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(521996220002)

系复杂,一个参数的变化会影响整个系统的性能和成本。因此,选择最佳设计参数对于实现输电系统的最佳性能和成本效益至关重要。输电线路规划旨在确定新的输电线路或扩大现有线路的最佳路线和设计参数。规划过程涉及各个方面,包括环境影响评估、安全和可靠性分析以及成本效益分析。输电线路规划的目标是制定一个既能满足电力需求又能将成本和环境影响降到最低的计划。

为了实现最优的输电线路规划,会用到各种建模和优化算法,包括数学规划、启发式算法等。这些算法可以有效解决输电线路规划中复杂的多目标优化问题,有助于实现输电系统的最佳性能和成本效益。另外,输电线路的经济寿命也是输电线路规划中的一个重要因素。输电线路的寿命取决于各种因素,包括设计参数、环境条件和维护方法。因此,在规划过程中必须考虑输电线路的经济寿命,以确保投资的成本效益和可持续性。

下面对当前输电线路规划和经济分析研究进行了综述,旨在讨论输电线路优化经济规划中存在的问题,并从输电线路规划的基础理论、不同建模和优化算法以及输电线路的经济寿命方面进行了分析和论述。

1 输电线路

输电线路是电力系统中的重要组成部分,其基本功能是将发电厂产生的电能从远离负荷中心的地区输送至负荷中心和城市等用电高峰区域。输电线路的建设和运营能够保障电力系统的平稳运行,满足用户对电能的需求。随着能源转型的深入推进,新能源发电接入电网的比例不断增加,输电线路的重要性也愈加凸显。输电线路规划能够为能源转型提供必要的支持,使可再生能源和分布式能源能够更加有效地接入电网。

1.1 输电规划

输电规划旨在以最低的成本建造或扩建新的输电线路,满足电力需求的同时达到质量和可靠性的要求。根据时间跨度的不同,输电规划可分为长期、中期和短期规划[5]。长期规划指考虑未来 10 年以上的输电线路规划,其目的是确定新输电线路建设的技术要求,并从发电区域的角度开发新技术。中期规划通常考虑未来 3~5 年,侧重于扩建计划,并考虑相互关联的系统。而短期规划则指 1 年内的输电线路规划,通过分析操作限制和解决方案,保持向消费者提供优质电力供应的连续性。输电规划方法中考虑的各种技术、经济和环境问题如图 1 所示。

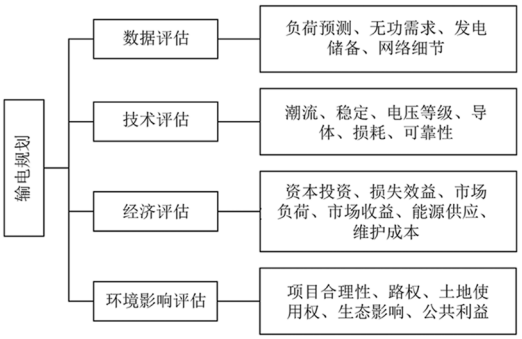


图 1 输电规划

1.2 输电线路选型和电压等级选择

对特定类型的线路或电压等级的选择取决于线路上传输的功率大小。高电压输电可以减少线路损耗,提高输电效率,但一些因素限制了高电压的水平,如:传输电压水平提高后,导体和接地塔之间的绝缘需要增加,导体和地面之间的距离需要拉大,导致塔的高度增加;导体之间需要增加距离,导致需要更长的横担。这些都导致了线路建设成本的增加。因此每条输电线路都有一个固定的电压水平上限,超过这个上限经济性就会大打折扣。

电力系统输电电压等级之间的比例,在电压低于 110 kV 时一般为 3 左右,在 110 kV 以上时宜为 2 左右。选择输电线路电压时,首先根据输送容量、距离和周围网络的电压等级制定方案,再通过经济技术比较确定最佳的方案。

2 输电线路扩建规划方法

输电线路的优化过程包括同时研究和分析线路的各个组成部分的设计和选择,以实现整体成本的最佳技术经济设计[6]。因此,设计架空输电线路时需要考虑各种设计参数,这些参数在对系统成本的影响方面具有复杂的相互作用,并受到外部约束的限制。为了考虑所有主要参数的各种可能配置,可以利用优化的手段设计架空电力线路,以最低的成本满足输电线路性能[7]。

以输电线路规划为主题的现有研究重点关注降低投资成本和提高系统可靠性两方面。尽管数学规划方法很受欢迎,但存在模型难以处理、需要大量的

决策变量以及计算时间长的缺点[8]。为了解决这些问题,启发式和元启发式算法被用于建立最优的输电线路模型。下面重点介绍基于数学规划、启发式和元启发式算法的输电线路规划研究。

2.1　数学规划

输电线路的优化问题具有强复杂性,因此在进行输电规划时无法考虑到所有因素,要做出很多假设和优化。输电线路规划的目的是在考虑网络运行条件和可靠性的情况下,降低现有或新建网络中规划新线路的资金成本。为了实现这一目标,可以使用经典的解析方法,例如线性规划、非线性规划、动态规划和混合整数规划等来得到问题的最优解。

与其他使用直流模型进行输电规划的研究不同,文献[9]提出了一种基于交流最优潮流的随机多目标输电扩展规划的优化框架,采用非线性规划方法,目标是最小化输电投资成本、预期运行成本和预期甩负荷成本并最大化预期负荷系数,交流潮流下的电压安全管理也作为目标之一。文献[10]针对输电网络扩展规划建立了一个双层优化模型,上层以投资成本最低为目标对新建线路的数量和位置进行规划,下层对所得方案应对不确定性因素的能力进行了校验,上下层模型分别利用粒子群算法和线性规划求解器求解。

文献[11-14]为满足电力发展需求,提出了发输电系统的联合规划方法,对系统的扩建线路方案进行了研究,并最终将其转化为混合整数规划模型求解;文献[11-13]同时还计及了可再生能源发电的不确定性,并建立了 $N-1$ 安全校核约束模型;文献[14]在发输电规划中同时兼顾黑启动机组的规划,旨在提高系统的恢复力。

综上,经典优化技术是可以有效解决输电规划问题的工具,但数学优化过程的内在局限性带来了非凸和非线性的问题。计算时间长、模型难处理、需要大量决策变量被认为是数学规划的主要瓶颈。

2.2　启发式和元启发式算法

与精确的数学规划方法相比,启发式模型能够提供良好的解决方案,同时花费较少的计算时间。文献[15]提出了一个基于可控随机局部搜索的启发式输电线路扩建模型,分析了系统的线路扩建方案和成本,解决了实际的阶段输电规划问题。文献[16]使用启发式方法获得一组候选扩建线路并进行排序,同时考虑了拥堵指标来衡量节点价格和线路拥堵的变化。

元启发式算法是一个迭代生成过程,可以有效地找到优化问题的最优或接近最优解。元启发式在搜索方法方面取得了重大进展,这些方法成功地解决了不同领域的复杂优化问题,优于启发式。

文献[17]提出了一种基于二元粒子群优化算法的模型来解决具有安全约束的输电扩展规划问题,计及了新建线路的投资成本和运营成本;该方法在具有 10 年规划范围内的 24 节点算例系统进行了测试。文献[18]提出了一种进化算法来解决静态输电扩展规划问题,该算法使用一种机制来动态调整算法运算符的选择概率。新能源发电尤其是风电的接入给输电线路的规划带来了很大的不确定性,文献[19]考虑风电的不确定性分布,建立了基于机会约束的鲁棒输电规划模型,将其转化成不含随机变量的确定性模型后采用遗传算法求解。文献[20]针对风储联合系统提出了一种双层输电线路规划模型,文献[21]提出了一种双层优化模型用于含风电场的输电系统规划,其目标都是减少输电投资成本和其他成本。

文献[22]考虑到线路维护的经济影响,提出了一种十进制编码遗传算法来解决输电网络扩展规划问题。目标是最小化投资新建输电线路的总成本,并探究了维修成本系数对输电线路和变电站的寿命系数影响。文献[23]提出了一种基于树搜索启发式算法和遗传算法相结合的多阶段输电系统扩展规划的求解方法,同时考虑了 $N-1$ 安全约束。文献[24]考虑输电阻塞盈余,上层目标为减小投资成本,下层模型基于节点边际电价,引导输电网络的扩展规划。文献[25]考虑了高铁负荷和新能源发电不确定性,基于解耦线性潮流建立了输电网的随机规划模型。

3　输电线路经济寿命分析

电力投资巨大,占国家总投资的主要部分,对国民经济有重大影响。不断增长的电能需求、新能源的接入以及电网的升级改造要求改善现有的输电设施,扩建新的线路,以适应电力系统的动态变化,并保持系统稳定。经济分析是对该过程进行的一种评估方法,它可以在经济效益和技术可行性之间找到最佳平衡点,以确定成本效益最大化的方案,并对方

案的风险和不确定性进行评估。

在输电规划的经济评价这一重要课题上，也已经有不少研究，制定了各种目标：1）最小化静态投资或扩建线路长度[26]；2）最小化投资和乘以足够大的惩罚系数的负荷削减[27]；3）最小化投资和运营成本，如发电机成本[28]、能源赤字成本[29]、损失成本[30]和放松管制市场的拥堵成本[31]；4）风险分析的最大遗憾最小化[32]；5）投资最大化和模糊形式的边缘率的交付[33]。大多数研究将输电规划的运行和可靠性指标转化为基于价值的目标，以包含在目标函数中。然而，对输电规划决策的经济评价不仅是一个静态投资的问题，还应该包括在规划、运行、维护、退役和报废等各个阶段产生的直接和间接支出。寿命周期成本（life cycle cost，LCC）理论的应用为输电规划和未来资产管理带来了一种新的方法。

3.1 输电线路的寿命周期成本分析

1933 年，美国审计总署首次提出 LCC 的概念[34]，该方法在供电公司获取输电线路资本投资方面被广泛采用。LCC 用来评估一个项目在其寿命周期内的累积成本，从而为项目在寿命周期内的阶段决策提供有用的信息[35]。LCC 分析方法可以帮助确定最佳的输电线路设计和规划方案，并考虑到各种因素的影响，帮助供电公司在制定维护策略和更新计划上的决策。

输电线路的 LCC 分析还包括线路系统及组成部分寿命、输电线路可靠性等研究。输电线路 LCC 设计的基本框架如图 2 所示。

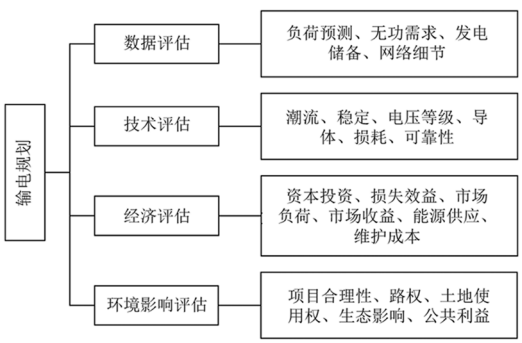


图 2 输电线路 LCC 设计基本框架

在实际应用中，输电线路的建设还应着重考虑两个方面。第一，除考虑各个环节的成本外，还要考虑输电线路的安全性、实用性以及对自然环境的影响。第二，由于输电线路暴露在户外，运行时会受到损耗以及自然灾害等多种因素的影响，因此很容易导致零部件受损，进而影响线路正常运行。为了保障线路的可靠性，需要从多个角度对其进行分析，对每个组件的寿命进行考虑。

3.2 寿命周期成本在输电规划中的应用

文献[36-37]最早提出了一种完整的输电系统 LCC 分析方法，该方法描述了影响系统的主要成本和重要元素，以研究不同的维护策略，并考虑其相应的 LCC；该方法考虑了设备的使用寿命、停电成本、维护成本、维护间隔、计算时间和罚款等因素，以确定系统的现值；该研究结果表明，LCC 分析对于考虑金融行业或由监管引起的变化是非常有用的，并能够根据新的情况制定维护策略。文献[38]认为之前的成本管理没有考虑到由于断电、维护和故障损失造成的成本，应用范围有限；该文献针对输电线路设计了一种成本评估方法用以选择导线类型，目标是最小化一次投资成本、运行损耗成本、维护成本、故障损失成本和报废成本。文献[39]按照文献[38]提出的全寿命周期成本组成，针对 500 kV 线路提出了基于 LCC 的导线性能经济评估方法，并分析了影响投资成本和运行损耗成本的因素，通过实例计算选择出最适合 500 kV 线路的导线类型。

文献[40]提出了一种双层的输电扩展规划模型，并考虑具有间歇性的可再生能源发电带来的不确定性，同时协调了上层的决策过程和下层的可靠性评估。上层主要目标是最小化扩建输电项目的 LCC；下层目标是评估可靠性，以负荷削减作为指标。上层的目标函数为

$$\min c_{\mathrm{LCC}} = c_{\mathrm{I}} + \frac{(1+r_{\mathrm{D}})^{S_{\mathrm{L}}}-1}{r_{\mathrm{D}}(1+r_{\mathrm{D}})^{S_{\mathrm{L}}}}(c_{\mathrm{O}}+c_{\mathrm{M}}+c_{\mathrm{F}}) + \frac{c_{\mathrm{D}}}{(1+r_{\mathrm{D}})^{S_{\mathrm{L}}}} \tag{1}$$

式中：c_{LCC}为扩展规划的 LCC；c_{I}为扩展线路的投资；r_{D} 为资本贴现率；S_{L} 为输电线路使用寿命；c_{O}、c_{M}、c_{F}和 c_{D}分别为预期网络运营成本、输电网络维护成本、预期故障成本以及扩展线路的报废成本。

在上层的输电规划决策下，下层可靠性评估被视为一个概率最优潮流问题，目标是最小化每个不确定场景下的预期负荷削减。下层目标函数为

$$\min E_{\mathrm{LSE}s} = p_s \sum_{d}^{N_d} R_{d,s} \tag{2}$$

式中：$E_{\mathrm{LSE}s}$为年度预期削减功率；p_s为场景 s 的权重因子；$R_{d,s}$为场景 s 节点 d 上的负荷削减；N_d 为节点

集合。通过对不同扩建方案进行对比分析,得到了最优的输电线路扩建方案。

文献[41]提出了一种基于 LCC 的预测分析和输电线路的分层设计方法,通过总体设计有效预测输电线路寿命周期内的各项费用。对输电线路进行了基于 LCC 的分层设计,每一层的设计都需要对 LCC 进行循环比较,以做出具体的设计选择,即“分层反馈”。文献[42]针对输电线路的经济寿命提出了一种评估方法,利用区间分析法计算各阶段的 LCC,能够降低故障率预测或其他误差带来的不确定性。

文献[43]提出了一种基于 LCC 的输电线路绝缘子串更换成本计算方法,并考虑了逐年停电更换成本。文献[44]依托于电力信息平台和数据驱动技术,提出了一种输变电设备的 LCC 分析方法,解决了以往 LCC 分析所用基础数据不准确的问题。通过成本分析,得到设备的最优寿命周期,可结合维修策略,为运维检修提供参考。文献[45]基于全寿命管理理论,建立了电力设备的成本年金测算模型,并应用灰色理论预测运行成本,最终得出设备的经济寿命和最佳的更换时间。

在输电线路选材方面,文献[46]对比了几种不同材料的性能,从一次性投资成本、维护和使用寿命对全寿命周期成本进行分析,为输电线路杆塔接地体选择最优的材料。结果表明,柔性石墨接地材料具有良好的性能和显著的技术经济优势。文献[47]提出了一种基于 LCC 评估的地下电缆钢支架选择方法,将支架的尺寸和钢的类型作为影响初始投资成本的因素,通过计算得出电缆支架的 LCC,选择最经济的电缆支架材料。

因此,输电线路全寿命周期成本分析可以帮助电力公司和相关部门了解电力设备的成本情况,包括设备的采购、安装、运行、维护和报废等各个阶段的成本;帮助决策者制定科学合理的运营和维护策略,评估设备寿命和更换时机,在降低电力系统的总体成本,提高设备的可靠性和安全性方面具有重要意义。

4　结　论

上面回顾了与输电线路的最优经济规划有关的研究,对输电线路规划和建设的基础知识、输电规划中使用的优化方法进行了研究,对输电线路的经济寿命分析进行了综述,以帮助规划人员做出决策。输电规划中采用的各种方法表明,在输电线路优化问题中,必须对模型的设计参数进行权衡,以得出满足约束条件的目标函数的优化方案。随着可再生能源的接入和城市化进程的推进,输电线路规划、建设和运行中涉及的不确定性越来越大。因此,需要提出新的设计、规划、优化和经济分析的综合方法,以分析和估计新输电线路带来的技术和经济效益。

参考文献

[1] 罗信庄. 电力系统 220kV 输电线路施工技术[J]. 中国新技术新产品, 2016 (3): 111-111.

[2] 黄谨益. 电力输电线路巡检中无人机的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019 (1): 233-233.

[3] CARRIÓN D, PALACIOS J, ESPINEL M, et al. Transmission expansion planning considering grid topology changes and N-1 contingencies criteria[C]//Multidisciplinary International Congress on Science and Technology, Springer, 2020: 266-279.

[4] 胡毅, 刘凯, 吴田, 等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.

[5] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.

[6] RAO S S. Engineering Optimization: Theory and Practice[M]. New York: John Wiley and Sons, 2009.

[7] CHANG W S, ZINN C D. Minimization of the cost of an electric transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(4): 1091-1098.

[8] VELTEN K. Mathematical Modeling and Simulation: Introduction for Scientists and Engineers[M]. New York: John Wiley and Sons, 2009.

[9] AKBARI T, RAHIMI-KIAN A, BINA M T. Security-constrained transmission expansion planning: A stochastic multi-objective approach[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1): 444-453.

[10] 黄裕春, 杨甲甲, 文福拴, 等. 计及接纳间歇性电源能力的输电系统规划方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 28-34.

[11] 张衡, 程浩忠, 曾平良, 等. 考虑经济性与安全性的

发输电联合优化规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21):62-69.

[12] 张衡, 程浩忠, 张建平,等. 高比例风电背景下计及 N-1 安全网络约束的发输电优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 5929-5936.

[13] 程浩忠, 张程铭, 柳璐,等.可再生能源接入下考虑短路电流限制的发输电鲁棒规划方法[J].电力系统自动化, 2021, 45(10): 68-76.

[14] 楼奕轩, 孙磊, 丁明. 计及 N-1 安全约束和系统恢复能力的发输电拓展规划[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 41-50.

[15] HINOJOSA V H, GALLEGUILLOS N,NUQUES B, et al. A simulated rebounding algorithm applied to the multi-stage security-constrained transmission expansion planning in power systems[J]. International Journal of Electrical Power Energy Systems, 2013,47:168-180.

[16] AGUADO J A, DE LA TORRE S, CONTRERAS J, et al. Market-driven dynamic transmission expansion planning[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 82(1):88-94.

[17] MORTAZ E, FUERTE-LEDEZMA L F, GUTIERREZ-ALCARAZ G, et al. Transmission expansion planning using multivariate interpolation[J]. Electric Power Systems Research, 2015,126:87-99.

[18] LEITE DA SILVA A M, FREIRE M R, HONORIO L M. Transmission expansion planning optimization by adaptive multi-operator evolutionary algorithms[J]. Electric Power Systems Research,2016,133:173-181.

[19] 边巧燕, 徐开, 孙黎滢,等. 考虑风电功率概率分布不确定性的输电系统规划[J].电力系统自动化, 2015, 39(20): 60-65.

[20] 郑静, 文福拴, 李力,等. 计及风电场和储能系统联合运行的输电系统扩展规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 135-142.

[21] 郑静, 文福拴, 周明磊,等. 计及需求侧响应的含风电场的输电系统规划[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 42-48.

[22] MAHDAVI M, KHEIRKHAH A R, MACEDO L H, et al. A genetic algorithm for transmission network expansion planning considering line maintenance[C]//2020 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), IEEE, 2020: 1-6.

[23] POUBEL R P B, DE OLIVEIRA E J, MANSO L A F, et al. Tree searching heuristic algorithm for multi-stage transmission planning considering security constraints via genetic algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 142: 290-297.

[24] 胥威汀, 杨宇玄, 周笑言,等. 考虑输电阻塞盈余的输电网双层扩展规划模型[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 113-120.

[25] 苟竞, 刘方, 刘嘉蔚,等.考虑高铁负荷和风光不确定性的输电网规划方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 156-164.

[26] BAHIENSE L, OLIVEIRA G C, PEREIRA M, et al. A mixed integer disjunctive model for transmission network expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001,16(3):560-565.

[27] JABR R A. Robust transmission network expansion planning with uncertain renewable generation and loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(4): 4558-4567.

[28] LUMBRERAS S, RAMOS A, SÁNCHEZ P. Automatic selection of candidate investments for transmission expansion planning[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014,59:130-140.

[29] MENDONÇA I M, SILVA I C, MARCATO A L M. Static planning of the expansion of electrical energy transmission systems using particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 60:234-244.

[30] SILVA A M L D, MANSO L A D F, RESENDE L C D, et al. Tabu search applied to transmission expansion planning considering losses and interruption costs[C]. Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, IEEE, 2008:1-7.

[31] TOR O B, GUVEN A N, SHAHIDEHPOUR M. Congestion-driven transmission planning considering the impact of generator expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008,23 (2):781-789.

[32] CHARLIN D, RUDNICK H, ARANEDA J C. Transmission expansion under uncertainty in the chilean system via minmax regret with GA[J]. IEEE Latin America Transactions, 2015,13 (3):698-706.

[33] CHOI J, EL-KEIB A A, TRAN T. A fuzzy branch and bound-based transmission system expansion planning for the highest satisfaction level of the decision maker[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005,20(1): 476-484.

[34] KUPRENAS J A. Project management actions to improve

design phase cost performance [J]. Journal of Management in Engineering, 2003(1):25-32.

[35] WANG Y L, SONG S S, GAO M C, et al. Accounting for the life cycle cost of power grid projects by employing a system dynamics technique: A power reform perspective[J]. Sustainability, 2020, 12(8): 3297.

[36] JEROMIN I, BALZER G, BACKES J, et al. Life cycle cost analysis of transmission and distribution systems[C]. 2009 IEEE Bucharest Power Tech, IEEE, 2009:1-6.

[37] JEROMIN I, BALZER G, BACKES J, et al. Life cycle cost analysis of transmission and distribution systems[C]. 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Prague, Czech Republic, 2009:1-4.

[38] LIU H S, LIU J, WANG H G, et al. Analysis of LCC model of high-voltage transmission line[C]. 2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Shanghai, 2012:1-4.

[39] 张宇娇, 孙晓彤, 王杰, 等. 考虑节能导线的 500 kV 输电线路全寿命周期成本评估[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020,42(1):80-86.

[40] GAN L, LI G Y, LIN Jeremy, et al. A bi-level probabilistic transmission planning with intermittent generations based on life cycle cost[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 90: 306-314.

[41] LIU J Y, XIU C, PAN J, et al.Research on transmission line design method based on life cycle cost theory[C]// 2017 Chinese Automation Congress (CAC), IEEE, 2017: 6194-6199.

[42] 许巍, 王慧芳, 杜振东, 等. 输电线路最佳经济寿命区间评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 74-80.

[43] CHEN R, ZHANG L L, YANG D, et al. Research on power-off replacement calculation of transmission line insulators based on life cycle cost[C]// 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), IEEE, 2019: 236-240.

[44] 辛建波, 康琛, 陈田, 等. 基于动态数据的输变电设备全寿命周期成本分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 181-187.

[45] 盛萌, 张书雅. 基于灰色理论的电网设备更换最优时间[J]. 电力建设, 2018,39(6): 131-136.

[46] 俞越中, 朱海峰, 张子阳, 等. 输电线路杆塔接地体选材研究[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(5): 25-31.

[47] ZHANG Y J, WANG Z L, ZHU Y Y, et al. Life cycle cost assessment method considering multiple factors for economic evaluation of cable line steel brackets[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(17): 2488-2498.

作者简介:

杨　丹(1993),女,硕士,从事电力系统相关工作;

倪　江(1990),男,硕士,从事电力系统相关工作;

杨迎昕(1994),女,硕士,从事电力系统相关工作。

(收稿日期:2023-07-03)

(上接第 34 页)

[10] 孔祥玉,刘超,陈宋宋,等.考虑动态过程的可调资源集群多时间节点响应潜力评估方法[J].电力系统自动化,2022,46(18):55-64.

[11] 吴云芸,方家琨,艾小猛,等.计及需求响应的数据中心联盟共享储能规划[J].电力系统自动化,2023,47(7):42-50.

[12] 陈启鑫,高洪超,冯成,等.虚拟电厂动态构建与可信量化:理论分析与关键技术[J].电力系统自动化,2022,46(18):26-36.

[13] KONG Xiangyu, SUN Bowei, KONG Deqian, et al. Home energy management optimization method considering potential risk cost [J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 62 (2020):102378.

[14] 魏小曼,余昆,陈星莺,等.基于 Affinity propagation 和 K-means 算法的电力大用户细分方法分析[J].电力需求侧管理,2018,20(1):15-19.

[15] ELLMAN D, XIAO Y Z. Incentives to manipulate demand response baselines with uncertain event schedules[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1358-1369.

[16] 代心芸,陈皓勇,肖东亮,等.电力市场环境下工业需求响应技术的应用与研究综述[J].电网技术,2022,46(11):4169-4186.

作者简介:

肖钰皓(1995),男,硕士,研究方向为新技术在电力工程中的应用;

李　科(1988),男,硕士研究生,研究方向为数字化关键技术;

苏　军(1991),男,硕士,工程师,研究方向为电力大数据应用。

(收稿日期:2023-06-30)

一种基于 QFD/TRIZ 的高压铁塔微桩成型装备设计

谢 伟[1],范荣全[2],周睿晗[3],郑晓波[4],郭 鑫[3]
(1. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院,四川 成都 610041; 3. 四川大学机械工程学院,四川 成都 610065; 4. 国网四川省电力公司天府新区供电公司,四川 成都 610218)

摘 要:高压输电线路铁塔常位于地形条件苛刻、地质条件复杂、气象状况多变的地区,这使得大型钻孔设备难以到达施工现场,基坑开挖大多只能采用人工挖掘,但人工挖掘难以挖出变直径桩孔。为了减轻人工强度和施工风险并提高施工效率,提出了一种成孔设备设计方案。首先,分析了对当前桩孔钻进施工的现状以及其中存在的问题与用户需求;然后,通过质量功能展开方法从得到的用户需求中发掘出产品设计要求;最后利用发明问题解决理论求解设计要求的冲突,得到组合式变径成孔设备方案。该方案将实现成孔设备的可便捷拆卸装配以及连续变径成孔等功能,可有效地提高变径桩成孔施工的效率和安全性,相对于人工桩孔挖掘具有明显优势。

关键词:高压输电; 微型桩; 创新设计; 装备设计
中图分类号:TM 754 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2024)01-0072-06
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240111

Design of Micro-pile Forming Equipment for HV Steel Tower Based on QFD and TRIZ

XIE Wei[1], FAN Rongquan[2], ZHOU Ruihan[3], ZHENG Xiaobo[4], GUO Xin[3]
(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 4. State Grid Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610218, Sichuan, China)

Abstract: Steel towers of HV transmission line are often located in areas with harsh topographic conditions, complex geological conditions and changing meteorological conditions, which makes it difficult for large-scale drilling equipment to reach the construction site, and most of the pit excavation can only be done by manual digging, but it is difficult to dig variable-diameter pile holes by manual digging. In order to reduce the labor intensity and construction risk and improve the construction efficiency, a design scheme of hole-making equipment is proposed. Firstly, the current situation of pile hole drilling construction is analyzed as well as the existing problems and user requirements. And then, the product design requirements are discovered from the user requirements by the quality function expansion method. Finally, the invention problem solving theory is utilized to solve the conflict of design requirements, and the combined variable-diameter hole-making equipment scheme is obtained. The solution will realize the functions of convenient disassembly and assembly of hole-making equipment and continuous variable-diameter hole-making, which can effectively improve the efficiency and safety of variable-diameter pile hole-making construction, and has obvious advantages compared with manual pile hole excavation.

Key words: HV transmission; micro-pile; innovative design; equipment design

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(SGSCTF00JSJS200095)

0　引　言

中国西部地区电力资源丰富,但电站多位于山区,需要高压输电线路将电力输送至人口聚集区。输电线路铁塔高度可达到 100 m 以上,档距可达到 1000 m 以上。该山区的地质条件和气象条件复杂,输电线路常需要跨越高山河谷及重覆冰区。因此铁塔基桩的安全可靠对线路安全运行非常重要,普通的微桩不能满足铁塔受力的要求,需要铁塔基桩直径达到 600 mm,深度达到 10 m,并且桩孔直径需要连续变化以提高抗拔性能。此外,山地峡谷地形恶劣,交通不便,设备运输能力低下,现有的大型施工设备很难到达[1],人工施工安全隐患突出,而为大型设备开辟施工通道还需毁山毁林,造成环境破坏。因此需要开发便于运输的铁塔基桩成孔设备来满足施工需求以及减小环境破坏。

模块化设计可以降低设备的拆卸和安装难度,为设备的组装和搬运提供便利。目前,国内已经有了一些关于山地模块化钻机的研究,这些钻机能够基本解决在山地地区安装、运输不便的问题,为山地施工带来更多便利[2-3]。但是这些钻机没有考虑到特高压输电线路铁塔的实际条件,即跨距较大、受力复杂,特别是基桩会受到更大的来自垂直方向的力,这对铁塔基桩的力学性能提出了更多要求。普通圆柱桩孔垂直方向力学性能较差,需要改变桩孔形状,而这些设备无法满足这样的需求。因此,需要在现有模块化钻机的基础上做出一些改进,更好地满足各电压等级输电工程实际施工需要。

针对上述的问题,下面基于质量功能展开和发明问题解决理论提出了一种可实现连续变径的微桩成型装置设计方案。该方案是一个模块化设计的钻头,安装在钻机上使用,可以实现在桩成型过程中的连续直径变化,也可以实现对已成型桩孔的再次扩径施工。此外,该装置还可实现损坏钻齿的快速更换,以提高效率。

1　装备的创新设计流程

1.1　QFD 和 TRIZ 简介

质量功能展开方法(quality function deployment, QFD)是在 20 世纪 60 年代由日本专家水野滋和赤尾洋二所提出的,这种方法主要用于将收集到的用户需求转化成为产品需求,然后基于得到的结果对目标进行改进。质量屋作为一种将用户需求转化为设计要求的工具,是该方法的核心要素,使用这种方法可以帮助选择更优的方案、更好地把握需求以及使产品开发更加高效。

发明问题解决理论(теории решения изобретательских задач, TRIZ)是前苏联发明家根里奇·阿奇舒勒在 1946 年创立的。该理论利用归纳总结出的规律和发明原理进行技术矛盾的解决。该理论的核心方法是技术冲突解决原理,使用 40 条发明原理对物理矛盾和技术矛盾给出理想解,每条发明原理有对应的编号。运用该方法可以为开发者提供解决问题的思路,提高问题解决的效率。

将 QFD 与 TRIZ 结合在一起使用,可以弥补单一设计方法的局限性,可以帮助设计者更好地让产品满足用户的需求,因而近年来很多设计者在产品方案设计中运用了 QFD 和 TRIZ 集成的方法。基于这种方法,文献[4]进行了帕金森患者助行器的优化设计;文献[5]设计了木浆纸杯端送装置;文献[6]设计了一种菠萝去皮机。这些研究利用 QFD 和 TRIZ 结合的方法辅助设计人员将用户需求转化为产品设计需求,帮助解决产品设计过程中存在的技术矛盾,使最终得到的设计方案满足用户需要。因此,下面也将 QFD 和 TRIZ 集成的方法用在装备方案的设计中。

1.2　基于 QFD 和 TRIZ 的装置设计流程

使用 QFD 和 TRIZ 集成的方法进行高压铁塔微桩成型装备的设计[7-8],运用的设计流程主要包括以下几个阶段:首先,需要分析挖掘当前高压输电铁塔基桩施工过程中存在的问题和诉求,从中得到用户需求;然后,将各项用户需求进行重要度评价,分析需求和技术特征之间的相关性,构建出产品的质量屋,分析其中存在的矛盾冲突;最后,对这些矛盾冲突进行表述,利用 TRIZ 理论寻找对应的解决方法,从而得到最终设计方案。整个设计流程如图 1 所示。

2　微桩成型装备功能需求确定

2.1　当前施工手段的问题分析

为了使设计出的产品能够满足高压铁塔基桩的实际施工需求,首先需要对实际施工条件和现有施

工手段进行分析,图 2 展示了一些实际的山区施工环境。

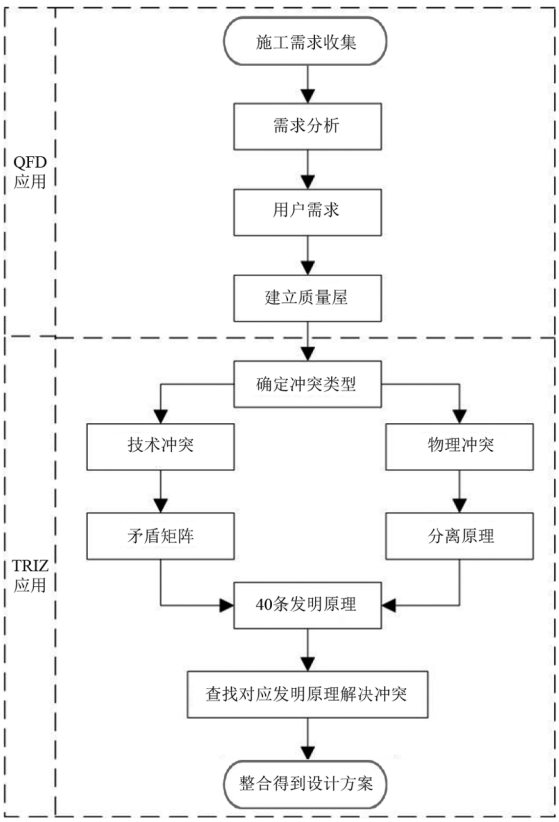


图 1　QFD 和 TRIZ 集成应用的设计流程

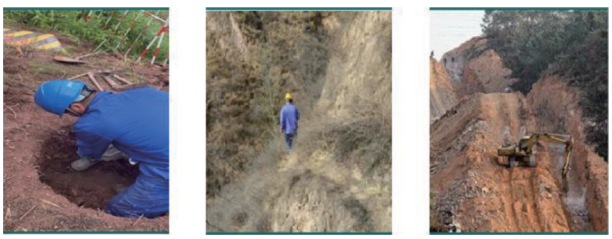


图 2　山区铁塔施工状况

通过对施工条件和环境进行分析可以发现以下几个问题:1)电压等级高的输电线路,相较于普通输电线路需要与地面保持更大的安全距离,这就使得铁塔更加高大,其要求基桩直径也相应增大;2)电压等级高的输电线路跨距大,且线路途经地区气象条件多变,常有大风,这导致铁塔受力情况多变,需具备更高的抗拔性能;3)输电线路途经山区,生态环境较为原始,道路崎岖难行,施工设备运输困难,强行开辟施工道路易造成环境破坏;4)西部山区地质情况复杂,地下常有不同种类的岩石,需要装置能够适应不同硬度的岩层。

为了使高压铁塔拥有更强的承受垂直负载的能力,需要对微桩形态做出适应的改变。已有的研究显示[9-10],通过让桩孔直径在不同深度有不同的数值,改变原普通圆柱形的桩孔形状,比如呈现串珠型、楔形等,可以让建筑基桩能够在垂直方向上承受更大负载,提高其受力性能,让高压铁塔基桩更加稳固可靠。因此让装备具有连续变径功能,可以满足电压等级高的输电铁塔的施工需求。目前已经有一些工程用设备[11],通过对钻头结构进行改进,可以在桩孔的向下掘进过程中同时实现直径的变化,因此进行可变径功能的设计是可行的。

现有的铁塔桩孔成型手段主要包括旋挖钻成孔、冲击钻成孔和人工开挖等。对已有的桩孔成型技术进行分析[12-14],当前市面上存在数量较多的大型基桩成型设备,包括各种旋挖钻机、冲击钻机以及扩底钻机。这些现有装备经过多年的应用改进,技术已经相对成熟,但是它们通常体积较大、重量较重,需要大型运输车辆进行转运。为了将这些设备运输到施工地点需要毁山开路,有些地方甚至根本无法运输。同时这些设备对不同地质条件的适应性差,需携带多种钻头以适应不同地层。然而,现实施工条件则要求装备重量尽量轻,尽量可拆分成多个部分携带。人工开挖则劳动强度大,施工效率低,且存在挖掘过程中石块飞落砸伤施工人员甚至孔壁坍塌发生掩埋的安全隐患。

图 3 展示的是一种模块化钻机平台[3],该平台可以实现钻机的拆分与折叠运输,可将各组件运抵施工现场后再行组装,进行铁塔基桩的成型施工。但是该设备不具备成孔过程中的变径功能,因而需要重新设计钻机的钻头,以满足施工中的实际需求。

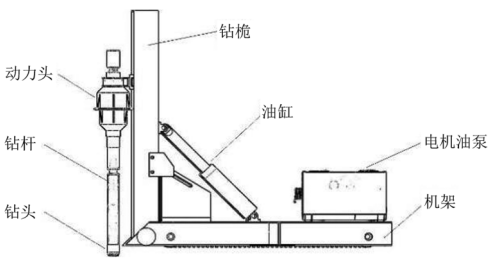


图 3　一种模块化钻机平台

除以上所述外,装备的可靠性、维护的便利性、是否便于加工以及成本等也应该纳入需求考虑范围。将前述的问题进行整理分类,得到装备的功能需求指标,如图 4 所示。

将得到的各项需求进行整理,转化成为尺寸质量、稳定性、多用性、可置换、快速维护、结构、制造性和运输性共 8 项技术特征。

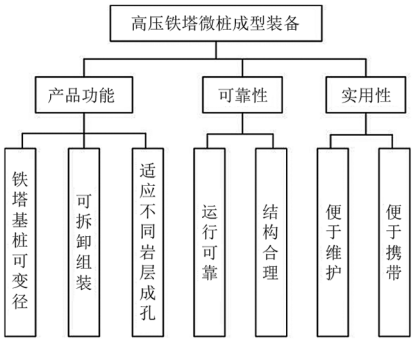


图 4　高压铁塔微桩成型装备的功能需求分解

2.2　微桩成型装备的质量屋建立

基于各项需求本身的重要程度、需求与技术特征的关联程度以及各项技术特征之间的相互关系,构建高压铁塔微桩成型装备的质量屋,用户需求和技术特征之间的关联度使用 0、1、3、5 进行计分,分数越高代表二者关联性越大,使用“+”“-”分别表示技术特征之间的正负相关性。例如,稳定性这一技术特征和运行可靠这一用户需求存在强相关计分为 5,与结构合理这一需求中等相关计分为 3,与可拆卸组装弱相关计分为 1,与其余的用户需求则没有正向联系。技术特征重要度的计算方法为:记第 j 个技术特征与第 i 个用户需求之间的关联程度为 R_{ij},记第 i 个用户需求的重要度打分为 K_i,则技术特征重要度的计算方法为

$$I_j = \sum_{i=1}^{m} K_i R_{ij}$$

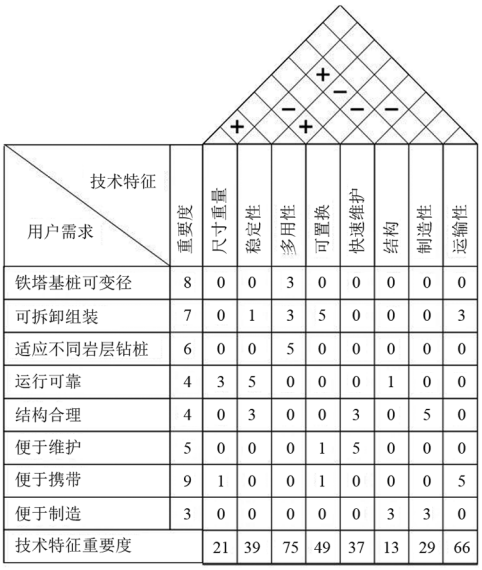
式中:I_j为第 j 个技术特征的重要度;m 为用户需求总数。例如稳定性特征的重要度应为可拆卸组装、运行可靠和结构合理三项用户需求的重要度与相应关联程度计分的乘积之和,为 39。构建的质量屋如图 5 所示。

从图 5 中可以得出,多用性、运输性、可置换、稳定性和快速维护这 5 个技术特征在微桩成型装备设计中更为重要,而尺寸质量、结构和制造性这 3 个技术特征则相对次要。稳定性和可置换、结构与可置换、结构和多用性、快速维护和制造性共 4 对技术特征呈现负相关,即存在 4 对冲突;尺寸重量和稳定性、多用性和可置换、稳定性和结构则呈正相关。

3　微桩成型装备的需求解决方案

3.1　微桩成型装备的冲突分析

对于稳定性和可置换、结构与可置换这两对冲突,由于高压铁塔在野外山地施工受到地形条件限制,现今大多依靠牲畜或滑索运输到施工现场。这就要求各组件需要控制体积和质量以确保这些设备能够被运输,也就是说微桩成型装置需要设计为可拆装的结构便于分开进行运输;但是这会导致装备的结构变得复杂,各种接口增多,运行的稳定性会略有降低。对于结构和多用性这对冲突,同样出于减轻携带难度的考虑,希望能用更少的装备来实现尽量多的功能,通过简单地组装不同功能模块就能对不同硬度岩层的基桩成型施工;但这同样会使结构变得更加复杂。对于快速维护和制造性这对冲突,在山区野外施工条件不如平原地区,设备发生故障后可以用于维修的工具有限,希望设备可以带有快速维护功能,这就需要在装备中增加用于快拆快装的结构;但是这类结构通常会对加工精度存在一定要求,从而会增加生产加工的复杂程度以及成本。



技术特征 / 用户需求	重要度	尺寸重量	稳定性	多用性	可置换	快速维护	结构	制造性	运输性
铁塔基桩可变径	8	0	0	3	0	0	0	0	0
可拆卸组装	7	0	1	3	5	0	0	0	3
适应不同岩层钻桩	6	0	0	5	0	0	0	0	0
运行可靠	4	3	5	0	0	0	1	0	0
结构合理	4	0	3	0	0	3	0	5	0
便于维护	5	0	0	0	1	5	0	0	0
便于携带	9	1	0	0	1	0	0	0	5
便于制造	3	0	0	0	0	0	3	3	0
技术特征重要度		21	39	75	49	37	13	29	66

0-不相关　1-弱相关　3-中等相关　5-强相关

图 5　高压铁塔微桩成型装备的质量屋

3.2　获得冲突的解决方案

使用阿奇舒勒矛盾矩阵来解决技术冲突[16],首先需要对照 39 项标准工程参数将 4 对技术特征进行转化,然后从矛盾矩阵表中选择合适的发明原理来解决冲突。39 项标准工程参数是 TRIZ 理论对大量工程特征的归纳总结,每一项标准工程参数有对应的编号,例如 No.1 为运动物体的质量,No.2 为静止物体的质量等,一共 39 项。在 39 项工程技术参数中选择恰当的条目描述技术特征,表 1 列出了上述冲突问题的转化结果。

表 1 冲突的 TRIZ 问题转化

冲突序号	负相关特征	39 条标准工程技术参数	矛盾类型
1	稳定性 可置换	No.27 可靠性 No.36 系统的复杂性	技术矛盾
2	结构 可置换	No.12 形状 No.36 系统的复杂性	技术矛盾
3	结构 多用性	No.12 形状 No.35 适应性,通用性	技术矛盾
4	快速维护 制造性	No.34 可维修性 No.32 可制造性	技术矛盾

然后需要确定要改善和恶化的参数。例如在第 1 对冲突中,想要实现装备的可拆装置换,则需要改善的工程参数为“No.36 系统的复杂性”,需恶化的工程参数为“No.27 可靠性”。最终确定改善的工程技术参数为“No.36 系统的复杂性”“No.35 适应性,通用性”和“No.34 可维修性”,恶化的工程技术参数为“No.27 可靠性”“No.12 形状”和“No.32 可制造性”。在确定好需要改善和恶化的参数之后,就在矛盾矩阵中找出对应的发明原理序号,利用这些发明原理实现冲突的解决。矛盾矩阵表中给出了可以解决对应冲突的若干条发明原理编号,表 2 仅列出了需要用到的部分矛盾矩阵,表格中的数字代表的是对应发明原理的编号。

表 2 部分矛盾矩阵对应的发明原理

改善参数	恶化参数		
	No.27 可靠性	No.12 形状	No.32 可制造性
No.36 系统的复杂性	13,35,1	29,13,28,15	27,26,1,13
No.35 适应性,通用性	25,13,8,24	15,37,1,8	1,13,31
No.34 可维修性	11,10,1,16	1,13,2,4	1,35,11,10

根据表 2 中给出的结果查找 40 条发明原理,第 1 对冲突在矛盾矩阵中所对应的发明原理为“13 反向作用”“35 物理或化学参数改变”“1 分割”,这对冲突选择发明原理 1 比较适合,考虑到高压铁塔的施工环境,将一个整体部件分开成为几个容易装卸的部分,使野外山地运输更加便利。

第 2 对冲突在矛盾矩阵中所对应的发明原理为“29 气压和液压结构”“13 反向作用”“28 机械系统的替代”“15 动态特性”。这对冲突可选用发明原理 29 利用液压系统驱动变径装置,也可以选择发明原理 28 利用电磁装置替代机械装置施加力。考虑到施工过程中有大量碎渣且扩径过程中存在较大阻力,电磁装置所需功率较大,但山区缺少大功率电源,使用液压系统可以更好满足需求。

第 3 对冲突在矛盾矩阵中所对应的发明原理为“15 动态特性”“37 热膨胀”“1 分割”“8 重量补偿”。这对冲突可以选择发明原理 1 将不同的功能拆分为不同的模块,也可以利用发明原理 15 将装置设为可动连接,在执行不同功能时进行切换。考虑到后一种方法会让机构变得更多更庞大,增加故障率同时也不利于运输,因此选用前一种方法。

第 4 对冲突在矛盾矩阵中所对应的发明原理为“1 分割”“35 物理或化学参数改变”“11 事先防范”“10 预先作用”。在这对冲突中综合运用发明原理 1 和原理 10 进行解决,将钻齿的安装部位与装备主体进行分离,并事先预备好备用钻齿,以便在钻齿发生断裂损坏时不使用额外的工具设备即可进行快速更换。

4 微桩成型装备设计方案

根据所述需求分析、基于 QFD 的需求转化以及基于 TRIZ 的冲突求解的有关内容,设计了一种高压铁塔的微桩成型装备,该装备采用组装式设计,通过拼装的方式实现装备的不同用途。装备总体分为上下两个部分,上半部分用于实现变径功能以及与钻杆之间的连接,下半部分用于实现向下钻进功能,两个部分之间可以拆开连接以便于分开携带。变径装置主要由液压缸、扩张臂以及连接二者的连杆组成,使用液压系统驱动是为了降低发生机械故障的概率,液压杆向下推出即扩张臂向外伸出,向上缩回即向内收回,以此实现桩孔成型过程中的直径变化,如图 6 所示。其液压控制回路如图 7 所示,该回路为液压增压回路,1YA 通电时工作油缸 4 推出进行扩径,同时通过增压油缸 7 增大推出过程中的压力防止无法顺利扩径,2YA 通电时工作油缸 4 缩回,停止扩径,换向阀 3 位于中位时保持直径不变。

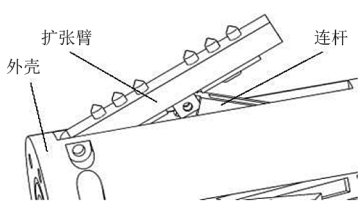


图 6 变径装置

此外,考虑到成孔过程中钻齿由于磨损常常会发生损坏,设计了快装结构,使其在野外施工时方便

更换,如图 8 所示。更换钻齿时卸下钻齿的安装板,换上预先准备好的备用钻齿,然后重新装好安装板即可完成更换。

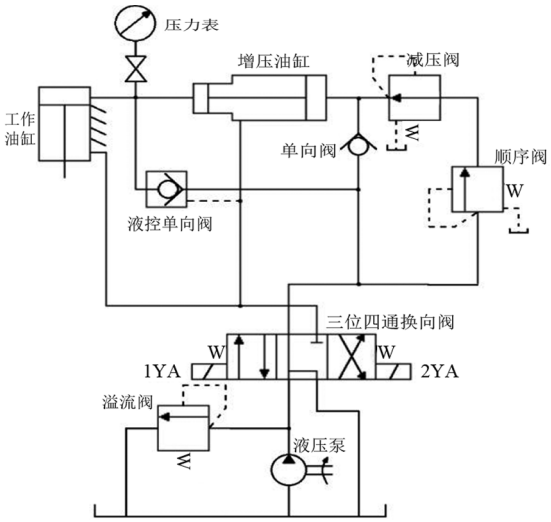


图 7　变径装置液压控制回路

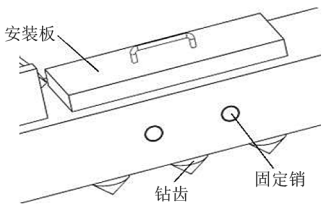


图 8　拆换钻齿结构

钻进部分设计有两种模块,分别为用于在普通岩层钻进的旋挖模块以及用于破碎坚硬岩层的冲击模块,以适应高原山区复杂多样的地质状况。普通岩层成孔时使用旋挖模块即可,在遇到坚硬的岩层时,拆卸下旋挖模块,安装上冲击模块即可继续施工,若经过先期勘测已经知晓施工地区岩层硬度较高,可直接安装冲击模块进行施工,节省时间。安装冲击模块时如图 9 所示。

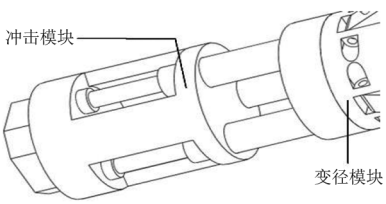


图 9　加装冲击模块

使用时先组装钻头,将变径装置安装完成后将钻进模块安装至壳体下方,连接液压管路,然后将组装好的钻头固定至钻杆下端,更换钻进模块时将钻头升起,安装冲击模块后再继续施工。加装钻进模块完成后如图 10 所示。

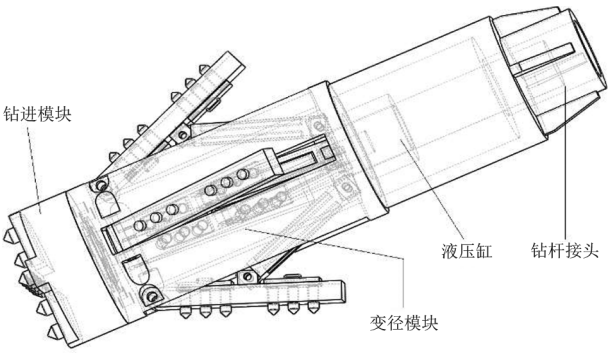


图 10　装备整体结构

5　结　论

上面通过对山区高压铁塔微桩施工中存在的问题进行研究,利用 QFD 方法和 TRIZ 理论进行了矛盾冲突分析和解决,设计了一种高压铁塔微桩成型装备的方案。该设计方案可以实现在微桩成型过程中的连续变直径,并且可以适应不同硬度地层的工作需求,可拆分携带满足高原山地施工过程中的运输需求。

下一步将针对微桩成型后孔内仍会残留较多废渣的问题,探究设计新的模块或结构以提高成型过程中的排渣效率。结合有限元分析等方法进一步优化结构,在保证可靠性的前提下减轻重量。

参考文献

[1]　陈路,裴燕,胡蓉,等.山区输电线路机械化施工的现状及对策[J].电力勘测设计,2018(11):63-66.

[2]　黄志强,喻洪梅,马亚超,等.山地物探电动钻机模块化设计及安全性分析[J].工程设计学报,2022,29(2):153-160.

[3]　董杰,范荣全,贺前,等.山区输电线路微型桩模块化钻机的研制[J].四川电力技术,2022,45(5):26-30.

[4]　韦艳丽,冀源,王超凡,等.基于 QFD&TRIZ 的帕金森患者助行器优化设计研究[J].包装工程,2023,44(2):158-166.

[5]　陆武慧,赵哲.基于 QFD 和 TRIZ 的木浆纸杯端送装置设计[J].包装与食品机械,2021,39(4):69-73.

[6]　任工昌,张博文,张膺之.QFD 与 TRIZ 在菠萝去皮机设计中的应用[J].包装工程,2020,41(7):157-163.

(下转第 110 页)

某背靠背换流站柔性直流换流变压器出线布置方案比较与选择

殷 勤,李沛准
(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司,广东 广州 510663)

摘 要:换流站站址周围有居民小区,人口密度较大,需要减少换流站对周边环境的影响。柔性直流变压器作为换流站的噪声源和主要设备之一,如何布置、采用何种出线方式是研究的关键问题。基于已投运换流站的典型出线及布置方案并结合某工程的具体布置要求,给出了柔性直流变压器采用油气套管、空气套管及出线方向不同组合等 6 种出线方案,并分析了每种出线方案的优缺点。从试验与备用相更换的便利性、出线结构的成熟性、站内布置空间可行性以及对网侧进线方式的限制性等对不同出线方案进行比较后,建议该工程采用阀网长轴同侧出线结构,即柔性直流变压器采用阀侧、网侧均为空气套管且同一方向侧出的布置方案。该方案试验和运维便利性好,节约站内布置尺寸,可适应不同网侧进线方式。

关键词:柔性直流变压器; 出线结构; 同侧出线
中图分类号:TM 402 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2024)01-0078-06
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240112

Comparison and Selection of Layout Scheme for Flexible HVDC Transformer in A Back-to-back Converter Station

YIN Qin, LI Peizhun
(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: There are residential areas around the converter station, and the population density is relatively large. In order to promote the smooth implementation of the project and reduce the impact of converter station on the surrounding environment, as one of the noise sources and main equipmentof converter station, how to layout and what kind of outlet method for flexible HVDC transformers are the key issues to be studied. Based on the typical outlet and layout scheme of converter station in operation, and combined with the specific layout requirements of converter station, six outlet schemes of flexible HVDC transformer using oil-gas bushing or air bushing, and different combinations of outlet direction are given, and the advantages and disadvantages of each outlet scheme are analyzed. Different outlet schemes are compared from the convenience of test and replacement of standby phase, the maturity of outlet structure, the feasibility of space arrangement in the station, and the restriction of outlet method etc. It is suggested that the outlet structure with the same side of the long axis is adopted for the converter station, that is, transformer adopts the arrangement scheme that both the valve side and the grid side are air bushing and the same direction is out of the side, which is convenient for testing, operation and maintenance, saves the layout size in the station, and can adapt to the different grid side into the line.

Key words: flexible HVDC transformer; outlet structure; outlet structure with the same side

0 引 言

已投运的某背靠背柔性直流换流站站址周边大部分为规划的工业区,站址北侧为已有住宅小区、东侧为规划的工业区、西南为自然村落,人口密度较大。工程建设方案必须考虑与周围环境的协调一致[1-2]。周边小区居民主要在噪声问题、变电站设备感观问题等方面提出了反对建设意见。为了利于工程推进实施,减少项目建设完成后对周边环境的影响,作为换流站的主要噪声源与核心设备,有必要开展柔性直流换流变压器(以下简称为柔直变)出

线布置方案的研究工作。

目前国内外柔性直流输电工程中,由于柔直变不需要阀侧套管伸入阀厅,柔直变的网侧、阀侧套管出线方式多与常规交流变压器类似,网侧、阀侧套管从油箱顶盖斜向上出线或者从油箱侧壁出线后再向上。这种出线方式的柔直变一般考虑在户外布置,采用 box-in 技术对换流变压器本体进行封闭来降低噪声,但噪声能降低的程度有限。因此,下面提出了柔直变的多种出线方式并进行比选,给出适应所述工程的建议方案。

1　柔直变布置方案的需求

与以往换流站的选址相比,所述换流站站址离小区距离是最近的,因此柔直变的噪声问题和设备的感观问题较为突出。从减少对小区居民影响的角度出发,并结合运行维护的需求,提出该柔直变布置的需求为:

1)为了降低裸露设备对小区居民的感观影响,以及柔直变本体噪声及冷却器噪声对周边小区的影响,需要采用全户内布置形式;

2)柔直变有多种出线布置方案,需要比较试验与备用相更换的便利性、出线结构的成熟性、站内布置空间可行性以及对网侧进线方式的限制性等,推荐适合该工程的出线布置方案。

2　换流变压器典型出线布置方案

2.1　常规直流换流变压器

为便于接线并保证换流变压器布置尺寸与阀厅布置尺寸配合,常规直流换流变压器出线一般采用如图 1 所示方式:阀侧套管短轴侧出线,伸进阀厅;网侧套管采用油箱顶部出线[3-5];网侧、阀侧均采用空气套管。

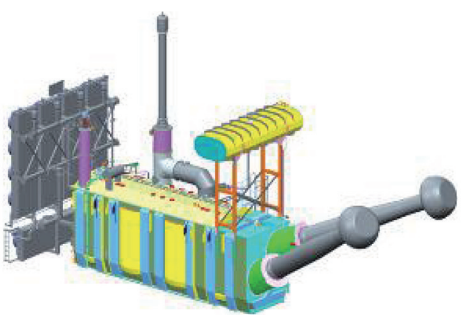
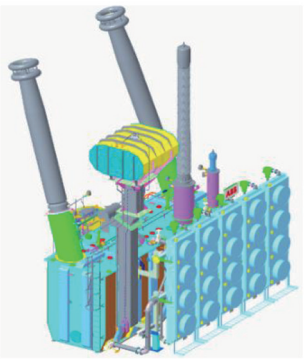


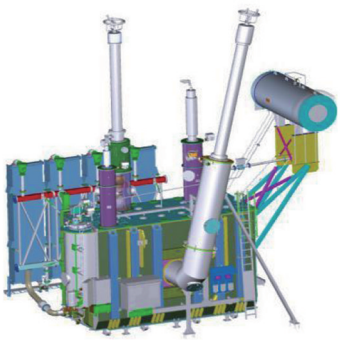
图 1　常规直流换流变压器出线方式

2.2　柔性直流换流变压器

已投运的柔性直流输电工程中,柔直变主要有两种出线方式:1)网侧、阀侧套管从油箱顶盖斜向上出线,如图 2(a)所示;2)网侧、阀侧套管从油箱侧壁出线后再向上[4,6],如图 2(b)所示。



(a) 从油箱顶盖斜向上出线



(b) 从油箱侧壁出线

图 2　柔性直流换流变压器出线方式

3　柔直变出线方式比选

由于邻避效应突出,所述换流站柔直变在布置时需满足如下条件:

1)该站柔直变采用全户内布置,减少噪声对周边的干扰;

2)由于此换流站增城侧离小区较近,应尽量减少架空线的设置,因此柔直变增城侧网侧采用 GIS 分支母线进线;而穗东侧离小区较远,从降低造价与方便运维的角度考虑,穗东侧网侧推荐采用架空进线。

根据以上条件,提出了 6 种不同的柔直变出线布置方案,如表 1 所示。下面针对柔直变不同的出线布置方式,分别给出平面、断面图,并分析各自的优缺点。

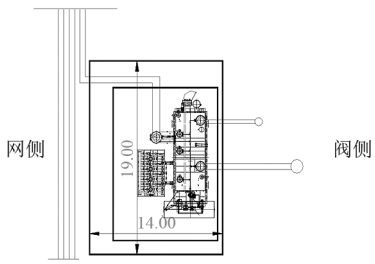
3.1　方案 1:网侧采用油气套管,阀侧采用空气套管侧出线

网侧进线采用 GIS 分支母线与油气套管连接,阀

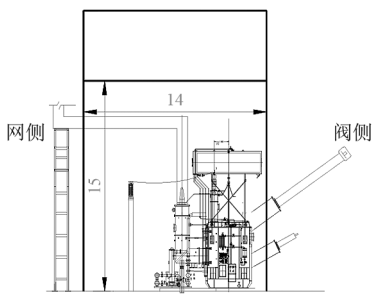
侧进线采用变压器套管侧出。结合主流变压器的询资尺寸,柔直变室净空尺寸设计为 19 m×14 m×15 m。柔直变区域横向尺寸约为 45 m。方案 1 的柔直变室布置如图 3 所示。

表 1　柔直变出线布置方案

方案	网侧	阀侧
1	油气套管	空气套管侧出线
2	油气套管	空气套管向上出线
3	油气套管	油气套管
4	空气套管向上出线	空气套管向上出线或侧出线
5	空气套管一侧侧出	空气套管另一侧侧出
6	空气套管同一侧侧出	



(a) 平面布置



(b) 断面布置

图 3　方案 1 柔直变室布置

方案 1 的优点为:网侧、阀侧套管分别布置在变压器两侧,接线较为清晰,避免交叉;同时阀侧、网侧套管出线均为常规出线结构。

方案 1 的缺点为:

1)对现场试验、备用变压器更换造成一些限制与不便。由于柔直变网侧采用油气套管,与 GIS 分支母线连接时需设置可拆卸断口便于对 GIS 进行工频耐压试验。柔直变备用相更换时,需要拆除室内网侧部分 GIS 管母线。同时,在对柔直变进行感应局部放电的现场交接试验时,网侧需装设临时试验套管。另外,受房间高度限制,需要在室外完成交接试验后再整体推入变压器室。

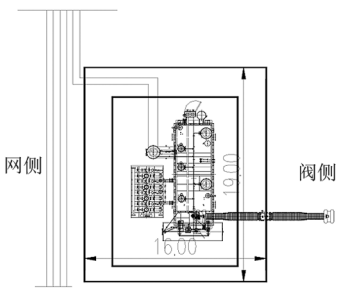
2)限制了穗东侧网侧进线形式:为了保证两侧柔直变形式统一,减少备用变压器的数量,穗东侧与增城侧均需采用 GIS 分支母线进线。

3)增加了 GIS 分支母线设备的制造难度。如图 3(a)所示,柔直变网侧进线为平行的 GIS 分支母线,除了柔直变运输路段,柔直变室前也需要满足柔直变带套管运输的尺寸(约 14 m×15 m)要求。但 GIS 标准母线长度约 7 m,最大跨距不超过 10 m,底部支撑的高度一般不超过 7.5 m,因此这里需要设备厂家采用特殊设计,增加了设备的制造难度。

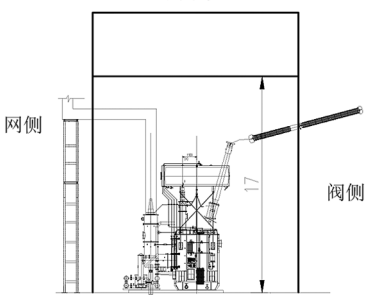
4)网侧中性点采用空气套管,中性点管母线需要采用多根电缆并联进行汇流,柔直变更换时,需要拆除电缆头及支柱绝缘子,增加了备用相更换时间。

3.2　方案 2:网侧采用油气套管,阀侧采用空气套管向上出线

网侧进线采用 GIS 分支母线与油气套管连接,阀侧进线采用变压器套管向上出。柔直变室净空尺寸为 19 m×16 m×17 m。柔直变区域横向尺寸约为 45 m。方案 2 的柔直变室布置如图 4 所示。



(a) 平面布置



(b) 断面布置

图 4　方案 2 柔直变室布置

方案 2 的优、缺点与方案 1 基本一致,区别在于方案 2 的阀侧套管向上出线与阀侧设备连接时需要增加穿墙套管,设备费与设备维护工作有所增加。

3.3　方案 3:网侧、阀侧均采用油气套管

柔直变网侧、阀侧均为油气套管,采用 GIS 分支母线与油气套管连接。柔直变室净空尺寸按 18 m×16 m×13 m。柔直变区域横向尺寸约为 45 m。方案 3 的柔直变室布置如图 5 所示。

方案 3 在方案 1、方案 2 的基础上,将阀侧套管

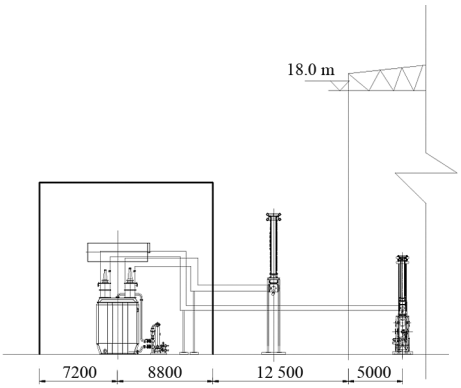


图 5　方案 3 柔直变室布置(断面)

修改为油气套管。其优点为:与方案 1、方案 2 相比,柔直变的高度有所降低,可以压缩柔直变室的高度;油气套管出线均为常规出线,其结构、制造与运行经验丰富。

方案 3 的缺点为:

1)由于柔直变网侧、阀侧都采用油气套管,与方案 1 相同,对现场试验、备用变压器更换造成一些限制与不便;

2)同方案 1,限制了穗东侧网侧进线形式;

3)同方案 1,增加了 GIS 分支母线设备的制造难度;

4)网侧、阀侧中性点采用空气套管,中性点管母线需采用多根电缆并联进行汇流,同样会增加备用相更换时间。

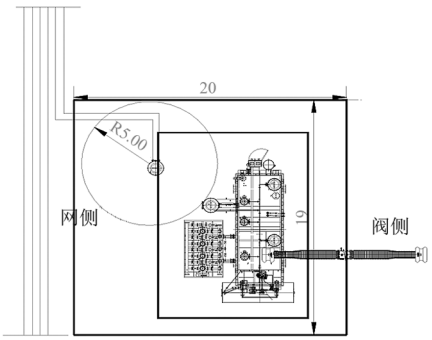
3.4　方案 4:阀侧网侧均为空气套管,网侧向上出线,阀侧向上出线或侧出线

方案 4 与鲁西、张北柔直变布置类似,网侧套管从油箱顶部向上出线,阀侧从油箱顶部向上出或从油箱侧壁侧出。但由于柔直变采用全户内布置,需考虑柔直变户内与户外进线部分的连接方案。网侧进线可采用交流 500 kV 穿墙套管进线或者 GIS 分支母线穿墙,阀侧可采用交流 300 kV 穿墙套管。

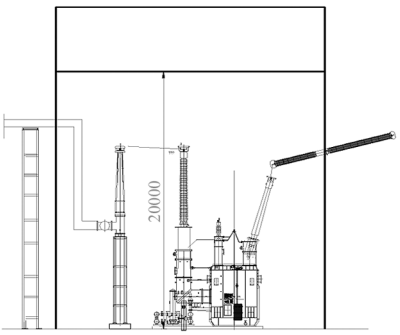
增城侧采用 GIS 分支母线,建议网侧采用 GIS 分支母线穿墙进柔直变室。柔直变网侧采用空气套管,需要增加 GIS 分支母线末端空气套管与柔直变网侧空气套管进行连接。布置需考虑空气净距以及试验距离;考虑均压环外径(1.0 m)及墙体厚度等,柔直变室宽度方向需要增加 4 m;考虑各厂家网侧套管高度不一致,柔直变室的净空尺寸不小于 19 m×20 m×20 m。

穗东侧网侧进线采用架空进线,需要设置 500 kV 穿墙套管,以实现网侧进线引入柔直变室。考虑 500 kV 交流穿墙套管安装空间及带电距离,初步估计柔直变室的净空尺寸不小于 19 m×20 m×22 m。

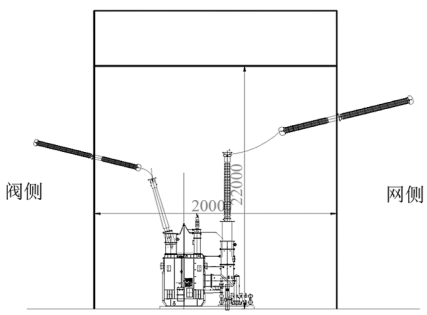
方案 4 的柔直变室布置如图 6 所示。



(a) 平面布置



(b) 增城侧断面布置



(c) 穗东侧断面布置

图 6　方案 4 柔直变室布置

方案 4 的优点与方案 1 一致,同时柔直变可以与 GIS 分支母线分开进行试验,可以适应网侧 GIS 或架空进线两种接线形式。

方案 4 的缺点为:

1)柔直变备用相更换时,需要拆除室内网侧部分 GIS 侧套管及分支母线。对备用变压器更换造成一些限制与不便;

2)同方案 1,增加了 GIS 分支母线设备的制造难度;

3)同方案 3,由于阀侧及网侧中性点的布置问题会增加备用相更换时间;

4)穗东侧靠网侧需采用穿墙套管,变压器运输

时需要考虑备用相与穿墙套管的电气距离,单侧增加横向尺寸约 12 m;

5)柔直变区域横向尺寸较大,约为 55 m。

3.5 方案 5:阀侧网侧均为空气套管,分别向两侧侧出线

柔直变网侧空气套管侧出与 GIS 分支母线连接,阀侧套管侧出与启动回路设备连接。方案 5 的柔直变室断面布置如图 7 所示。

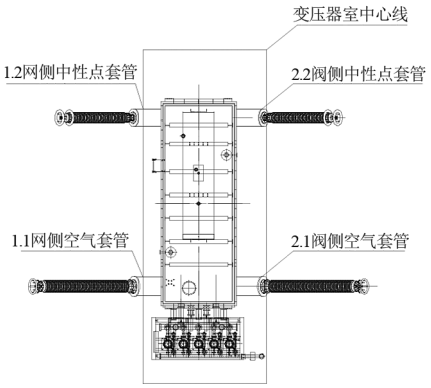


图 7 方案 5 柔直变室布置(断面)

方案 5 的优点为:网侧、阀侧均采用空气套管侧向穿出柔直变室,节省了穿墙套管及 GIS 分支母线长度;柔直变套管与 GIS 分支母线网侧及阀侧有明显断开点,便于两者分开试验;可以适应网侧 GIS 或架空进线两种接线形式。

方案 5 的缺点为:

1)两侧均为套管侧出,无法打开柔直变室大门,柔直变移出需要破除柔直变室网侧墙壁。

2)柔直变室宽度由柔直变器身及套管升高座宽度确定,与其他方案相比房间较窄,不利于运行维护。

3)柔直变带套管在站内转运时,长度方向需要考虑阀侧套管长度+网侧套管长度+柔直变本体宽度共约 18 m;再考虑带电距离要求柔直变转运时长度方向需要约 24 m,占用空间较大。

4)同方案 1,增加了 GIS 分支母线设备的制造难度。

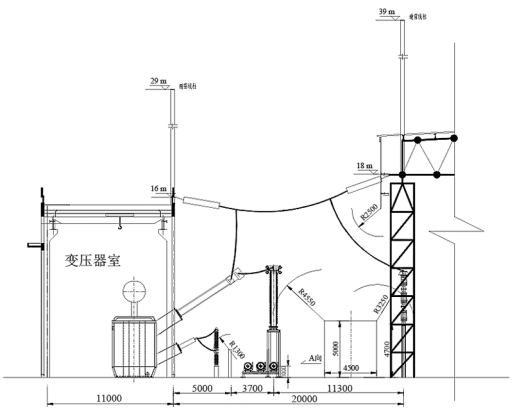
5)柔直变区域横向尺寸较大,约为 57 m;主控楼前的变压器运输空间需增加 7 m。

3.6 方案 6:阀侧网侧均为空气套管,同一方向侧出线

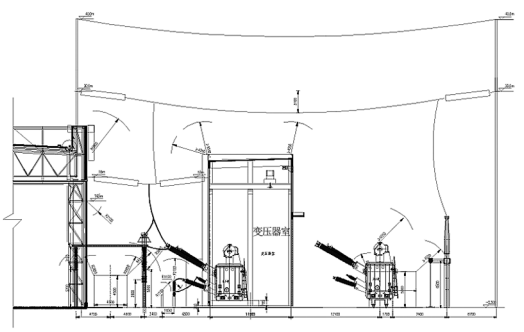
方案 6 的柔直变室布置如图 8 所示。柔直变网侧、阀侧采用空气套管从柔直变室的阀侧方向伸出。增城侧网侧 GIS 分支母线的起点为增城站出线间隔,跨过柔直变运输道路,终点为柔直变室与启动回路室间的空地。增城侧网侧采用 GIS 分支母线通过短跳线与柔直变网侧空气套管相连。柔直变阀侧空气套管通过跳线与启动回路区域的设备相连。

穗东侧网侧 GIS 分支母线的起点为 GIS 配电装置,终点为 GIS 室侧的空地。柔直变网侧空气套管通过跳线与 GIS 分支母线套管相连,柔直变阀侧空气套管通过跳线与启动回路区域的支柱绝缘子设备相连。

柔直变阀侧、网侧中性点套管均采用空气套管,各相的中性点通过铝管母线进行汇流。



(a) 增城侧断面



(b) 穗东侧断面

图 8 方案 6 柔直变室布置

方案 6 的优点为:柔直变网侧和阀侧均采用空气套管侧向伸出,不用额外增加空气套管的断口,节省了网侧与阀侧的穿墙套管。柔直变的整体高度与网侧阀侧采用油气套管相当。此方案避免了网侧阀侧连线交叉的情况,且柔直变区域横向尺寸仅约 40 m。

方案 6 的缺点为:出线结构成熟性相对较低。

3.7 方案对比

将 6 个方案进行对比,如表 2 所示。

方案 1 至方案 5 均为成熟的柔直变出线方式。

方案 3 的试验、备用相更换便利性较差,相比方案 6,柔直变区域横向尺寸增加 5 m,网侧只能为 GIS 进线,GIS 分支母线有多处高跨;网侧、阀侧接线

表 2　柔直变出线各种布置方式对比

对比项	方案 1	方案 2	方案 3
试验是否便利	否	否	否
备用相更换是否便利	否	否	否
出线结构是否成熟	是	是	是
站内布置空间可行性	横向尺寸 45 m	横向尺寸 45 m	横向尺寸 45 m
对网侧进线的限制	两侧均为 GIS 进线	两侧均为 GIS 进线	两侧均为 GIS 进线
网侧阀侧接线是否交叉	否	否	是
GIS 分支母线制造难度	大	大	较大
对比项	方案 4	方案 5	方案 6
试验是否便利	是	是	是
备用相更换是否便利	否	否	是
出线结构是否成熟	是	是	是
站内布置空间可行性	横向尺寸 55 m	横向尺寸 57 m、纵向增加 7 m	横向尺寸 40 m
对网侧进线的限制	无	无	无
网侧阀侧接线是否交叉	否	否	否
GIS 分支母线制造难度	大	较大	一般

还存在交叉,给运维带来不便。

方案 1、方案 2 相比方案 3 来说,网侧、阀侧接线没有交叉,运维更为便利。

方案 4、方案 5 与方案 1、方案 2 相比,试验便利性好,网侧进线不受限制,但方案 4 柔直变区域横向尺寸相比方案 6 增加约 15 m,方案 5 柔直变区域横向尺寸相比方案 6 增加约 17 m,纵向尺寸需增加约 7 m。

方案 6 与方案 4、方案 5 相比,备用相更换便利性好,不增加横向尺寸,GIS 分支母线仅有两处高跨,但出线结构成熟性低一点。

针对方案 6,即柔直变阀网长轴同侧出线结构形式,国内几大变压器厂家进行了结构及出线初步设计,提供了引线整体布置图;在此基础上,计算分析该结构形式的变压器在本体结构、电磁场分布、内绝缘、生产工艺等方面相对常规变压器的变化,评估其技术成熟度及风险性;同时对比类似出线结构的工程案例,分析了所提方案是否存在技术的难度及风险。得出以下结论:

1)常用的换流变压器(柔直变)厂家均采用单相四柱、双柱并联结构。线圈排列结构为铁芯—阀侧线圈—网侧线圈—调压线圈,与传统换流变压器结构相同。

2)阀侧绕组采用线圈端部轴向出线,网侧绕组采用辐向出线;经过仿真,电场强度、磁场强度、机械强度均满足设计要求;与常规换流变压器阀侧套管由短轴侧侧出出线、网侧套管从油箱顶盖出线方式相比,该工程阀侧采用阀、网长轴侧出线,内部引线更短,更利于出线装置的布置。

3)各厂的类似出线结构变压器均有可参考的工程案例,可满足工程建设要求。

因此建议所述工程采用方案 6。

4　结　论

由于所述背靠背换流站地理位置的特殊性,工程建设方案须考虑与周围环境的协调一致性,上面对柔直变压器的各种出线布置方案进行了比较研究。针对所述工程的实际情况,从试验与备用相更换的便利性、出线结构的成熟性、站内布置空间可行性、对网侧进线方式的限制性、网侧和阀侧接线是否交叉以及 GIS 分支母线的制造难度等多个方面分析了每个方案的优缺点,推荐选择柔直变压器阀侧、网侧均为空气套管且同一方向侧出的方案。该方案试验、运维便利性好,节约站内布置尺寸,可适应不同网侧进线方式且 GIS 分支母线的制造难度也较低。通过对主流变压器厂家的调研,认为该方案的出线结构成熟,技术成熟度较高,不存在技术风险。推荐所述工程采用该出线方式。

对于其他不同的工程特点与平面布置方式,也可以根据前述 6 种出线方式进行比较,选择柔直变合适的出线方式。

参考文献

[1]　梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术,2012,36(4):1-9.

[2]　朱博,姚晓健,吴彦伟,等. 中通道柔直背靠背换流站的布置优化研究[J].南方能源建设,2021,8(S1):39-45.

[3]　郝为瀚,郭金川,周钰,等. ±800 kV 柔性直流换流站换流变区域电气布置研究[J].南方能源建设,2018, 5(3):67-71.

[4]　简翔浩,卢毓欣,郝为瀚,等. 广州换流站柔性化改造设计方案研究[J]. 南方能源建设,2020,7(4):54-60.

[5]　黄阳,王建武,鲁翔,等. 集约式绿色换流站设备选型及优化布置研究[J]. 南方能源建设,2020,7(1):107-112.

[6]　谢畅,陈建华,钱锋,等. 超高压柔性直流换流站换流区优化布置研究[J].浙江电力,2021,40(3):29-34.

作者简介:

殷　勤(1989),女,硕士,研究方向为变电站和换流站设计。

(**收稿日期:**2023-06-07)

输电杆塔塔型智能识别与台账的智能提取研究

黄宇航,杜永永,熊 杰,张博洲,李倩竹,刘 锐
(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

摘 要:杆塔作为输电线路的主心骨,其运行安全重于泰山,因此利用智能化的方式获取高压杆塔的台账参数信息对快速掌握杆塔的运行状态具有重要的意义。首先,利用分类后的输电线路三维激光点云数据,研究了常规塔型的高精度智能识别算法;然后,提出了杆塔横担几何尺寸、杆塔塔高等台账信息的智能提取方法;最后,通过塔型的识别、杆塔台账信息提取以及线路拟合的案例分析验证了所提方法的应用价值。结果表明,所提方法可实现高精度的输电杆塔台账信息提取,进而快速确定杆塔的运行状态,提高运维质效。

关键词:输电杆塔; 杆塔塔型智能识别; 杆塔台账智能提取
中图分类号:TM 726.3 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2024)01-0084-07
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240113

Research on Intelligent Recognition of Transmission Tower Types and Intelligent Extraction of Its Account Information

HUANG Yuhang, DU Yongyong, XIONG Jie, ZHANG Bozhou, LI Qianzhu, LIU Rui
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: As the backbone of transmission lines, the operation safety of towers is much important. Therefore, it is of great significance to obtain the information of HV towers' account parameters by intelligent means to quickly grasp the running state of towers. Firstly, high-precision intelligent recognition algorithms for conventional tower types are studied by using the classified 3D laser point cloud data of transmission lines. Then the intelligent method for extracting the information of cross arm of towers is proposed. Finally, the application value of the proposed method is verified by the recognition of tower type, the extraction of tower account information and the line fitting case analysis. The results show that the proposed method can achieve high-precision information extraction of transmission tower account, so as to quickly determine the running state of lines and improve the quality and efficiency of operation and maintenance.

Key words: transmission towers; intelligent recognition of tower type; intelligent extraction of tower account information

0 引 言

随着城市用电负荷需求的逐年增加,电网必须相应地提高自身的容量,随之而来的便是更多、更高电压等级的输电线路的建设。高压杆塔是构成输电线路的骨架,然而随着线路运行年限的增加,杆塔可能存在沉降、滑移等本体缺陷[1-2]。倘若因为本体缺陷导致杆塔杆材脱落、安全电气距离不足甚至倒塔,则会对电网系统带来不可估量的毁灭性后果[3-5]。因此,良好地掌握杆塔运行状态同样关乎线路运行安全。然而,日益增加的线路运维体量、复杂的运行环境以及运维人员的老龄化等问题,给输电线路运维方式的高质效转变带来了更严峻的挑战[6-9]。

目前,大部分运维人员仍然需要到达杆塔所在地,对杆塔进行近距离的人工体检方可获取杆塔的

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(511904230004)

运行状态。工程中普遍采用全站仪对杆塔的台账参数进行测量。然而采用全站仪测量流程较为繁琐,受地形制约较大且人工、时间成本较高,测量效率较低[10-12],随着电力系统的体量日益增加,已无法满足智能化输电运维的要求。近年来,随着无人机激光雷达应用的普及[13],激光雷达测量技术已广泛应用到输电线路勘测和巡检中[14-16],其所获得的三维点云数据将极大程度上提高运维质效。在此基础上,有科研人员提出 PointNet++深度学习网络算法,直接从点云数据的原始特征入手,分析杆塔点云数据的全局特征与局部特征,进而根据点云分布特征或点云分布的疏密对其分类,实现杆塔点云数据的预处理[17-19]。

智能高效的线路杆塔运维模式,要求运维人员能够利用智能化手段,快速、精确地识别杆塔类型并自动提取杆塔的台账参数,为进一步分析杆塔层面的缺陷与隐患奠定基础。下面基于输电线路三维点云数据,研究杆塔塔型的精确识别算法,并在此基础上计算杆塔横担几何尺寸、横担间距等参数信息,实现杆塔台账信息的智能提取,最后应用该算法于实际工程中来提高运维质效。

1　基于杆塔几何特征的塔型智能识别

所提出的塔型识别方法流程如图 1 所示。

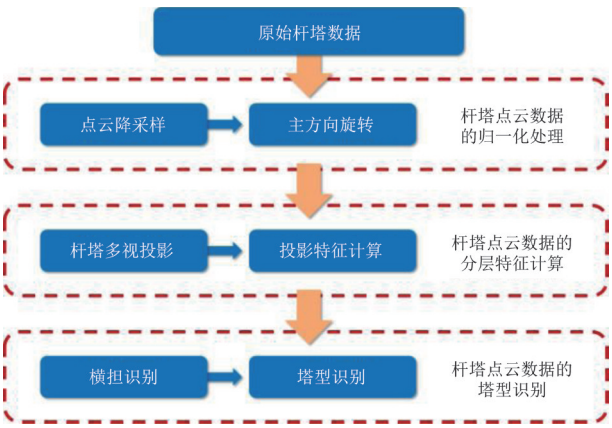


图 1　输电杆塔识别流程

由图 1 可见,该方法主要包含以下几个步骤:

1)点云归一化:通过降采样以及多视旋转实现点云归一化处理。

2)杆塔特征计算:在完成归一化后,对杆塔进行降维投影,再对投影点云进行体素化分割,以便于后续特征计算。

3)塔型识别:获取每个网格内点云的几何特征,分析相邻体素的特征变化以及关联,结合多塔型样本数据几何特征,实现杆塔塔型的准确识别。需要特别注意的是,由于实际工程中的塔型异变种类过多但比例并不多,因此所提出的塔型识别算法仅针对猫头塔、酒杯塔、门型塔、干字塔、羊角塔 5 种常规塔型。

1.1　点云归一化

激光雷达系统获取的点云密度受多方面影响,不同型号扫描仪获取的点云密度存在差异,同款设备获取的点云密度也会受无人机飞行速度、飞行高度等因素影响。为了消除不同密度特征对塔型识别的干扰,在不破坏杆塔自身几何结构特征前提下,通过体素采样算法对点云进行降采样。

受输电线路设计影响,输电杆塔在实际建设过程中往往具备不同的朝向,使得杆塔点云在 XOY 面上呈现不同方向排布。为了利用杆塔在结构上的对称性,以获取不同方向上杆塔特征,需要将杆塔进行旋转处理。

利用主成分分析(principal component analysis, PCA)获取旋转角度 θ 用于点云旋转。将杆塔点云质心作为点云旋转原点坐标,投影点云质心作为投影后的原点坐标,旋转后点坐标计算如式(1)所示,旋转效果如图 2 所示。

$$\begin{cases} x_i' = x_i\cos\theta - y_i\sin\theta - C_x \\ y_i' = x_i\sin\theta + y_i\cos\theta - C_y \end{cases} \tag{1}$$

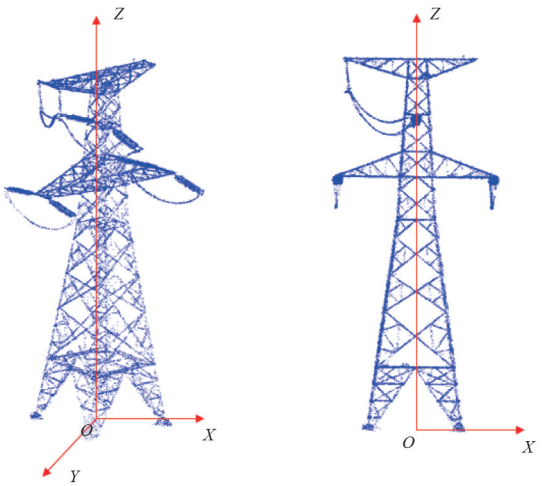
式中:x_i、y_i 分别为单独聚类体杆塔点云中第 i 个点的横、纵坐标值;x_i'、y_i'分别为第 i 个点旋转后的点云横、纵坐标值;C_x、C_y 为投影点云质心坐标。

经过上述计算后,便可将 3 个方向不对称的三维点云数据旋转为以 Z 轴对称的点云数据,方便后续的计算。

1.2　杆塔塔头点云数据分割

不同类型的输电杆塔具备各自的几何结构特征。在完成点云旋转后,首先对点云进行降采样投影,以获取杆塔的正视投影图,如图 2 所示。常见的输电杆塔塔型可通过塔身、塔头以及横担的几何特征加以识别。常见杆塔塔身结构有 V 型塔身、门型塔身、梯型塔身,如图 3 所示。

识别塔身类型能够辅助确认杆塔类型。如 V 型塔身往往只有 V 型塔才具备,而门型塔身同样是门型塔独有的点云特征。为了识别塔身的点云结构



（a）原始杆塔点云　　（b）正视投影

图 2　干字塔旋转归一化效果

（a）V型塔身　（b）门型塔身　（c）梯型塔身

图 3　常见杆塔结构

数据，通过统计所构建的杆塔点云高程直方图，对主视投影图与侧视投影图进行特征分析。通过对杆塔自下而上分层，根据电压等级调整分层间距；分层后点云会有明显的疏密段，定义云分布较密的层为一段，分段统计投影点云的几何特征，将塔身与塔头分割开来分别进行识别。点云对应的层数位置如式(2)所示。

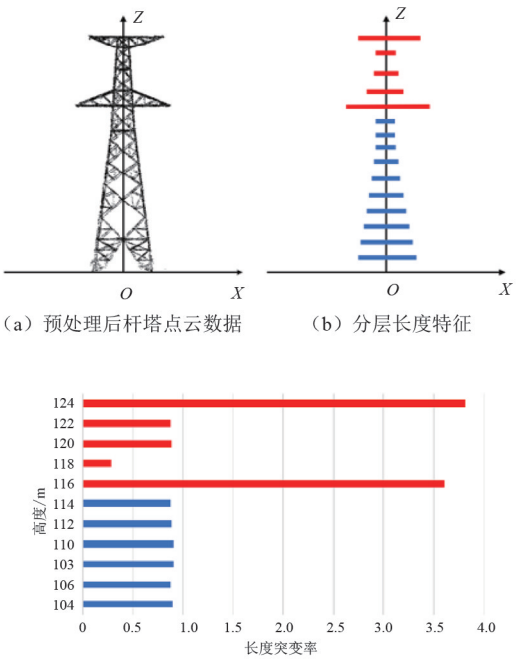
$$L_n = \mathrm{ceil}[(Z_n - Z_{\min})/2] \tag{2}$$

式中：L_n 为第 n 个点云数据点所在层数；Z_n 为第 n 个点云数据点的高程值；$Z_{\min}$ 为点云数据集中最低点的高程值；ceil 为向上取整函数。

各层杆塔点云数据的长宽具备线性规律，因此可通过几何特征区分塔身塔头，进而计算各层点云几何特征以及点云分布特征。图 4 展示了两层横担干字塔的 XOZ 面投影特征，红色代表塔头在主方向 X 轴的投影长统计，蓝色代表塔身在 X 轴的投影长统计。可以看出梯型塔身部分几何尺寸在 X 轴上投影由下往上呈现递减分布规律，在到达塔头位置时，其投影几何尺寸产生了长度突变。长度突变率增大，以此区分塔身塔头点云数据。式(3)为投影主方向长度突变率。

$$R_n = \frac{l_{x_n}}{l_{x_{n-1}}} \quad (n > 1) \tag{3}$$

式中：l_{x_n} 为第 n 层点云数据的投影长；$l_{x_{n-1}}$ 为第 $n-1$ 层点云数据的投影长；R_n 为投影主方向长度突变率。



（a）预处理后杆塔点云数据　（b）分层长度特征

（c）分层长度突变率特征统计

图 4　两层干字塔分层投影特征

由图 4(c)可见，由下而上 R_n 的大小不等，分析 R_n 的分布规律便可识别杆塔塔头的数据特征，进而快速确定该杆塔所对应的杆塔塔型。

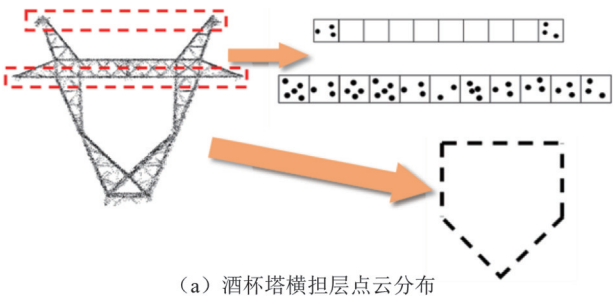
1.3　杆塔塔型识别

不同塔型的杆塔横担具备不同的结构特征，这些结构特征会体现在点云分布中。由于塔型结构复杂，横担层往往是局部范围内的极大值，因此，依据主方向投影长很难准确识别横担位置及层数。为了研究杆塔点云分布特征，在杆塔分层基础上对各层横担进行体素化，以 1 m^3 的体素格网为单位进行点云划分，分别统计各体素格网中的点云分布规律。遍历点云数据分别获取每个体素格网的最小 X 坐标 $x_{\min}$、最小 Y 坐标 $y_{\min}$ 及最小 Z 坐标 $z_{\min}$，逐点划分其所属三维格网。具体计算如式(4)所示。

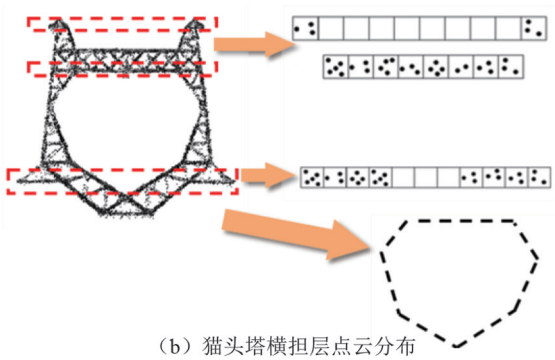
$$\begin{cases} G_x = \mathrm{ceil}[(x - x_{\min})/l] \\ G_y = \mathrm{ceil}[(y - y_{\min})/l] \\ G_z = \mathrm{ceil}[(z - z_{\min})/h] \end{cases} \tag{4}$$

式中：x、y、z 分别为点云数据在三维空间里面的 X、Y、Z 方向坐标；l 为体素边长；h 为体素高度；G_x、G_y、G_z 分别为点云在各体素的相对坐标点云所属体素的行、列、层。

图 5 展示了酒杯塔与猫头塔的横担层体素化后的点云分布特征，最上层横担承担地线固定，该层点云在几何尺寸上具备局部极大值。其余横担则作为输电线的固定支撑，在几何特征中具备分布连续性，即各体素区间内都存在点云分布。因此，通过统计相邻层点云的几何特征变化规律，可进行杆塔横担位置及层数的确定。



（a）酒杯塔横担层点云分布

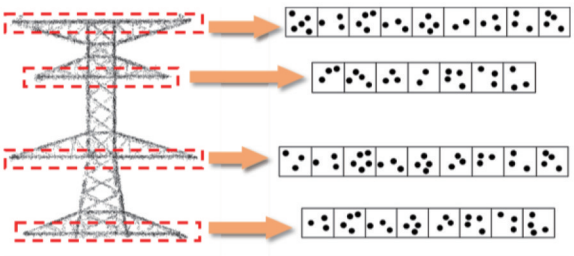


（b）猫头塔横担层点云分布

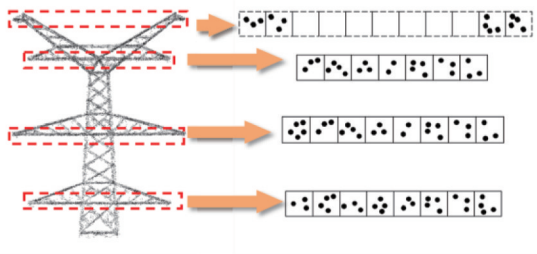
图 5　酒杯塔与猫头塔的横担层点云分布

猫头塔与酒杯塔由于塔头设计构造不同，中间存在镂空结构设计，体现在体素化格网中的中间塔头区域存在较多的空格网。此外，通过统计非空体素格网在该层点云中的比例，可以区分横担所在位置。首先，最上层均为连接地线的横担层，酒杯塔和猫头塔在中心区域均存在较多空体素格网，但酒杯塔最下层横担点云具备强连续性，体现在该层点云均为非空体素格网，而猫头塔下层横担中心区域存在明显的空体素格网。此外，酒杯塔只有两层横担，而猫头塔则具有三层横担，因此可通过横担层数进行识别。

图 6 展示了干字塔和羊角塔的横担层体素化后的点云分布特征。干字塔和羊角塔同样具备多层横担，且各层横担体素格网均具有较强的连续性及明显的主方向长度突变率。通过各层主方向突变特征，可以确定横担层数。塔头结构设计的差异性决定了塔顶层横担分布于两侧“羊角”位置，其剩余体素网格中不存在或仅存在少量点云。相较于干字塔的顶层横担各体素格网中均存在点云分布，两者存在明显特征差异，可利用此差异识别羊角塔及干字塔。



（a）干字塔横担层点云分布



（b）四层羊角塔横担层点云分布

图 6　干字塔和羊角塔的横担层点云分布

通过上述方法，即可利用杆塔的三维点云数据，结合不同塔型的特征分布，识别出点云所对应的杆塔塔型。由于门型塔的点云数据结构较上述塔型来说较为简单，更容易识别，因此其识别方法无庸赘述，点云分布如图 7 所示。

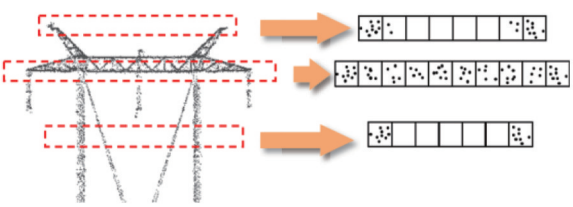


图 7　门型塔的横担层点云分布

进一步，可利用上述方法提取杆塔以及线路的台账信息，快速确定杆塔的运行状态。

2　输电杆塔台账参数的智能提取

杆塔的台账参数主要包括杆塔横担几何尺寸、

呼称高、横担间距、塔倾角等，这里主要介绍杆塔中心点的提取以及杆塔横担参数的提取。

2.1 杆塔中心坐标的计算

由于杆塔塔身结构分明，且其点云存在较少遮挡所引起的缺失情况，而杆塔的塔头点云数据，则有更为明显固定的几何特征。因此通过塔身的点云数据进行杆塔中心点坐标的计算。

在第 1.2 节中获取杆塔塔身点云后，通过质心量算方法获取杆塔塔身质心坐标，即杆塔中心坐标。质心量算是描述地理空间分布最可用的单一量算之一，通过质心量算可有效减少因噪点引起的杆塔中心点计算位置偏移。对杆塔塔身点云数据进行加权平均运算可实现杆塔中心点获取，如式(5)所示。

$$\begin{cases} X_G = \dfrac{\sum_i w_i x_i}{\sum_i w_i} \\ Y_G = \dfrac{\sum_i w_i y_i}{\sum_i w_i} \end{cases} \tag{5}$$

式中：X_G、Y_G 为目标的质心坐标；i 为杆塔塔身点云序号；w_i 为杆塔点云离散权重；x_i、y_i 为点云坐标。

通过上述方法，即可确定杆塔的质心坐标，由此确定杆塔的标准位置，进而提取其他的杆塔参数。

2.2 杆塔横担参数计算

为降低噪点对杆塔横担参数识别造成的影响，基于第 1.3 节中识别的杆塔横担区间数据，首先通过离群点滤波进行噪点剔除；进一步再通过构建各层横担点云数据的最小包围盒拟合横担的尺寸，其构建流程如下：

1)利用 PCA 方法获得点云的 3 个主方向，获取质心。协方差特征计算方法为：将点云存储于 k-d 树中，通过 k 近邻搜索邻域点进行协方差矩阵计算，通过构建协方差矩阵，计算出特征值 λ_1、λ_2、λ_3 ($\lambda_1>\lambda_2>\lambda_3$)以及与其对应的特征向量 v_1、v_2、v_3。

2)利用第 1.3 节和第 2.1 节中所获得的横担主方向和质心坐标，计算出点云旋转角度 θ，计算方法如式(6)所示。将输入点云转换至原点，且主方向与坐标系方向保持一致，建立变换到原点的点云的包围盒。

$$\theta = \arccos \frac{v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}} \tag{6}$$

进一步将生成的包围盒依照旋转角逆向旋转，与原始点云进行匹配。生成的包围盒效果如图 8 所示，通过计算包围盒尺寸以确定横担的长宽数据，如图中 l 和 w 所示。

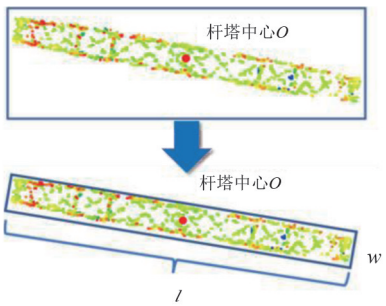


图 8 横担包围盒设计

完成各层横担包围盒设计后，即可通过包围盒边界求得横担长宽，通过相邻横担层的高程值可求得横担间距，如图 9 所示。

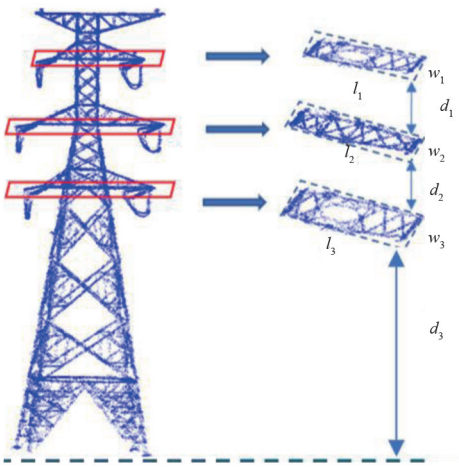


图 9 杆塔横担间距

在上述方法的基础上，利用杆塔塔头的几何特征，结合第 1 章所识别出的塔型信息，便可进一步计算塔全高、呼称高等杆塔台账信息。结合相邻杆塔的几何位置关系，利用第 2.1 节所计算的质心坐标，便可提取杆塔的转角、档距等参数信息，计算方法与第 2.1 节、第 2.2 节类似，在此不再赘述。

在利用智能化手段快速获取了杆塔的台账信息后，结合输电线路的点云信息，即可进一步进行线路通道的隐患分析，全方位快速高效地获取线路运行状态，及时发现线路异常，保障线路安全。

3　实际工程应用

3.1　杆塔的塔型识别及台账提取工程应用

为实现杆塔识别及参数提取,使用 Visual Studio 2019 C++ 11 在标准环境下开发算法。实验平台的 CPU 为 Intel(R) Core(TM) I7-9700K,运行内存为 16 GB,系统为 WIN10。为验证算法的有效性,选取了 220 kV 丹连一二线杆塔数据集作为实验数据。该线路长 11.5 km,具有 34 基杆塔。利用扫描范围最大可达 300 m,具备 360°全范围测量功能的 CBI-300P 激光雷达系统,搭配 MIRACLE 3 无人机系统采集得到杆塔点云数据。

对采集到的数据进行归一化处理。首先降低数据集杆塔点云密度,再根据式(1)将杆塔点云数据旋转至 XOZ 平面,使得杆塔主方向大致平行于 X 轴,以便于后续特征分析。根据第 1.3 节的方法,在通过构建分层几何特征对各层点云进行体素化后,确定横担位置及所在层数,以实现不同杆塔类型的准确识别。

在识别杆塔塔型后,结合已有杆塔台账信息,利用 Alundar Platform 点云处理软件量测杆塔横担长宽信息作为杆塔参数标准值。将参考值与通过所提的杆塔参数计算算法自动提取杆塔的台账参数进行对比,以检验算法的精度。结果表明,本次共成功识别 31 基杆塔,识别成功率为 91.12%。由于篇幅原因,表 1 仅展示 4 号、8 号及 28 号杆塔塔型识别结果以及参数提取结果,表 2 为这三基杆塔实际运行台账信息。图 10 为上述三基杆塔的分类后点云照片。

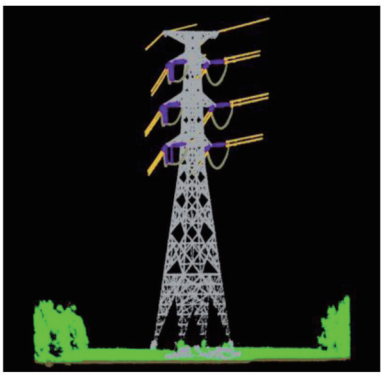
表 1　杆塔塔型识别与参数提取结果(部分)

杆塔号	杆塔类型	横担层数	用途	杆塔参数提取成果				
				杆塔高度/m	呼称高/m	转角/(°)	倾斜角/(°)	档距/m
4	干字	4	耐张塔	56.023	45.600	176.160	0	348.800
8	羊角	4	直线塔	58.959	48.495	177.377	0	400.925
28	羊角	4	直线塔	61.775	50.022	179.994	0	424.526

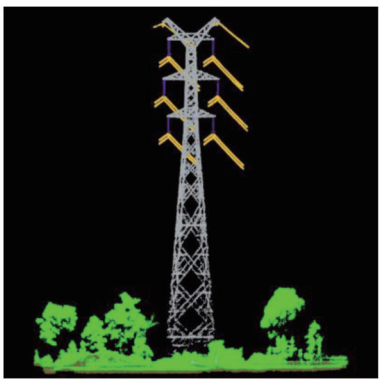
分析图 10 与表 2 的数据可知,所提出的方法可准确识别横担层数。对比表 1 和表 2 的参数信息可知,所提方法识别出的台账信息精度更高,误差小于 1.6%。所提的点云智能提取方法与目前工程常用的全站仪测量方法对比如表 3 所示。

表 2　220 kV 丹连一二线线路运行台账信息(部分)

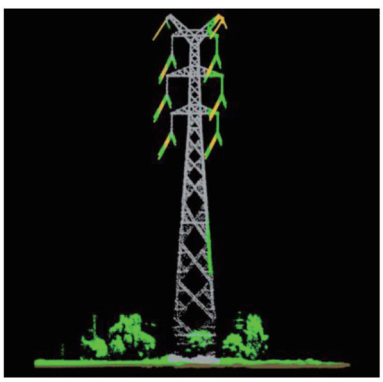
杆塔号	横担层数	杆塔高度/m	呼称高/m	转角/(°)	倾斜角/(°)	档距/m
4	4	57	46	176.135	0	348
8	4	59	48	177.389	0	401
28	4	62	51	179.994	0	424



(a) 4号杆塔



(b) 8号杆塔



(c) 28号杆塔

图 10　杆塔点云图片

通过表 3 对比分析可知,所提方法能够快速、动态地提取杆塔台账信息,相比传统的全站仪测量方法,极大地增加了运维人员的运维质效,更大程度上保障线路的杆塔运行安全。

基于此方法,在线路验收过程中,可采用无人机验收的方式,采集一次杆塔的点云数据提取杆塔的

台账信息,从而判定项目建设是否合格。

表 3 所提方法与全站仪测量方法对比

对比项	所提方法	全站仪测量
测量效率	电脑处理点云数据测量,效率较高	人工搭建平台测量记录,效率较低
测量成本	低	高
测量过程	仅需无人机采集点云数据	需人工到达现场测量,测量时间较长
精确性	电脑计算测量,精度较高	通过人工测量,受制因素较多,误差较大
是否受地形影响	否	是

3.2 线路拟合的工程应用

在实际线路中,杆塔横担起着电力线连接固定的作用。通过所识别到的杆塔横担位置,可以进行单根电力线聚类拟合,以便于输电线路的巡检分析应用。以相邻杆塔的同层横担为起始位置,与横担相连接的电力线点为聚类中心,进行单根电力线聚类工作,便可获得电力线路点云数据的聚类。具体聚类效果如图 11 所示。

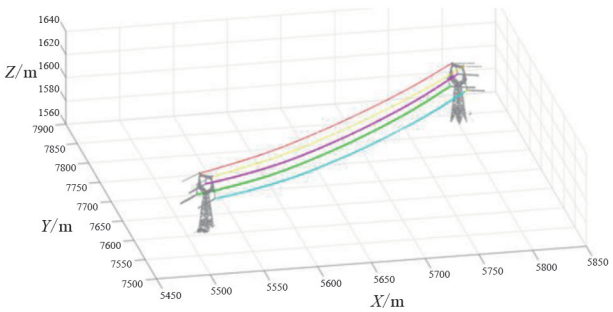


图 11 线路点云聚类

电力线三维模型可被分解为 *XOY* 平面、*XOZ* 平面或 *YOZ* 平面两个模型。其中,*XOY* 平面的电力线分布可以用一元一次方程拟合表示。而 *XOZ* 平面模型则包含有悬链式、一元二次、二元二次方程等模型。

电力线路在 *XOY* 平面可被视为横截直线式方程,如式(7)所示,它是电力线在 *XOY* 平面的投影拟合而成。通过杆塔的横担坐标在 *XOY* 平面投影后能确定单档电力线的两个端点,再通过投影点云坐标最小二乘法拟合生成直线模型,两个横担坐标的投影点则确定了拟合直线的范围区域。

$$L_1(a,b):y = ax + b \tag{7}$$

式中:a 为斜率;b 为截距;$L_1(a,b)$ 为拟合得到的 *XOY* 平面的电力线分布。

在 *XOZ* 平面的方程模型为电力线在竖直平面下的拟合曲线。在进行应用时,电力线被视作无刚性的柔性悬链式线条,依照此假设,电力线的理想模型为悬链式模型。而基于悬链式模型推导而来的电力线拟合方程则为悬链式方程。然而,在实际应用中,悬链式方程对电力线的拟合精度却并不高,二元二次多项式模型被视为悬链式模型的近似表达,并伴随更高的精度。因此,采用二元二次方程组作为电力线三维方程式模型,如式(8)所示。

$$L_2(A,B,C):z = A(x^2 + y^2) + B\sqrt{(x^2 + y^2)} + C \tag{8}$$

式中:$L_2(A,B,C)$ 为拟合得到的三维空间电力线分布;A、B、C 为拟合系数。

如此一来,运维人员只须采集输电杆塔的三维点云数据,便可利用所提取的横担坐标拟合出输电线路的弧垂情况,结合短时间内线下树竹、房屋等的点云数据并不会发生太大变化的特性,进而便可分析线路的隐患情况。

4 结 论

上面基于分类后的三维输电杆塔点云数据,研究了 5 种常规杆塔塔型的精确识别算法,并在此基础上提出了线路台账信息的智能提取方法。从应用情况可知,所提出的方法可快速识别杆塔塔型,识别成功率高于 90%;参数的提取精度更高,可精确到小数点后 3 位,且误差小于 1.6%。在利用智能化手段快速获取了杆塔的台账信息后,结合输电线路的静态点云信息,即可进一步对线路通道进行隐患分析,全方位快速高效地获取线路运行状态,及时发现线路异常,保障线路安全。

基于三维点云数据的智能化处理手段,可以极大程度上提高输电线路的运维质效,让运维人员仅仅采集一次杆塔点云数据便可以掌握杆塔的运行状态,进而进行相应的诊断。这为输电线路的智能化发展、线路的动态增容、电力杆塔的建设验收以及优化调度等工作奠定了坚实的基础。

参考文献

[1] 张宏志.500 kV 输电线路典型缺陷分析图册[M].北京:中国电力出版社,2009.

[2] 全国架空线路标准化技术委员会线路运行分技术委员会.架空输电线路运行规程:DL/T 741—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.

(下转第 104 页)

基于轻量 AlexNet 的电容型电压互感器故障诊断

漆梓渊[1],吴　浩[1],陈伟哲[1],罗春兰[1],吴　杰[2]
(1. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院,四川 宜宾　644002;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都　610041)

摘　要:电容型电压互感器(CVT)是重要的一次侧电压监测元件。针对环境温度、湿度以及元件老化等因素造成的电容型电压互感器一次侧电容上下臂击穿或互感器二次侧短路等故障,提出了一种基于轻量 AlexNet 的电容型电压互感器故障诊断方法。该方法利用 Matlab 建立了 CVT 电路模型,分别对高压臂电容击穿、低压臂电容击穿以及互感器二次侧短路 3 种典型的故障进行仿真。采集 CVT 二次侧电压数据,利用马尔可夫变迁场将其转化为特征矩阵,最后使用轻量化的 AlexNet 神经网络对电压特征矩阵进行故障分类。仿真实验证明,所提方法在不拆除 CVT 的情况下,能准确检测出 CVT 的故障类型。

关键词:电容型电压互感器;特征提取;AlexNet 神经网络;故障诊断
中图分类号:TM 451　**文献标志码**:A　**文章编号**:1003-6954(2024)01-0091-07
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240114

Lightweight AlexNet-based Fault Diagnosis for Capacitor Voltage Transformers

QI Ziyuan[1], WU Hao[1], CHEN Weizhe[1], LUO Chunlan[1], WU Jie[2]
(1. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science&Engineering, Yibin 644002. Sichuan, China; 2.State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:Capacitor voltage transformers (CVT) are important primary voltage monitoring components, but due to the influence of ambient temperature, humidity, aging of the components and other factors caused by capacitor upper and lower arm breakdown in primary side of capacitor voltage transformer and short circuit in secondary side of the transformer and other faults, a light-weight AlexNet-based fault diagnosis method for capacitor voltage transformer is proposed. This method uses Matlab to build a CVT circuit model and simulates three typical faults, namely, capacitance breakdown of high-voltage arm, capacitance breakdown of low-voltage arm and short circuit in secondary side of the transformer. The voltage data in secondary side of CVT are collected and transformed into feature matrices using Markov transition fields.Finally the voltage feature matrices are classified into faults using a light-weight AlexNet neural network. The simulation experiments prove that the proposed method can accurately detect the fault type of CVT without removing the CVT.

Key words: capacitor voltage transformer; feature extraction; AlexNet neural network; fault diagnosis

0　引　言

由于电容型电压互感器(capacitor voltage transformers,CVT)在长时间运行过程中会受到环境的影响,容易出现各种故障。当 CVT 一次侧发生故障时,二次侧的监测电压将会传递错误电压信号到继电保护装置,造成保护的误动作;同时,CVT 的二次侧发生短路,继电保护装置将不能检测到一次侧线路的故障电压,保护装置将不会动作,导致电网瘫

基金项目:四川省科技厅项目(2022YFS0518,2022ZHCG0035);人工智能四川省重点实验室项目(2020RZY03)

痪。因此,对电容型电压互感器的故障及时进行检测并准确判断故障类型有助于电力系统安全运行。

文献[1]将有故障的 CVT 进行拆除,使用电桥平衡法分别测量 CVT 绝缘电阻、电容量以及介质损耗进行综合判断诊定出故障。文献[2]通过对故障 CVT 进行解体,发现其内部的中压变压器受潮进水,导致了绕组间短路,从而引起了 CVT 单相失压。文献[3]通过解体 CVT 的方式测量电容并分析 A 相与 C 相的高压臂电容故障,提出检测 CVT 二次侧电压波动取值范围对一次侧故障进行判断。文献[4]通过解体 CVT,诊断出 CVT 一次绕组高压端的断点故障。文献[5]通过 CVT 的诊断实验与解体检查,诊断出 CVT 低压臂电容的击穿故障。文献[6]与文献[7]提出在不拆高压接引线的情况下,使用等变比测试与穿心电流互感器相减的方式,测试电桥平衡,但是测试的前提也是将 CVT 解体。文献[8]引入了机器学习中 K-means 聚类算法,使用滑动时窗法进行数据的扩展,通过测量故障时 CVT 二次侧异常电压的不同突变情况判断电容的击穿类型。

虽然上述算法能对电容型电压互感器的故障进行检测,但需要对设备拆解,才能进一步确定故障发生的位置,这需要耗费大量的物力财力。所以下面提出了一种基于轻量 AlexNe 神经网络的 CVT 故障诊断方法,在不对电容型电压互感器拆解的情况下,利用故障发生时 CVT 二次侧的异常电压进行故障类型的判断。

1 CVT 建模与数据采集

1.1 CVT 模型建立

根据 CVT 的结构以及工作原理[9],使用 Matlab 对 220 kV 的 CVT 进行建模,如图 1 所示。

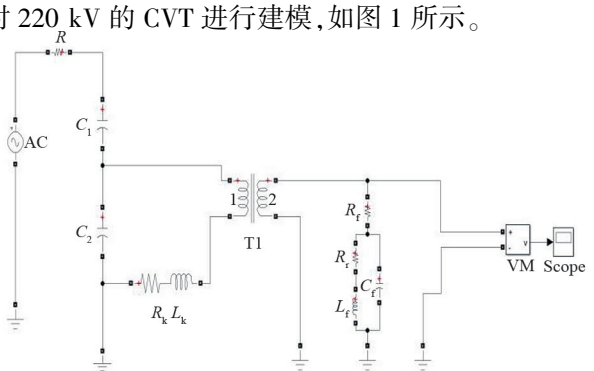


图 1 CVT 仿真模型

CVT 的故障可以分为高压臂电容击穿故障、低压臂电容击穿故障、二次侧短路故障,利用所建模型对这 3 种故障进行仿真。当电容击穿故障后电容值将减小,使用电容值很小的 C_{break} 代表击穿后的电容;在进行故障仿真时,用开关控制不同种类故障接入,开关的控制方式设置为高电平开关触发、低电平开关关断。

1)模拟高压臂电容 C_1 击穿故障:闭合连接击穿电容 C_{break} 的开关,同时断开电容 C_1 的开关,击穿电容 C_{break} 将会接入运行。

2)模拟低压臂 C_2 电容击穿故障:开关会断开电容 C_2,击穿电容 C_{break} 的开关闭合,接入击穿电容 C_{break}。

3)模拟二次侧发生短路故障:二次侧的故障开关直接闭合,二次侧电压直接接地。

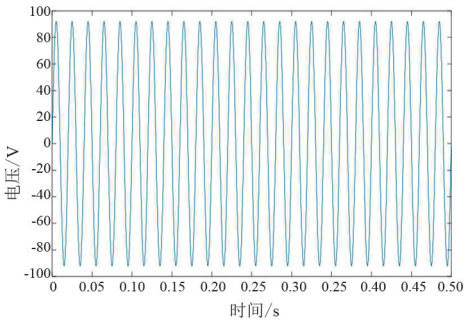
1.2 仿真结果分析与数据采集

以图 1 所示 CVT 仿真模型为对象,设置系统频率为 50 Hz,总仿真时间为 0.5 s,在 0.25 s 时施加击穿故障,仿真结果如图 2 所示:无故障时 CVT 二次侧的电压值稳定在 CVT 的检测范围;当高压臂电容 C_1 击穿时,由于电容 C_1 减小,分压比公式的分子分母同时减小,二次侧电压也会减小,仿真波形与理论分析的二次侧电压相符;当低压臂 C_2 击穿时,由于电容 C_2 减小,分压比公式的分母减小,二次侧电压会增大,仿真波形也与理论分析相同;当在 CVT 的二次侧设置短路故障时,二次侧的电压为 0。

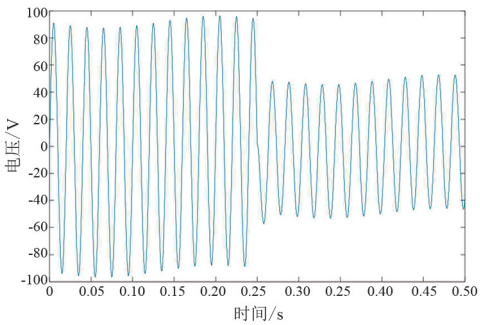
设置采样频率为 100 kHz,采集 3 种故障的二次侧电压值作为数据样本,每组数据样本包含二次侧电压故障前 0.01 s 至故障后 0.03 s 时域内的电压值;在不同时刻设置故障并采集数据样本,故障间隔时间为 10^{-5} s,针对每种故障采集 1000 组二次侧故障电压数据样本,3 种故障共计 3000 组数据样本。以编码的形式对 3 种 CVT 异常工作状态进行标注。随机在每种故障的 1000 组数据样本中选取 100 组构成测试集。训练集数据样本数共计 2700 组,测试集数据样本数共计 300 组,表 1 为实验数据集组成。

表 1 实验数据集描述

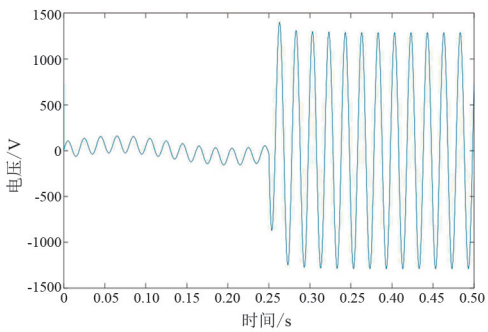
CVT 工作状态	训练集样本数	测试集样本数	标签
C_1 击穿故障	900	100	1
C_2 击穿故障	900	100	2
二次侧短路故障	900	100	3



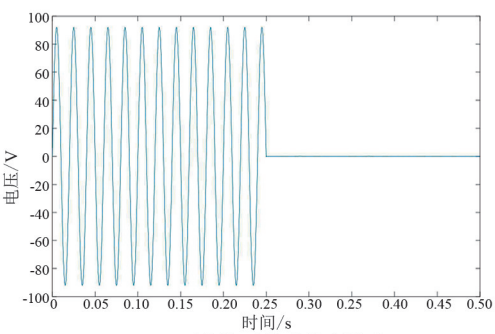
（a）无故障仿真波形



（b）C_1击穿故障仿真波形



（c）C_2击穿故障仿真波形



（d）二次侧短路故障仿真波形

图 2　模型仿真结果

2　马尔科夫变迁场算法

马尔可夫变迁场(Markov transition field,MTF)是基于 1 阶马尔可夫链的分析时间序列的一种方法,MTF 可以完成时间序列成像功能,其主要的作用是将原本的时间序列信号用矩阵的形式进行表示。

首先,将时间序列信号进行离散化,将信号离散的过程称为马尔可夫过程,也称马氏链,离散后的信号用 $X(m)$ 表示,离散后的时间序列长度为 N,如式(1)所示;按照离散信号的长度,根据时间序列的范围划分成 Q 个区域,如式(2)所示,将离散信号中的每个数据点的 q_Q 相关联。

$$X_m = \{X(m), m = 1,2,\cdots,N\} \tag{1}$$

式中:X_m 为连续的离散信号;$X(m)$ 为离散信号在 m 时刻对应函数值。

$$q_Q = \{q(k), k = 1,2,\cdots,Q\} \tag{2}$$

式中:q_Q 为总的信号区域划分值;$q(k)$ 为信号区域 k 的划分值。

将马尔可夫性质用条件概率表示为式(3),含义为 m 时刻离散信号的离散值处于状态 $a(k)$ 的条件下,离散信号在 $m+n$ 时刻的离散值转移到 $q(j)$ 的概率值。

$$P_{kj}(m, m+n) = \mathrm{P}[X(m+n) = q(j) \mid X(m) = q(k)] \tag{3}$$

式中,$q(k)$ 与 $q(j)$ 分别为 k、j 的信号区域的划分值。

由于马氏链在时刻 m 从任何一个空间状态 $q(k)$ 出发,到另一个时刻 $m+n$,是转移到 $q(1)$,$q(2)$,…,$q(j)$ 等诸多空间状态中的一个,于是将式(3)进一步表示为式(4)。

$$\sum_{k,j} P_{kj}(m, m+n) = 1 \tag{4}$$

根据式(4)构建马尔可夫转移矩阵 $\boldsymbol{W}$,如式(5)所示。式(5)中每一行元素之和等于 1,矩阵的行、列数均为 Q,矩阵中的数据 w_{kj} 表示 $q(k)$ 中的数据与 $q(j)$ 中的数据的转移概率,表示了在信号 $X(m+n)$ 属于 $q(j)$ 条件下,信号 $X(m)$ 属于 $q(k)$ 的概率值。

$$\boldsymbol{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & \cdots & w_{1j} & \cdots & w_{1Q} \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ w_{k1} & & w_{kj} & & w_{kQ} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ w_{Q1} & \cdots & w_{Qj} & \cdots & w_{QQ} \end{bmatrix} \tag{5}$$

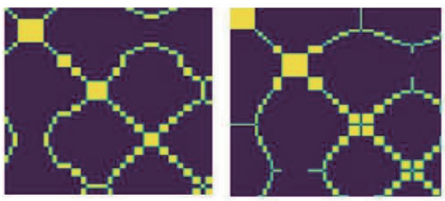
$$w_{kj} = \mathrm{P}[X(m) \in q(k) \mid X(m+n) \in q(j)]$$

式中:$\boldsymbol{W}$ 为马尔可夫转移矩阵;w_{kj} 为转移概率值。

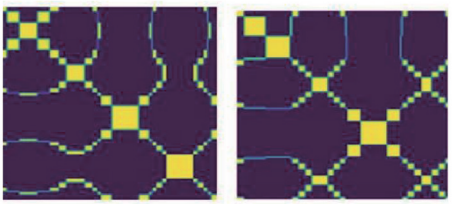
通过沿时间顺序的方式将计算的每个跟随概率进行排列[15],即可以构成马尔可夫变迁场矩阵 $\boldsymbol{M}$。

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix} w_{kj}\left|x_1\in q(k),x_1\in q(j)\right. & \cdots & w_{kj}\left|x_1\in q(k),x_n\in q(j)\right. \\ w_{kj}\left|x_2\in q(k),x_1\in q(j)\right. & \cdots & w_{kj}\left|x_2\in q(k),x_n\in q(j)\right. \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{kj}\left|x_n\in q(k),x_1\in q(j)\right. & \cdots & w_{kj}\left|x_n\in q(k),x_n\in q(j)\right. \end{bmatrix} \tag{6}$$

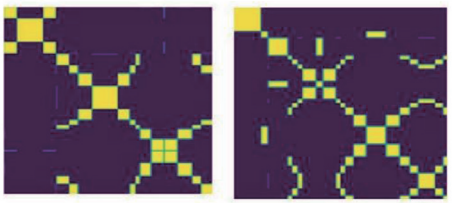
MTF 与格拉米角场类似,为提高数据的计算效率,减小矩阵 $\boldsymbol{M}$ 的大小,同时将矩阵 $\boldsymbol{M}$ 网格化,用平均值代替每个网格的子图。采集 CVT 不同故障的二次侧电压数据,该数据为时间序列信号,将其通过 MTF 进行特征变换后输出二维特征矩阵。利用 MTF 进行数据转换后,3 种故障的特征矩阵如图 3 所示。



(a) C_1击穿故障特征



(b) C_2击穿故障特征



(c) 二次测短路故障特征

图 3　3 种故障 MTF 特征

3　轻量 AlexNet 神经网络 CVT 故障诊断算法

3.1　AlexNet 神经网络

AlexNet 是 2017 年 ISLVRC 2012 竞赛中取得冠军的神经网络,被应用于多个学科领域[11-16]。AlexNet 网络由 5 个卷积层、3 个池化层、3 个全连接层[17]组成,在网络的全连接层使用了 Dropout 技术[18],利用随机丢失神经元的方法在减少模型参数量的同时防止在分类时出现过拟合。

AlexNet 网络所有的卷积层和全连接层都使用非线性的 Relu 激活函数。与 Sigmoid 激活函数相比,Relu 激活函数能使网络表达能力增强,该激活函数克服了梯度消失的问题,同时使网络计算速度加快。

AlexNet 网络中的池化层主要使用最大池化计算(Maxpool)进行特征浓缩,Maxpool 池化层的主要作用是进行特征融合与降维。池化核先将特征矩阵划分成不同区域,每个区域输出一个特征值[19]组成一个新的特征矩阵。

为了对故障进行分类,AlexNet 网络的最后 3 个卷积层使用全连接层对数据进行展平,将特征矩阵转换为特征向量方便进行网络的分类。AlexNet 神经网络的每层结构参数见表 2。

表 2　AlexNet 网络结构

网络计算层	卷积核尺寸	步长	通道
Conv1	11×11	4	96
Maxpool	3×3	2	96
Conv2	5×5	2	256
Maxpool	3×3	2	256
Conv3	3×3	1	384
Conv4	3×3	1	384
Conv5	3×3	1	384
Maxpool	3×3	2	256
Fc6			4096
Fc7			4096
Fc8			1000

3.2　AlexNet 网络改进方法

在保证检测精度的情况下,对 AlexNet 神经网络进行改进,将其引入 CVT 的隐形故障检测。改进 AlexNet 卷积神经网络的结构如图 4 所示。黑色立方体代表卷积层,每个卷积层先进行卷积计算,再使用激活函数;红色立方体代表最大池化层。首先输入图片为 3 通道的彩色图片,图片尺寸为 224×224×3,经过卷积核尺寸为 11×11 的卷积计算后,变成大小为 55×55×48 的特征矩阵,并执行 Relu 激活函数,在完成最大池化层计算后的特征矩阵大小为 27×27×48;接着使用卷积运算以调整特征通道,此时特征矩阵尺寸变为 27×27×128;将特征矩阵最大池化处理,其大小变为 13×13×128;紧接着进行的两次卷积运算

改变特征矩阵通道为 192,再进行一次不改变特征矩阵高宽的卷积运算,将通道变成 128;进行一次最大池化计算和两次卷积计算后,最后得到大小为 1×1×3 的特征矩阵。

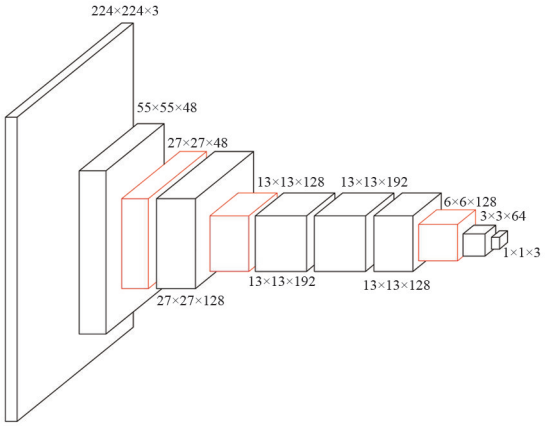


图 4　改进 AlexNet 神经网络结构

轻量化 AlexNet 将每一个卷积层和池化层的卷积核个数都进行了减半计算。AlexNet 网络的最后 3 层为全连接神经网络,第一、第二、第三个全连接层的输入分别是 4608、4096、4096。改进的算法将 3 个全连接层用 2 个卷积层进行替换,卷积特征尺寸分别为 3×3×64 和 1×1×3。所改进网络的最后一个卷积层特征尺寸为 1×1×3,其中“3”代表最后的分类类别。将卷积计算后的 1×1×3 特征矩阵进行展平,再经过 Softmax 归一化函数得到分类结果。与传统的 AlexNet 神经网络对比,轻量 AlexNet 神经网络的网络体积大小只有 1.02 M,能更加方便在嵌入式设备上进行部署。

改进后的网络包含 7 个卷积层和 3 个池化层,取消网络中的全连接层,将每一个卷积层和池化层的卷积核个数减半,网络结构参数见表 3。

表 3　轻量 AlexNet 网络结构

网络计算层	卷积核尺寸	步长	通道
Maxpool	3×3	2	48
Conv2	5×5	2	128
Maxpool	3×3	2	128
Conv3	3×3	1	192
Conv4	3×3	1	192
Conv5	3×3	1	192
Maxpool	3×3	2	128
Conv6	3×3	2	64
Conv7	3×3	1	3

3.3　故障诊断算法流程

在不拆除电压互感器的情况下,以二次侧电压的变化情况作为故障检测依据。利用 CVT 模型分别进行高压臂电容 C_1 击穿故障、低压臂电容 C_2 击穿故障、二次侧短路故障 3 种故障的仿真,采集这 3 种故障的二次侧电压数据,将其进行 MFT 变换转换成特征矩阵,再用这 3 种故障的特征矩阵数据对轻量化的 AlexNet 神经网络进行训练。通过训练好的轻量化 AlexNet 神经网络对 3 种故障的特征矩阵进行预测。算法流程如图 5 所示。

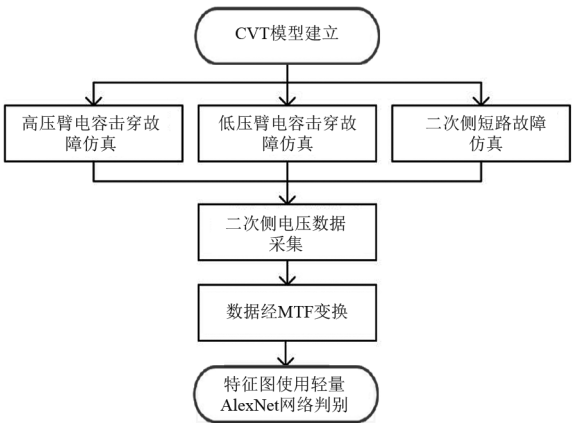


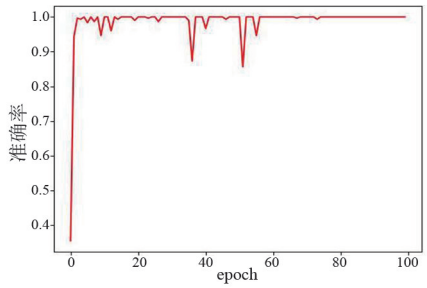
图 5　算法流程

4　仿真实验

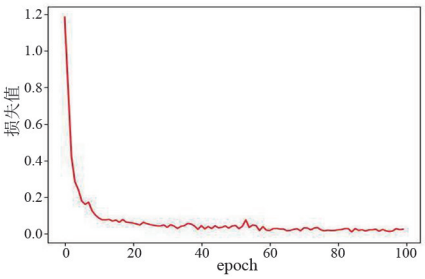
4.1　网络训练与测试

实验的操作系统为 Windows10 专业版,软件环境是 Pycharm,编程语言使用 python3.7,基于 1.10.1 版本的 pytorch 搭建深度学习框架。硬件配置 CPU(Intel Core i7-11800H)、GPU(NVIDIA RTX3060 8G)。训练与测试用的数据集包含 3 种故障共计 3000 组,使用马尔可夫变迁场对数据进行转换,将 3000 组数据转换为 3000 张特征矩阵图,3000 组特征矩阵图中的 90%划分为训练集(train),10%划分为测试集(test)。训练特征矩阵与测试特征矩阵随机裁剪尺寸到 224×224,训练 100 轮(epoch),训练数据集的 batch_size 设置为 32,测试数据集的 batch_size 设置为 4,学习率(learning rate)设置为 0.000 2。训练网络前先初始化权重参数,再使用训练集对权重参数进行调整,最后使用测试集进行准确率测试。训练过程中的损失值和准确率的参数曲线如图 6 所示。所提改进算法最终损失值下降至 0.024 8 左右趋于平稳,此时网络收敛,训练集准确率达到

100%。训练结果说明,轻量 AlexNet 网络具有空间不变性,在网络训练中能对特征图进行空间变换突出有辨别能力的特征信息区域,可获取到更准确的特征表达,从而大大提高轻量 AlexNet 网络的学习效率,能更好地对 3 种故障进行分类。



(a) 训练模型准确率



(b) 训练模型损失值

图 6 训练参数曲线

4.2 实验结果分析

为了验证轻量 AlexNet 网络模型对 CVT 的 3 种经典故障识别性能,使用分类的精确率 P 作为网络性能的评判指标,如式(7)所示。

$$P = \frac{P_T}{P_T + P_F} \tag{7}$$

式中:P_T表示模型预测为真,标签也为真;P_F表示模型预测为真,标签为假。

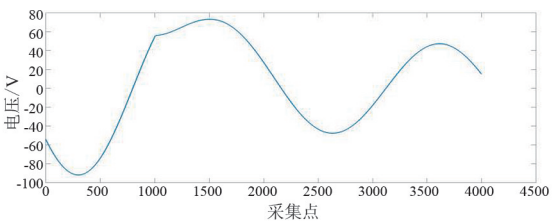
分别使用 BP(back propagation)神经网络、K 最邻近(K-nearest neighbor,KNN)算法、贝叶斯分类算法与轻量 AlexNet 神经网络算法对 3 种故障的特征矩阵数据集样本进行故障的分类预测试验,预测结果如表 4 所示。

从表 4 分析可知,针对训练样本数据集,BP 神经网络相较于贝叶斯分类对C_1击穿故障和二次侧短路故障的预测精确率有了提高,但是对于 3 种故障的预测精度还有欠缺。KNN 算法在 3 种故障的预测精确率能达到很高的精度,但是还是存在有错分的情况。所提轻量 AlexNet 对 3 种故障的预测精度均是 100%,不存在错分的情况。

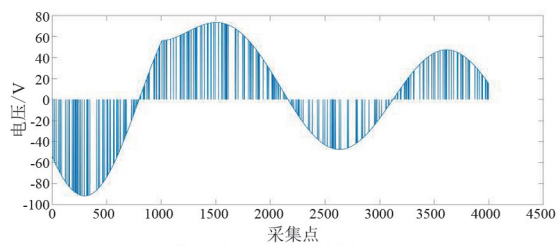
针对测试样本数据集,BP 神经网络、KNN 算法、贝叶斯分类算法对 3 种故障的预测精确率下降,其中:BP 神经网络不能对二次侧短路故障进行识别;贝叶斯算法不能对 C_2击穿故障进行预测。而轻量 AlexNet 并没有受数据集数目的影响,对 3 种故障的预测准确率依然保持 100%,不存在错分的情况。

综上,与传统的分类算法进行的对比实验表明,使用所提轻量 AlexNet 神经网络算法对 3 种故障预测,精确率都有显著的提升。相较于文献[8]使用的基于滑动时窗的 K-means 聚类算法,在故障类型的判别上,轻量 AlexNet 神经网络能对 CVT 发生二次短路的故障进行识别分类。

由于外界环境的不确定因素,在进行二次侧电压数据采集传输过程中,可能会发生数据丢失的情况。为测试所提算法在数据随机丢失情况下的性能,先对 3 种故障的一维二次侧电压数据进行随机丢失处理,以高压臂电容击穿故障后出现数据丢失情况为例进行仿真,如图 7 所示。



(a) 数据未丢失波形



(b) 数据丢失300个采样波形

图 7 数据未丢失以及丢失情况下波形

表 4 不同网络预测准确率 单位:%

算法类型	训练数据样本分类预测准确率			测试数据样本分类预测准确率		
	C_1击穿故障	C_2击穿故障	二次侧短路	C_1击穿故障	C_2击穿故障	二次侧短路
所提算法	100	100	100	100	100	100
BP 神经网络	100	62	79	41	91	0
KNN 算法	99	100	99	87	97	93
贝叶斯分类	65	95	60	28	0	56

对 3 种故障随机选取 5 组一维电压数据进行测试,分别将数据随机丢失 100 个、200 个、300 个、400 个,即每组数据丢失 2.5%、5%、7.5%、10%。对数据丢失后的故障电压使用 MTF 特征变换,再使用轻量 AlexNet 网络对故障进行分类,测试结果见表 5。可以看出即使存在 10%的数据丢失,所提算法对 3 种故障均能进行准确的预测。

表 5　所提方法随机丢失数据测试结果

数据丢失数量/个	分类准确率/%		
	C_1击穿故障	C_2击穿故障	二次侧短路
100	100	100	100
200	100	100	100
300	100	100	100
400	100	100	100

5　结　论

针对传统的 CVT 故障检测时需将 CVT 进行解体等问题,提出了一种轻量 AlexNet 的 CVT 故障诊断方法。该方法先采集各类故障的二次侧电压数据,再对采集的一维数据使用马尔可夫变换提取特征,并将其转换成二维特征矩阵,最后使用轻量 AlexNet 网络进行故障的分类。在保证检测精度的情况下,将 AlexNet 网络的卷积层与池化层通道减半,将最后一层的全连接网络替换为卷积网络。经实验证明轻量 AlexNet 网络与原 AlexNet 网络相比,更适合进行嵌入式设备的移植;与传统的机器学习分类算法相比较,具有更高的检测精度。所提方法对 CVT 潜伏性故障的预测有积极的指导意义。

参考文献

[1] 郑云海.110 kV 电容式电压互感器试验数据异常分析处理[J].电工技术,2018(5):116-117.

[2] 陈何成. 500 kV 电容式电压互感器故障原因分析[J]. 电工技术, 2020(17):100-102.

[3] 刘永鑫, 王鹏皓, 李艳鹏,等. 基于 CVT 电容元件击穿的事故分析计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(6):77-80.

[4] 尹青华, 李培, 郭良峰, 等. 一起 66 kV 电容式电压互感器二次失压故障诊断分析[J]. 国网技术学院学报, 2020, 23(2):4-6.

[5] 徐鹏, 殷鑑, 沈亚春, 等. 一起 220 kV CVT 二次电压异常事件调查[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(5):94-99.

[6] 周林波, 符玉珊, 文峰,等. 110 kV 电容式电压互感器间接自激法不拆引线试验研究[J]. 科技风, 2021(10):196-198.

[7] 赵铁羽. 220 kV 电容式电压互感器介损试验不拆线测量方法误差分析[J]. 变压器, 2019, 56(8):57-59.

[8] 强文渊, 韦家富, 刘友波,等. 基于滑动时窗 K-Means 聚类的 CVT 早期故障诊断[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3):89-95.

[9] 马朝华. 电容式电压互感器暂态特性研究[D].郑州:郑州大学,2007.

[10] 姜家国, 郭曼利.基于 MTF-DenseNet 的滚动轴承故障诊断[J].仪器仪表用户,2021,28(9):54-56.

[11] 唐贵基, 田寅初, 田甜.基于 AlexNet-Adaboost 的多工况滚动轴承故障识别方法[J].振动与冲击,2022, 41(2):20-25.

[12] 江华, 于同刚, 吴丽琼, 等.基于 AlexNet 的桥小脑角脑膜瘤和听神经瘤 MRI 图像的识别研究[J].中国医疗器械信息,2022,28(1):44-47.

[13] 徐兢成,王丽华.基于 AlexNet 网络的交通标志识别方法[J].无线电工程,2022,52(3):470-475.

[14] 何江, 张科星.基于机器视觉的 AlexNet 网络煤矸石检测系统[J].煤炭技术,2022,41(3):205-208.

[15] 林丽惠, 魏毅, 潘俊虹.基于卷积神经网络的武夷岩茶叶片分类方法[J].宁德师范学院学报(自然科学版),2021,33(4):363-369.

[16] 院老虎, 陈源强, 杜白雨, 等.基于 AlexNet 和迁移学习的滚动轴承故障诊断研究[J].机电工程,2021, 38(8):1016-1022.

[17] 丁维龙, 李涛, 丁潇, 等.基于改进 AlexNet 的手腕骨图像成熟等级识别[J].浙江工业大学学报,2021, 49(6):614-622.

[18] 谢东阳,李丽宏,苗长胜.基于改进 AlexNet 卷积神经网络的手写体数字识别[J].河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(4):102-106.

[19] 张振威,王红成.基于改进卷积神经网络及 SVM 的手写数字识别方法[J].东莞理工学院学报,2021, 28(5):57-61.

[20] 李辉.基于改进 AlexNet 模型的断层识别方法[J].油气地质与采收率,2022,29(1):107-112.

[21] 刘鹏,谢春华,安文韬,等.改进 AlexNet 的高分三号全极化海岛地物分类[J].遥感信息,2021,36(5):142-147.

作者简介:

漆梓渊(1997),男,硕士研究生,研究方向为电气设备状态监测;

吴　浩(1980),男,博士,教授,研究方向为智能信息处理、电力系统及智能控制。

(收稿日期:2023-06-17)

基于无线同步通信的变电站漏电流检测系统研究

刘 鑫[1],袁明哲[1],黄 寅[2],令狐静波[1],邹经鑫[1],刘豫航[1]
(1. 国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041;2. 西安交通大学
电力设备电气绝缘国家重点实验室,陕西 西安 710049)

摘 要:变电站站用电系统是保障变电站安全稳定运行的关键,电缆中的漏电流可能引发沟道着火等严重事故。固定式监测装置存在造价成本过高、推广难度大等诸多不足。针对站用电系统漏电流的准确检测问题,研发了一套新型的站用电系统漏电流检测系统。该系统由多个无线采集终端构成,具备多通道同步采集、自动数据通信、电流矢量和计算等功能,可实现变电站站用电系统漏电流的精确检测与缺陷的精准定位,从而及时消除事故隐患。为验证所研发系统的有效性与准确性,在变电站现场进行了实际检测,排查发现并处理了多处站用电系统漏电流隐患。结果表明,所研发系统能够快速、有效、准确地检测站用交流系统的运行情况,具有较高的经济性与实用性,有助于保障变电站的安全稳定运行。

关键词:变电站站用电系统; 漏电流检测; 无线采集终端; 矢量计算
中图分类号:TM 93 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-6954(2024)01-0098-07
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240115

Research on Substation Leakage Current Detection System Based on Wireless Synchronous Communication

LIU Xin[1], YUAN Mingzhe[1], HUANG Yin[2], LINGHU Jingbo[1], ZOU Jingxin[1], LIU Yuhang[1]
(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi′an Jiaotong University, Xi′an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Auxiliary power system of substation is the key to ensure the safe and stable operation of substation, but the leakage current in the cable may cause serious accidents such as channel fire. And the fixed monitoring device has many disadvantages, such as high cost and difficult popularization. Aiming at the problem of accurate detection of leakage current of auxiliary power system, a new leakage current detection system of auxiliary power system is developed. This system is composed of multiple wireless acquisition terminals and has the functions of multi-channel synchronous acquisition, automatic data communication, current vector sum calculation, which can realize the accurate detection of leakage current and the accurate positioning of defects in auxiliary power system, so as to eliminate the potential accidents in time. In order to verify the effectiveness and accuracy of the proposed system, the actual detection is carried out in the substation site, and many potential current leakage problems in auxiliary power system are found and processed. The results show that this system can quickly, effectively and accurately detect the operation of auxiliary power system and is helpful to ensure the safe and stable operation of substation, which has high economy and practicability.

Key words: auxiliary power system of substation; leakage current detection; wireless acquisition terminal; vector calculation

0 引 言

“十四五”电力行业工作要求将电力系统的安全稳定摆在了至关重要的位置,其中各级变电站作为电网的枢纽节点,它们的可靠运行是保障电力系统安全稳定的关键[1-2]。其中变电站的站用电系统能够为变电站一、二次装置及生产活动提供持续可靠的操作或动力电源,是保证变电站安全可靠运行

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(3500586260)

的重要设施[3-4]。据调查,站用电系统的故障主要是绝缘故障,重庆 500 kV 张家坝变电站、湖南 500 kV 梦山变电站均因电缆绝缘故障而引发过严重的火灾事故[5]。因此站用电线路的漏电状态监测是变电站日常运行维护中最重要的工作之一[6]。现阶段漏电流的检测与保护装置仍存在一定的不足,无法准确鉴别线路中的漏电流与不平衡电流,可能使得漏电保护装置误动。因此,设计新型的变电站站用电漏电流检测方案与装置是降低变电站站用电系统运检工作难度,提升电力系统安全稳定性的有效手段。

针对线路的漏电流检测技术与方案,已有不少文献进行了相关研究。文献[7-8]阐述了对低压配电网中漏电流的实际检测,并对检测过程中的误差产生原因进行了分析,提出了一些初步的解决措施。文献[9]针对交联聚乙烯电缆,分析了电缆线路存在漏电流时的特征,但并未考虑长段电缆的检测。而文献[10]考虑了非理想通信情况下的漏电流检测方法,提高了对长电缆漏电流状态判断的准确性。文献[11]通过物联网技术实现了配电网中多个终端的漏电流检测信息的互联互通,有效减少了故障的发生时间。文献[12]使用无线传感器建立了矿井内电网漏电故障定位系统,并有效降低了传统物联网技术造成的通信延迟。文献[11-12]较好地实现了漏电流检测信息的远端通信,而在实际线路的多点位漏电流检测中,应考虑测量点位之间的数据同步性,且在变电站的强磁场环境中,电磁对通信的干扰不容忽视[13]。

为解决变电站中多点位同步通信的漏电流检测的难题,下面设计了一套新型漏电流检测系统。该系统具备多点位电流信号同步采集、有效值与相位计算、同步通信等多项功能,能够有效、准确判断变电站站用电系统是否存在漏电流,若存在漏电流则能迅速定位故障发生处。使用该系统在某变电站进行了现场漏电流检测,结果表明,该系统能够有效判断变电站交流系统漏电流情况,及时排除交流系统漏电流缺陷,保障变电站的安全稳定运行。

1　检测方案

1.1 漏电流检测原理与现存问题

对于变电站站用电系统供电支路的漏电流检测一般是通过剩余电流互感器(residual current transformer,RCT)或常规电流传感器对线路的 A、B、C、N 4 根线路的电流矢量和进行采集,采集原理如图 1 所示[14]。

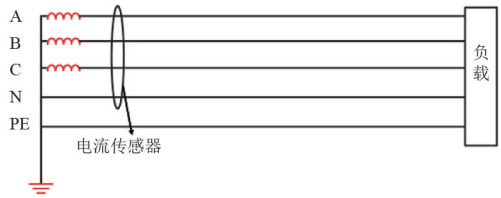


图 1　漏电流检测原理

当线路正常运行时,A、B、C、N 4 根线路上的电流矢量和应为 0,即

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C + \dot{I}_N = 0 \tag{1}$$

而在实际变电站的漏电流检测中,4 条线路的电流矢量和并不为 0,这可能是线路绝缘损坏存在漏电流使得四相电流不平衡,但更多的原因是因为 N 相线路存在电流分流的情况,使得四相线路电流不平衡[15]。例如:1)变电站的两台站用变压器低压侧中性点两点接地且同时接至 N 相线路,如图 2 所示,因此在单台站用变压器出线处将由于电流分流而出现不平衡电流;2)支路电源处 N 相错接至接地汇流排,未按标准接至 N 相接线处;3)支路负荷接线方式不规范,存在多点共 N 现象等不规范接线方式。

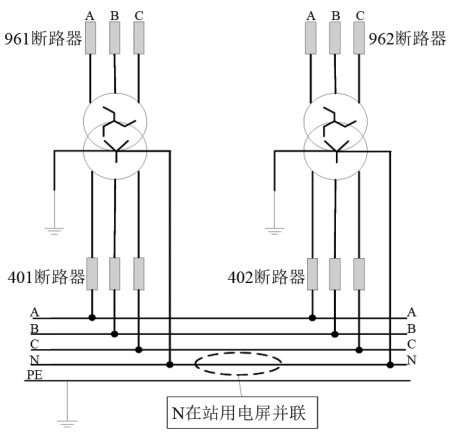


图 2　站用变压器出线端接线

综上所述,在单独测量某一线路时,均能测量到明显的不平衡电流,但无法判断是线路绝缘损坏导致的漏电流,还是因为接线不规范产生的不平衡电流。由于在变电站站用电系统大多数线路中无法加装漏电流保护装置,线路中的不平衡电流将导致保护装置误动切除站用供电线路,使得变电站无法稳定运行。若需在站用电系统的全部线路中装设漏电

保护装置,必须先改造现有站用电源系统,打开共 N 母排,分离共 N 回路,规范所有支路的接线方式,消除各线路共 N 连接点,排除胡乱接地点。此举成本较高,施工难度较大,现阶段在变电站内分开所有共 N 回路难以实现。因此,为能够在 N 相共接的情况下检测变电站站用电系统的漏电流情况,需要设计全新的检测方案与监测装置。

1.2 新型漏电流检测方法

为判断变电站站用电系统是否存在真正的漏电流,最直接的方法是在站用变压器出线端测量总的负荷电流,若所有出线端的负荷电流与回流 N 相端的电流在一定允许的误差范围内相等,则认为整个站用电系统并不存在漏电流;若两者存在较大的误差,则认为变电站站用电系统存在漏电流,有一定的绝缘故障,需进一步排查故障点位置。

220 kV 以上电压等级的变电站一般存在两台及以上数量的站用变压器,因此在检测变电站站用电系统总的漏电流时,应同时检测所有变压器出线端线路。如图 3 所示,检测漏电流时,两个检测点应同步检测。现阶段的漏电流检测装置虽具有通信功能,但不具备同步检测功能,这将造成两个测量点位的测量值存在差别,无法判断实际的漏电流情况。因此需要开发具备同步通信检测的漏电流检测装置。

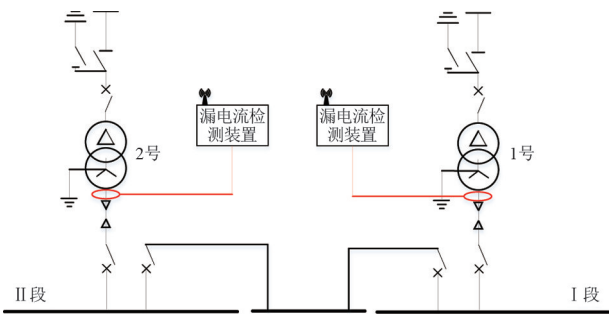


图 3 站用变压器出线端漏电流检测

当检测发现站用变压器出线端确实存在漏电流时,需要进一步排查故障发生点位。在变电站站用电系统的母线处对每条馈线支路的漏电流进行检测,如图 4 所示。若该线路的检测电流呈现平衡状态,则说明该线路电缆及与之相连接的负荷器件不存在漏电流;若检测出有漏电流,则需进一步排查该条馈线支路上的所有分支线路与用电设备。同时也应同时检测母线上的其余馈线,避免存在多故障点的情况。

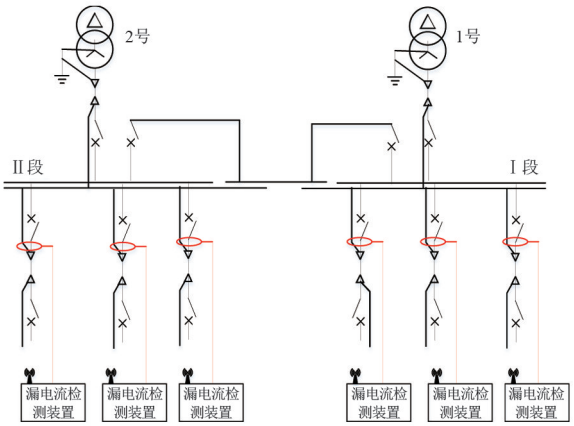


图 4 站用电源系统馈线漏电流检测

在每条馈线支路的站用配电屏处,一般会存在多条出线。由于站用配电屏两端共零,负载端也共零,形成了共零回路,所以两路馈线的 N 相电流已不再是各组三相的不平衡电流,可能会有相邻线路的 N 相不平衡电流流过,CT 采集得到的 A、B、C、N 相电流数据不再是剩余电流(可能是不平衡电流),所以需要将两路共零回路的 CT 进行矢量合成,得到的剩余电流数据是负载端的剩余电流。站用电系统配电屏漏电流检测如图 5 所示:当在配电屏端检测时,应同步检测 Ⅰ 段与 Ⅱ 段的出线端,以避免 N 相分流导致的测量误差;而在用电负荷端检测时,也应同时对两路进线的漏电流进行检测。

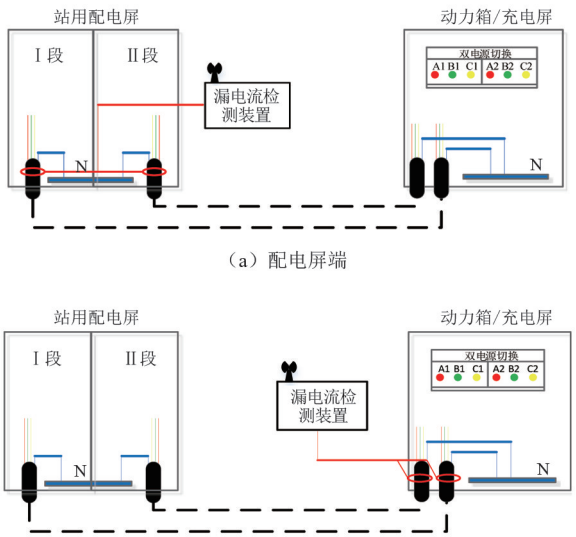


图 5 站用电系统配电屏漏电流检测

因此在进行变电站站用电漏电流检测时,由于上述的一些接线不规范等现场问题,使得传统的漏电流检测方案与装置不再适用,需开发具备同步检测、多点通信等功能的漏电流检测装置。

2　装置设计与实现

为实现变电站中多个位置的漏电流同步测量,设计了一套具有同步通信功能的漏电流测量装置。该装置由检测主机与从机以及电流传感器(罗氏线圈、钳形电流传感器)组成,可以实现主机与从机同步检测线路电流并计算,从而判断线路中的漏电流是否存在。

2.1　总体结构设计

漏电流检测主机的结构如图 6 所示,主要由锂电池(3.7 V)、MCU 控制核心(STM32H730)、充电管理模块、同步通信模块、蓝牙通信模块、A/D 模块(16 位)等部分组成。检测从机与主机的结构完全一致,区别仅在于同步通信模块的设置。

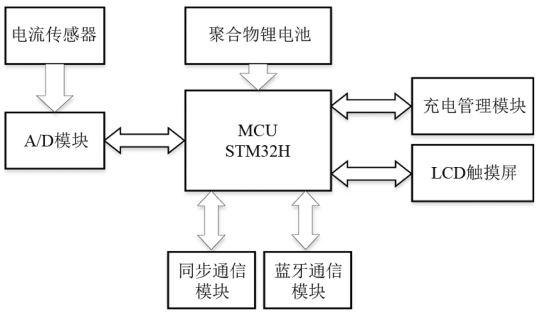


图 6　漏电流检测主机结构

2.2　同步通信原理

同步通信是该新型漏电流检测装置的核心功能,主机的同步通信模块在通电后自动扫描信道并选择一个可用信道,建立通信网络,从机模块通电后将自动发出加入网络的请求并自动分配到地址。此时检测装置间已经完成通信连接。在主、从机的通信芯片建立通信通道后,通信芯片与控制核心的工作流程如图 7 所示。首先主模块将向各从模块发送系统同步时间,从模块收到后将再向主模块返回同步时间。根据各模块的实际空间距离,主模块将对模块间产生的数据传输时延进行自动补偿,以保证各模块间的同步延时达到要求,若时间同步失败将重复上述步骤。

在各模块同步完成后,主、从模块间将进行脉冲信号同步发出指令确认。在确认各模块指令正常后,各模块将同步发出重复脉冲信号,各终端控制核心通过识别同步芯片发出的脉冲信号的上升沿或下降沿便可实现采集通道的同步采集。

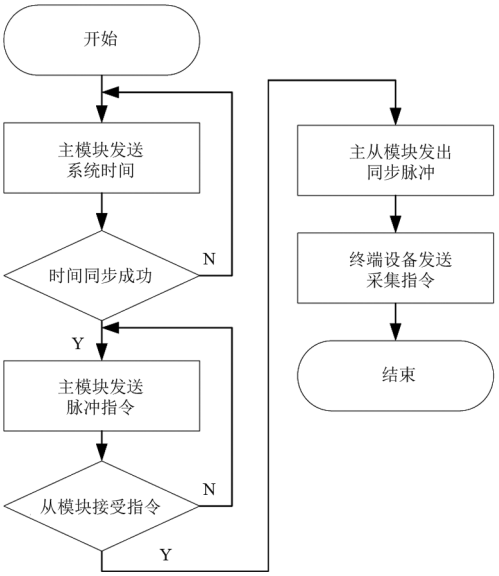


图 7　通信芯片同步流程

此外,采集装置在现场实际使用时可能存在远距离隔墙通信,因此各采集终端设计有天线接口,可以根据实际现场情况加装天线以保证通信质量。

2.3　采集信号处理与计算

检测线路电流时,应根据线路的直径选取适合的电流传感器,且主机与从机应采用相同型号的电流传感器,以保证测量精度。漏电流检测装置通过同等长度的同轴屏蔽线连接电流传感器,以保证信号传播的时延基本相同。信号进入检测装置后,将通过滤波电路滤除低压信号上叠加的高频干扰,用于后级电路处理分析[16]。A/D 数模转换的采样工作时钟由控制核心系统时钟分频得到[17]。

采集的电流信号每个周期中的有效值由傅里叶算法[18]计算,其本身也具有一定的滤波作用。由于被采样线路的电流矢量和仍为周期性信号,除 50 Hz 基波外还含有不衰减的直流分量与各次谐波,可用式(2)表示。

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n \sin(n\omega_1 t) + b_n \cos(n\omega_1 t)] \quad (2)$$

式中:a_n、b_n 分别为各次谐波正弦项与余弦项的幅值;n 为自然数;ω_1 为 100π。

其中,50 Hz 的基波分量,即理想的测量信号可表示为

$$x_1(t) = a_1 \sin(100\pi t) + b_1 \cos(100\pi t) \quad (3)$$

式中 a_1 与 b_1 可由梯形法计算出,即:

$$a_1 = \frac{1}{N}[2\sum_{k=1}^{N-1} x_k \sin(k\frac{2\pi}{N})] \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{1}{N}\left[x_0 + 2\sum_{k=1}^{N-1} x_k \cos\left(k\frac{2\pi}{N}\right) + x_N\right] \quad (5)$$

式中：N 为一个周期的采样点数，本装置 $N=32$；x_k 为第 k 次的采样值；x_0、x_N 分别为 k 为 0、N 时的采样值。

检测装置连续采集 3 个周期中的电流数据，将 3 个周期的电流有效值进行平均，得到此时被测线路中电流的有效值。

检测装置设计有检测当前电流频率的功能，通过计算得出，如图 8 所示。以通道 1 的采集数据为例，以曲线过零点后的 A_1 点数值为基准，当数值再次以上升趋势达到这一基准值的一定范围内时，即 A_2 点，则认为 A_1 点与 A_2 点间的时延 Δt_2 为通道电流信号的周期，其倒数为电流频率。

漏电流的计算不能仅仅考虑电流有效值的叠加，还要考虑不同电流信号的相位。由于所设计的漏电流检测装置没有设计电压信号同步，因此电流信号的相位可以任意一个通道的信号为基准，其相位始终为 0°。以图 8 中通道 2 采集信号的 B_1 点为例，通过判断 B_1 点与 A_1 点间的时延 Δt_3 与周期 Δt_2 便可计算出通道 2 信号与基准信号相差的相对相位角度。

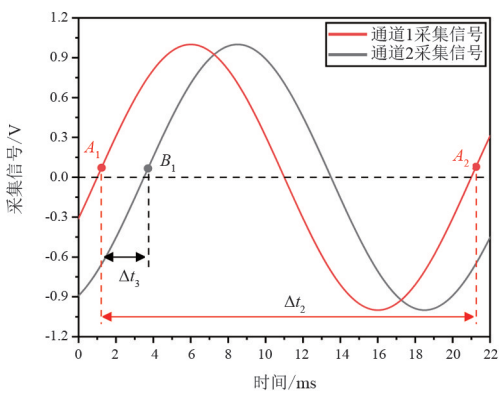


图 8　采集信号计算

当主机与从机均将自身通道的数据完成计算后，各自的蓝牙模块会将主机与从机的数据进行交互，并计算出总的电流矢量和数据，计算精度达 9‰。

2.4　其他功能

为便于后续的设备拓展，在主机装置中设置了联机通道选择功能，当有新加设备时，仅需将新设备的联机通道号码设置成与主机一致即可，便于漏电流测量装置的拓展。考虑到被测电流相角还与电流传感器的放置方向有关，在通道功能中设置了反相功能，以便于计算与数据查看。此外还有通道选择功能，可以选择哪几个通道进行漏电叠加计算。

3　现场测试结果

为验证所设计装置检测站用电系统漏电流的准确性与可靠性，对某变电站站用电系统的漏电流水平及接线状况进行实地测量，现场检测如图 9 所示。

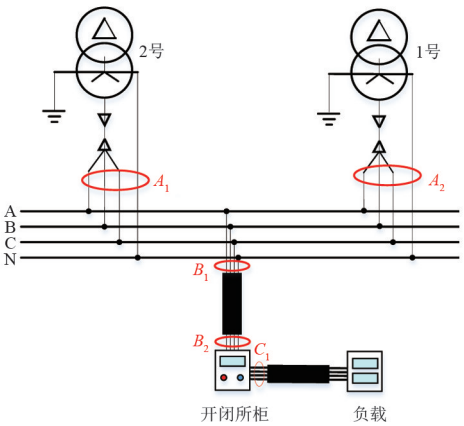


图 9　现场检测

首先在两台站用变压器的出线柜处（图 9 中 A_1 与 A_2 点）同时进行漏电流检测，出线柜现场照片如图 10 所示。其中站用变压器 1 处采用两个 CT 卡钳，A、B、C 三相由 CT1 测量，N 相由 CT2 测量。站用变压器 2 处采用一个 CT 卡钳。采用所设计的漏电流检测装置对线路电流进行采集，其中主机检测站用变压器 1 出线柜，从机检测站用变压器 2 出线柜，检测结果如图 11 所示。

其中站用变压器 1 出线柜中，CT1 采集到的 A、B、C 三相电流为 43.81∠0° A，CT1 采集到的 N 相电流为 51.26∠173.5° A。站用变压器2出线柜中，

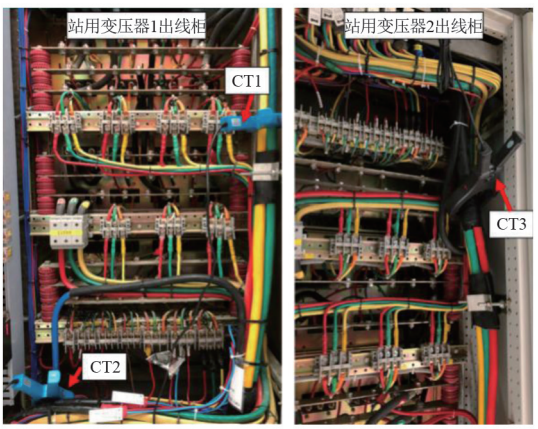


图 10　站用变压器出线端现场检测

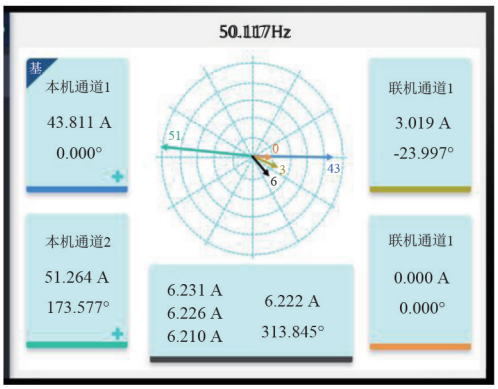


图 11　站用变出线端漏电流检测结果

CT3 采集到的 A、B、C、N 四相电流为 3.02∠−23.9° A。漏电流总和为 6.22∠313.8° A,这表明站用电系统中存在较大的漏电流,具有较大的风险隐患。

当确定站用电系统中存在漏电流后,依次排查站用变压器低压侧母线上的所有馈线支路,寻找故障的具体位置。在经过现场排查后,发现在某一开闭所柜支路存在明显的漏电流,在 B_1 点对该支路漏电流进行检测的结果为 3.613 A。

再进一步检测确定故障点位置。首先检测该条支路的电缆绝缘情况,在 B_1 与 B_2 处同步测量 A、B、C、N 四相电缆是否存在绝缘破损导致漏电流的情况。检测结果如表 1 所示。

表 1　支路电缆漏电流检测结果

相别	B_1 点电流/A	B_2 点电流/A	漏电流/A	漏电流比例/%
A	3.367	3.368	0.018	0.53
B	6.870	6.881	0.028	0.40
C	7.374	7.384	0.029	0.39
N	1.370	1.383	0.032	2.32

电缆绝缘检测结果表明,A、B、C 三相中的漏电流较小,而 N 相中的漏电流较大,推测 N 相可能存在电流分流的情况。进一步细致排查,发现开闭所柜内存在 N 相直接接地的不规范接线情况,如图 12 所示。同时发现另有两处站用屏内也同样存在 N 相直接接地的不规范接地现象,这都导致 N 相出现漏电流。

在排除完所有故障后,再次在站用变电站的出线端 A_1、A_2 点进行漏电流检测,整个站用电系统的漏电流仅为 0.397 A,满足站用电系统的漏电流标准。现场的检测结果表明,所设计装置能够快速、有效地检测站用电系统漏电流情况,同时也能节省大量装置成本与人力成本,有助于排除站内交流系统的各项隐患与风险。

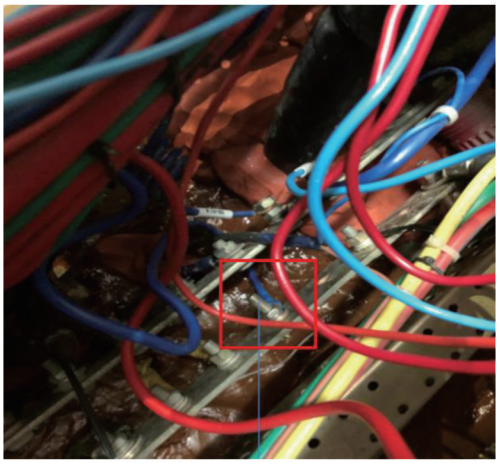


图 12　开闭所柜内 N 相直接接地

4　结　论

上面研究了一套基于无线同步通信的变电站漏电流检测系统,用以应对实际现场中 N 线共接、直接接地等绝缘异常工况下的漏电流检测。现场测试结果表明,该检测系统能够有效判别变电站站用电系统的运行情况,准确、有效地测量漏电流水平,并能快速定位线路中缺陷及故障点位置,有利于保障变电站的安全稳定运行。

参考文献

[1]　张琳.创新转型实现高质量发展——电力行业“十四五”发展展望[J].中国电力企业管理,2020(33):18-20.

[2]　陈昊,刘怀宇,姚凯,等.采用自补偿复合电流判据的变电站长段动力电缆漏电监测方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):172-179.

[3]　刘永梅,杜松怀,盛万兴.基于 SVM-神经网络融合反馈的触电电流检测方法[J].电网技术,2020,44(5):1972-1977.

[4]　宋小会,杨建翔,郭志忠,等.交流特高压变电站站用变保护技术方案[J].电力系统保护与控制,2014,42(24):110-115.

[5]　成先文,宫晓彤,吕志鹏,等.一种基于集成 SoC 芯片的中低压配电网故障监测系统[J].供用电,2020,37(1):8-14.

[6]　张烈,吕鹏飞,申华,等.2013 年国家电网公司 220 kV 及以上电压等级交流系统继电保护设备及其运行情况分析[J].电网技术,2015,39(4):1153-1159.

[7] 吴兵.新型漏电检测技术在低压配电系统中的应用[J].工程技术研究,2019,4(15):223-224.

[8] 陈航宇,李天友,杨智奇.低压配网剩余电流保护运行现状及相关措施分析[J].电气技术,2021,22(1):104-108

[9] 黄光磊,李喆,杨丰源,等.直流交联聚乙烯电缆泄漏电流试验特性研究[J].电工技术学报,2019,34(1):192-201.

[10] 陈昊,刘怀宇,姚凯,等.采用自补偿复合电流判据的变电站长段动力电缆漏电监测方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):172-179.

[11] 杨志淳,徐志超,沈煜,等.基于物联网的低压配电网漏电保护器监测与应用[J].高电压技术,2019,45(S1):137-141.

[12] 朱延凯,李振璧,姜媛媛,等.基于 ZigBee 无线传感器网络的井下电网漏电保护系统[J].工矿自动化,2014,40(5):15-17.

[13] 唐志国,蒋佟佟.变电站特高频局放监测的电磁干扰特征影响因素[J].电网技术,2018,42(4):1350-1358.

[14] 王进城,岳三玲,孙荣川.基于铁氧体电感的漏电流检测电路设计[J].电子测量技术,2019,42(13):60-64.

[15] 谢杨.变电站站用电交流系统的现状分析及改进建议[J].科技与创新,2014(16):60.

[16] 黄寅,孟永鹏,黄彦钦,等.一种双回路驱动的纳秒快前沿高重复频率脉冲源[J].西安交通大学学报,2021,55(10):114-122.

[17] 黄寅,王鹏,李金泉,等.基于 FPGA 的变频电机绝缘击穿监测系统设计与实现[J].国外电子测量技术,2019,38(10):70-74.

[18] 杨兴雄,曲延滨,宋蕙慧,等.基于同步挤压小波变换的双馈风电场送出变保护研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):22-32.

作者简介:

刘 鑫(1986),男,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作;

袁明哲(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及信号处理在电力系统中的应用相关工作。

(收稿日期:2023-07-07)

(上接第 90 页)

[3] 胡毅.输电线路运行故障的分析与防治[J].高电压技术,2007,33(3):1-8.

[4] 陈海波,王成,李俊峰,等.特高压输电线路在线监测技术的应用[J].电网技术,2009,33(10):55-58.

[5] 黄新波,孙钦东,王小敬,等.输电线路危险点远程图像监控系统[J].高电压技术,2007,33(8):192-197.

[6] 万康.无人机在山区高压输电线路隐患巡检中的应用[J].南方农机,2019,50(23):269-270.

[7] 陈剑刚,姚璞,杨俊武,等.无人机在架空输电线路巡检中的应用研究[J].湖南电力,2019,39(5):74-77.

[8] 罗星宇.无人机在输电线路中的应用[J].低碳世界,2019,9(9):115-116.

[9] 黄谨益.电力输电线路巡检中无人机的应用[J].电子技术与软件工程,2019(1):233.

[10] 王权.全站仪系统误差分析及检定方法探讨[J].甘肃科技,2022,38(6):19-22.

[11] 景钦刚.电子全站仪在青海电力行业中的应用[J].青海电力,2009,28(1):32-34.

[12] 文学.全站仪三角高程测量应用综述[J].测绘与空间地理信息,2014,37(1):47-50.

[13] 李倩竹,杜永永,杨阳.无人机智能巡检在输电线路中的应用与发展研究[J].四川电力技术,2020,43(3):53-56.

[14] 张吴明,杨又华,阎广建,等.机载多角度多光谱成像技术在电力系统中的应用[J].华中电力,2006,19(6):1-2.

[15] 蓝增荣,胡庆武,隆华平.基于机载 LiDAR 的数字电网巡线应用研究[J].大众科技,2013,15(1):57-59.

[16] 李倩竹,杜永永.基于无人机激光雷达技术的 杆塔倾斜度精确测量方法研究[J].青海电力,2020,39(4):56-60.

[17] 姚钺,任明武.基于 PointNet++改进的点云特征提取与分类网络架构[J].计算机与数字工程,2021,49(10):2052-2056.

[18] QI C R,SU H,KAICHUN Mo,et al. PointNet:Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation[C]//Proceedings of 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR),2017:652-660.

[19] QI C R,YI L,SU H,et al. PointNet++:Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space[C]//Advances in Neural Information Processing Systems,2017:5099-5108.

作者简介:

黄宇航(1997),男,硕士,从事输电线路无人机运维工作。

(收稿日期:2023-06-07)

基于双联合定位法的 500 kV 变压器内部放电诊断分析

郭加媛，李承振，赵廷志，张明兴
（国网山东省电力公司超高压公司，山东 济南　250118）

摘　要：单一使用常规的超高频法、超声波法以及高频电流法进行带电检测变压器局部放电存在局限性。同时，变电站电磁环境干扰大、变压器运行中持续振动干扰以及其金属封闭结构导致变压器内部局部放电检测与定位成功率低。提出了双联合定位法，即高频电流与特高频联合定位以及声电联合定位法，利用该方法准确判断一起 500 kV 变压器内部放电的故障，返厂解体检查情况与现场定位结果完全一致，验证了该方法的有效性。

关键词：双联合定位；变压器；内部放电
中图分类号：TM 407　**文献标志码**：A　**文章编号**：1003-6954(2024)01-0105-06
DOI：10.16527/j.issn.1003-6954.20240116

Diagnosis and Analysis of Internal Discharge in 500 kV Transformer Based on Joint Positioning Method

GUO Jiayuan, LI Chengzhen, ZHAO Tingzhi, ZHANG Mingxing
(State Grid Shandong Extra High Voltage Company, Jinan 250118, Shandong, China)

Abstract: There are limitations in using common ultra high frequency method, ultrasonic method and high frequency current method individually to detect internal discharge in transformer. At the same time, the large electromagnetic environment interference of substation, continuous vibration interference during the operation of transformer, and its metal closed structure cause the low success rate of detection and location of internal partial discharge. A joint positioning method is proposed, that is, acoustic and electrical joint positioning method with high frequency current and ultra high frequency joint positioning, which can accurately judge the failure of internal discharge in 500 kV transformers. The disassembly inspection of the transformer after returning to the factory is completely consistent with the results of on-site positioning, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: joint positioning; transformer; internal discharge

0　引　言

变压器作为电网主设备，其运行可靠性某种程度上代表着电网的运行可靠性。局部放电是变压器内部发生放电故障初期的重要特征。因此加强运行中变压器带电检测工作尤为重要[1-4]。

目前变压器广泛开展定期的带电检测工作，通常使用特高频法、超声波法、高频电流法等检测手段[5]。各检测方法都有明显的局限性，例如：特高频法虽然检测范围大，检测灵敏度高，但在现场抗低电磁干扰能力不足，容易受到环境中特高频电磁干扰的影响；超声波法易受机械振动干扰影响；高频法仅适用于具备接地引下线电力设备的局部放电检测[6-8]。变压器局部放电检测和定位仅靠单一的检测手段，无法做到准确检测和定位，多数情况下测到的都为外部干扰信号。

同时，变压器局部放电定位成功率低，故障定位困难，还有以下 3 个原因：1）变电站存在大量电磁环境干扰，包括输电架空引线电晕放电、金属性接触不良导致的干扰以及各类电子元器件运行过程中产生的白噪声。这导致特高频法局部放电定位存在困

基金项目：国网山东省电力公司科技项目（异常变压器远程综合诊断技术研究）

难,无法做到单独定位。2)变压器运行过程中振动干扰持续存在,超声波法检测无法有效区分振动和放电,导致放电故障漏判或者误判。3)变压器为金属封闭结构,没有预留专用的特高频检测口,因此内部放电产生的电磁波信号无法传出。这也是变压器局部放电定位难的一个重要方面。

为此,下面采用双联合定位法,即高频电流与特高频联合定位以及声电联合定位法,运用多种检测方法和手段进行联合检测定位,相互补充、验证,从而达到精准定位的目的。

1 双联合定位法

变压器内部发生放电时,会产生冲击的机械波、高频的脉冲电流以及超过 1 GHz 的电磁波[9-11]。以此为检测原理,分别对应常规的超声波法、高频脉冲电流法、特高频法等检测定位局部放电。变压器运行环境中存在大量干扰,仅靠单一检测手段,无法区分内、外部干扰,更无法进行局部放电定位。下面提出采用多类型传感器联合定位,先利用高频电流与特高频联合进行粗略定位,确定放电故障的大致区域,再在大致区域内进行声电联合精确定位,最终确定故障位置。图 1 为双联合定位法诊断策略示意图。

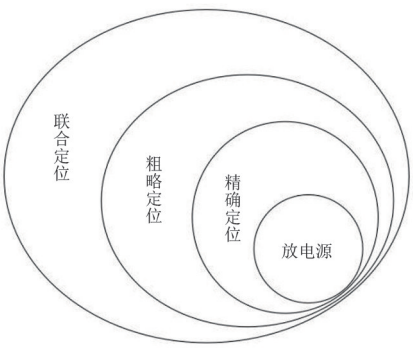


图 1 双联合定位法诊断策略

1.1 高频电流与特高频联合定位

高频电流与特高频联合定位包括干扰识别排除和粗略定位两部分,基本原理是以变压器铁芯、夹件引下线处检测到的高频电流信号为基础,作为联合定位的触发信号和基准信号,据此找到与高频电流信号相对应、同步出现的特高频信号,说明两者为同源信号。

干扰识别排除是在此基础上,利用特高频时差领先关系排除外部干扰。传感器布置如图 2 所示,即在变压器检测部位放置特高频传感器 1,沿变压器四周及上部放置特高频传感器 2。若特高频传感器 1 所检测信号始终领先特高频传感器 2,则说明该信号为变压器内部放电产生;反之,应为外部干扰信号。信号波形识别如图 3 所示。综合高频电流信号的基础性作用和特高频时差领先关系,可以很大程度上解决变电站严重电磁干扰的难题。

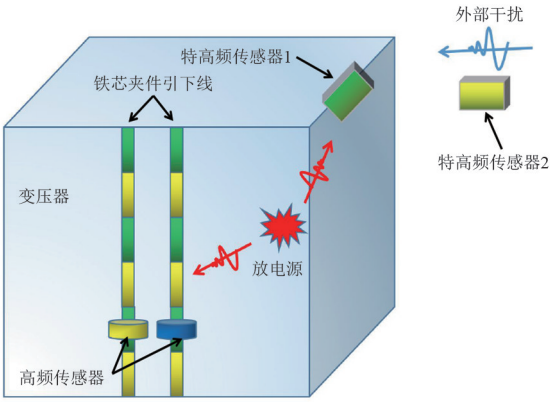


图 2 高频电流与特高频联合排除干扰

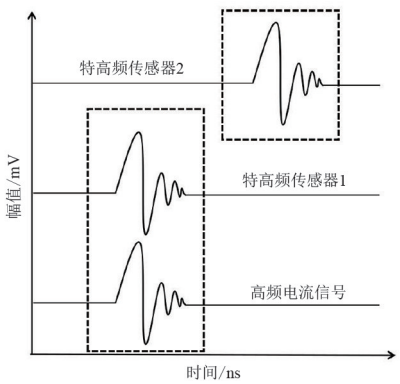


图 3 外部干扰信号波形识别图谱

粗略定位是在排除干扰的基础上,利用特高频法检测的灵活性和极强的穿透性,解决检测部位受限的难题。变压器内部常发生金属性接触不良导致的悬浮放电故障。该类型放电具有放电能量大、频率高、持续时间长等特点,通常能够在距离悬浮放电源不远的变压器箱体缝隙、法兰连接处、油阀门等部位检测到放电产生的特高频信号,据此可进行局部放电检测和定位[12-14]。根据特高频传感器检测到的放电信号时间领先关系以及各传感器实际位置参数,完成放电源粗略定位。特高频传感器布置如图 4 所示,当特高频传感器 1 和特高频传感器 2 所测信号在示波器上起始沿一致时,放电源在两者连线垂直平面上。水平和垂直两方向定位的焦点处即为粗略定位位置。

1.2　声电联合定位

声电联合定位,即利用电磁波与超声波速度差来实现精确定位。电磁波传播速度远大于超声波的传播速度,可将放电产生的电信号认为是超声波信号的起始时刻[15]。在变压器局部放电检测过程中,以变压器内部放电产生的高频电流或者特高频信号为基础,检测与电信号相对应和同步出现的超声波信号,可排除变压器持续振动导致的干扰并精确定位。

经过高频电流法与特高频法联合定位,确定了放电源的大致位置后,在粗略定位的区域内,进行声电联合定位。可将高频电流或特高频信号作为参考时间基准,即起始放电时刻,不断移动超声波传感器的位置,使得超声波信号距电信号时差最短,此时放电源离超声波传感器最近[16-18]。根据超声波信号距特高频信号时差 t 和超声波传播速度 v,可计算出放电源到传感器的距离 s,即 $s=vt$。声电联合定位和定位信号图谱如图 4、图 5 所示。

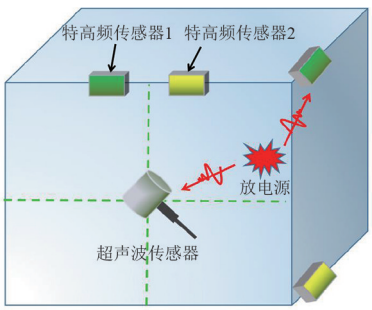


图 4　声电联合定位

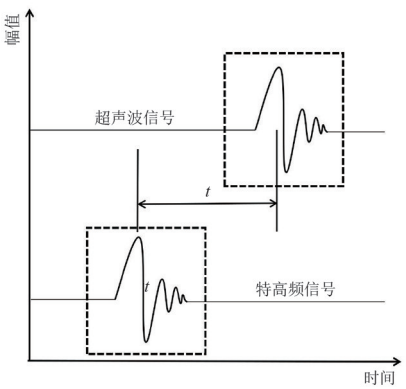


图 5　声电联合定位信号图谱

2　典型案例诊断分析

2.1　故障情况

2022 年 3 月,某 500 kV 变电站 3 号主变压器 A 相油色谱数据异常,其中乙炔含量由约 0.6 μL/L 陡增长至约 2.3 μL/L,已超过注意值 1.0 μL/L,其他两相未见明显变化,怀疑变压器内部发生放电故障。

为进一步查明故障情况,对该台变压器进行了局部放电带电检测和定位。经检测,发现 3 号主变压器 A 相铁芯、夹件处存在高频电流局部放电信号。在主变压器检修人孔、取油阀及箱体上顶盖缝隙处可检测到特高频信号。

2.2　高频电流局部放电检测

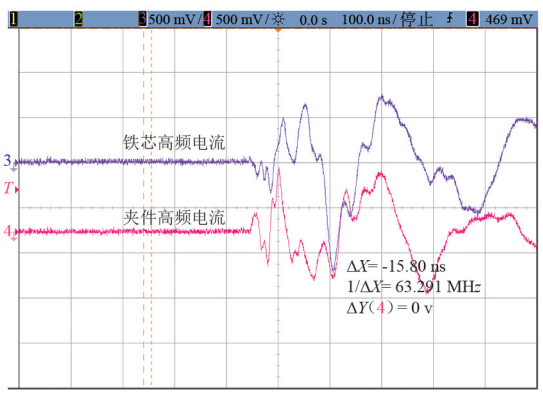
在 3 号主变压器 A 相铁芯、夹件处存在的高频电流局部放电信号峰峰值达到 4 V 左右,频率约 5 MHz,且铁芯夹件极性相反,确认变压器内部发生放电故障。

进行高频电流相位及聚类分析,可知放电出现在电压周期的第一象限、第三象限,正负半周均有放电,放电脉冲密集且对称分布,具有典型的内部放电特征,疑似存在悬浮放电。

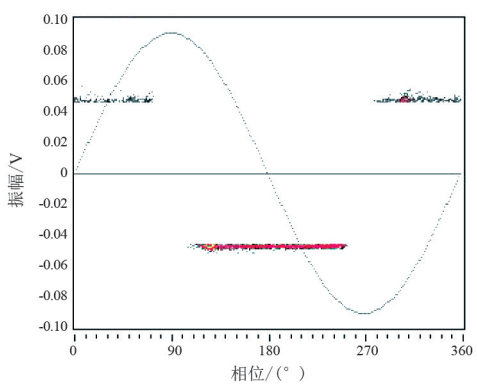
高频电流信号对应工频信号无跳变。高频电流极性关系如图 6(a)所示,相位及聚类分析如图 6(b)所示,高频电流与同步工频关系如图 6(c)所示。

2.3　高频电流与特高频联合定位

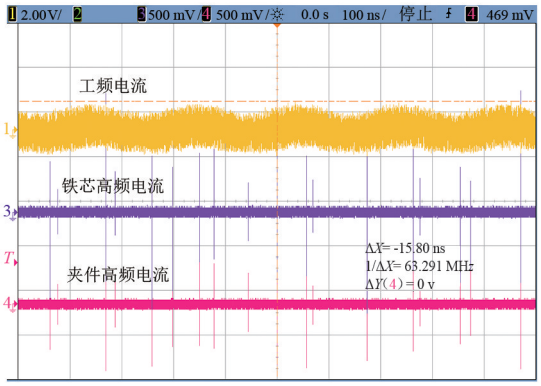
特高频传感器2、特高频传感器3布置在主变



(a)高频电流极性关系



(b)高频电流相位及聚类分析



(c)高频电流与同步工频关系

图 6　高频电流图谱

压器上部箱体顶盖缝隙处,特高频传感器 1 布置在主变压器下部排油阀处,如图 7 所示。经特高频法、高频电流法检测并分析信号对应关系,发现特高频信号与高频电流信号有较好的对应性,各部位传出特高频信号与铁芯及夹件的高频电流信号为同一信号源,时差稳定,判断该主变压器内有一处放电,对应关系如图 8 所示。

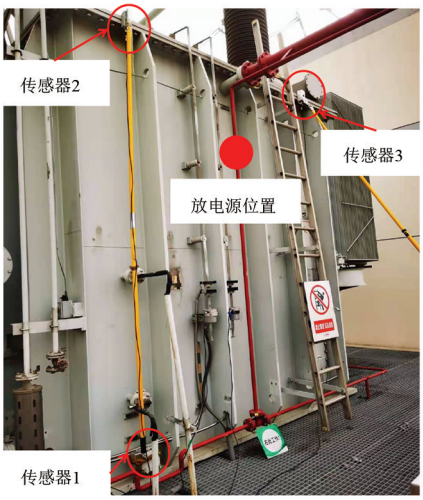


图 7　特高频传感器布置位置

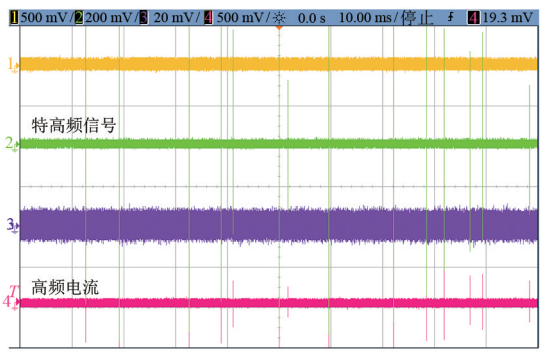


图 8　特高频、高频电流信号对应关系

将时基调整到 10 ns,对各部位特高频信号进行时差分析,检测发现:

1)移动特高频传感器 2 和传感器 3 到图 2 中位置,使得传感器 2 测到的特高频信号与传感器 3 测到的特高频信号基本同步且无时延,特高频波形如图 9 所示。说明放电源在传感器 2 和传感器 3 中间的垂直平面上,大约在主变压器铁芯、夹件引出线处。

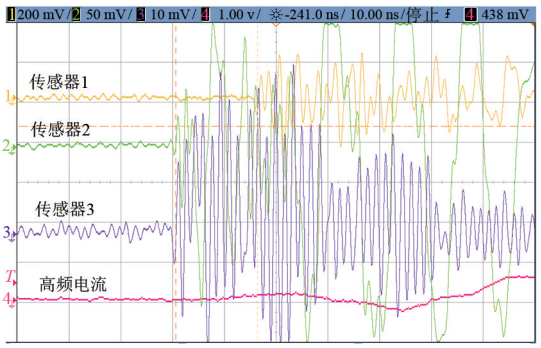


图 9　第一次特高频定位检测图谱

2)传感器 2 测到的特高频信号始终领先于传感器 1,领先时间约 10 ns,两传感器上下垂直布置,测量两传感器间实际距离约为 3.6 m。据此估算,局部放电信号源距主变压器上顶盖向下约 0.3 m,特高频波形如图 10 所示。

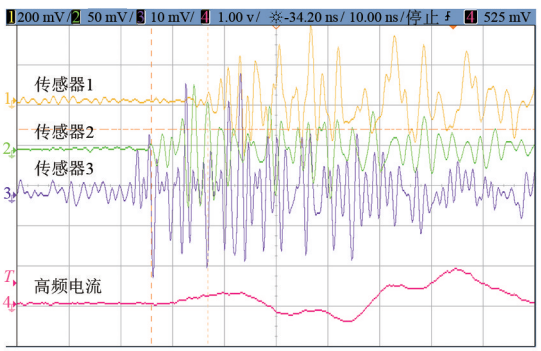


图 10　第二次特高频定位检测图谱

鉴于局部放电信号源传播路径较复杂,特高频信号可能存在绕射、反射现象,另外信号波头衰减较快,时差选取有一定误差[19-20]。综上分析,初步判断放电源在垂直方向上距离主变压器上部油箱盖约 0.2~0.5 m,在水平方向上大约在主变压器铁芯、夹件引出线处,如图 4 红色标记所示。

2.4　声电联合定位

采用声电联合方法在特高频定位信号区域对放电位置进行详细检测,可测到明显超声波信号,声电之间时差最小约 1 ms,波形见图 11,其中黄色通道为超声波信号,紫色通道为高频电流信号。

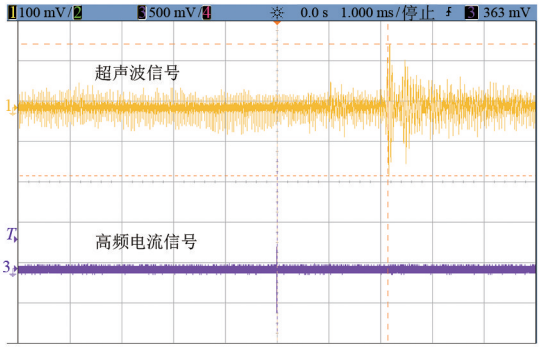


图 11　声电联合定位图谱

据此判断放电源在垂直方向上距离主变压器上部油箱盖约 0.35 m,在水平方向上大约在箱体短边中间部位向内约 1.0~1.5 m 附近。

经查阅主变压器内部结构,放电源可能位于上铁轭接地屏蔽处,如图 12 中红色圆圈标记处。

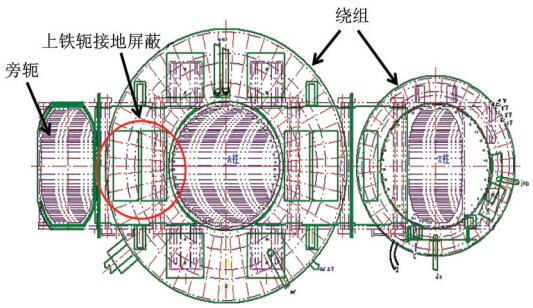


图 12　放电源可能位置

2.5　返厂解体情况

将故障变压器返厂解体检查,结合现场局部放电定位结果,重点检查主变压器身上夹件、上铁轭、上铁轭接地屏蔽等所有金属连接点。

在平行移出上铁轭接地屏蔽时,发现屏蔽铜带与等电位带的十字交叉焊接位置存在脱焊现象,如图 13 所示。解体检查发现放电故障位置与现场局部放电定位结果完全吻合。

3　故障原因分析及改进

3.1　故障原因分析

结合现场局部放电定位以及返厂解体检查情况,判定该主变压器内部上铁轭接地屏蔽存在脱焊现象。该主变压器的接地屏蔽生产时间距今已 15 年,当时整个行业接地屏蔽生产工艺相对比较落后,屏蔽带与等电位带通过一点或两点焊接。

分析认为,上铁轭接地屏蔽的铜带与等电位引出铜带脱焊的原因是该处焊接点焊接不牢靠或者焊接面积偏小,在变压器运行过程中,接地屏蔽受长期铁轭振动或者长期油温变化热胀冷缩效应的影响,导致该焊点脱焊。

图 13　屏蔽带脱焊放电痕迹

3.2　改进措施

按照现行最新工艺和材料,重新制作铁轭接地屏蔽。新接地屏蔽选用 0.1 mm 铜带作为屏蔽带,使用铜编织带作为等电位带进行整体搭接焊接,将点焊改为接触面整体焊接,确保焊接面和焊接强度足够大,同时选用的铜带更薄,可有效地弱化接地屏蔽在弯折或围圆过程中对焊接点可能引起的受力或损伤,改进后的接地屏蔽如图 14 所示。

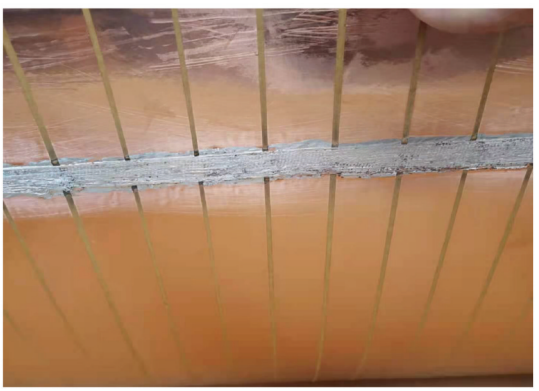


图 14　改进后的铁轭接地屏蔽

4　结　论

上面提出采用双联合定位法,即高频电流与特高频联合定位以及声电联合定位法,来克服各单一检测手段存在的局限性、变电站电磁干扰大、变压器振动干扰以及检测条件受限等难题。

通过双联合定位法,准确判断了一起 500 kV 变

压器内部放电故障,并对故障进行了精确定位,确认上铁轭接地屏蔽铜带与等电位引出铜带脱焊导致变压器内部放电。解体检查验证了局部放电定位的准确性,同时提出了改进措施,杜绝类似事故再次发生。

参考文献

[1] 秦松,李彬,张大伟,等.220 kV 变压器内部放电缺陷的检测与处理[J].山东电力技术,2018,45(11):27-31.

[2] 张凯,张成飞,董宏林,等.220 kV 变压器局部放电故障实例分析与处理[J].变压器,2019,56(10):48-51.

[3] 赵心玥,王清昊,程硕.220 kV 主变围屏放电的原因及整改措施[J].变压器,2015,52(5):64-67.

[4] 王江伟,李杰,师伟,等.500 kV 变电站主变压器跳闸故障分析[J].山东电力技术,2021,48(1):22-26.

[5] 伊锋,梁健,许伟,等.500 kV 变压器现场局部放电异常分析[J].山东电力技术,2020,47(8):10-13.

[6] 钟理鹏,汲胜昌,崔彦捷,等.变压器典型缺陷局放特性及其带电检测技术研究[J].高压电器,2015,51(3):15-21.

[7] 王新,苏欢欢,高树国,等.变压器内典型油纸绝缘缺陷的高频局部放电传播特性研究[J].高压电器,2018,54(11):206-212.

[8] 刘嘉林,董明,安珊,等.电力变压器局部放电带电检测及定位技术综述[J].绝缘材料,2015,48(8):1-7.

[9] 齐伟强,李俭,陈柏超,等.基于 COMSOL 的变压器中超声波传播特性[J].电工技术学报,2015,30(S2):195-200.

[10] 罗艳,周秀,唐长应,等.基于声电联合定位法在换流变局部放电检测中的应用[J].变压器,2020,57(1):73-78.

[11] 王超,许本茂,冯藩,等.基于声电联合及振动的变压器类设备局部放电现场综合诊断方法[J].四川电力技术,2020,43(4):33-37.

[12] 周加斌,陈玉峰,井雨刚,等.特高压变压器磁屏蔽接地线断裂引起局部放电异常的检测与分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(3):110-115.

[13] 李鹏,李飒,杨海超,等.一起 500 kV 变压器局部放电试验异常的分析处理[J].变压器,2020,57(6):85-87.

[14] 束畅,章茜,高燃,等.一起 1000 kV 特高压并联电抗器内部故障分析[J].东北电力技术,2018,39(6):19-22.

[15] 孟令明,刘宏亮,高树国,等.一起特高压大型充油设备油色谱异常情况分析与处理[J].变压器,2021,58(10):73-77.

[16] 孙帆,张勇,徐路强,等.一台 750 kV 高压电抗器局部放电故障分析[J].高压电器,2015,51(3):135-139.

[17] 秘立鹏,段子靖,赵影,等.1000 kV 高压并联电抗器故障原因分析[J].内蒙古电力技术,2018,36(2):79-81.

[18] 赵阳德,孙健,部俊锋.变压器拉带屏蔽罩引发的故障分析处理[J].山东电力技术,2021,48(1):32-34.

[19] 牛勃,马飞越,周秀,等. 基于 PSO 的局部放电源声电联合法定位的研究[J].高压电器,2019,55(8):108-115.

[20] 张彦,陆笑天,黄佳骏,等. 联合检测法在开关柜局放检测定位中的实际应用分析[J].高压电器,2019,55(2): 245-250.

作者简介:

郭加媛(1991),女,工程师,从事高压试验和电网状态检测工作。

(收稿日期:2023-05-25)

(上接第 77 页)

[7] 曾曦,易梦迪.基于 QFD/TRIZ 集成模型的老年人轮椅设计[J].机械设计,2021,38(4):134-138.

[8] 王晨,赵武,王杰,等.基于需求和解决冲突的创新设计策略[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(4):168-174.

[9] 张萍,白晓红,郭磊,等.钢筋混凝土旋扩变径桩现场原体试验及分析[J].建筑科学,2008,136(11):20-24.

[10] 马广,袁宇,张雷.砂土地层钉形变径桩变截面处端阻计算方法研究[J/OL].铁道标准设计:1-6[2023-02-21]. https://DOI.ORG/10.13238/J.ISSN.1004-2954.202203150003.

[11] 张志敏,杨卫.全自动可变径挖坑机机械结构设计[J].机械工程与自动化,2018(3):91-93.

[12] 常延沛.旋挖钻机:107420030B[P].2019-10-18.

[13] 秦广琦,甄芹芹,秦广菊,等.一种超硬岩气动旋挖冲击钻机:112983262B[P].2022-09-09.

[14] 龚秀刚,刘玉霞,叶凯,等.一种扩孔钻机:107060649B[P].2019-08-23.

[15] 王欢,孙涛,吴周鑫,等.TRIZ 理论在粮食收集机设计中的应用[J].机械设计与制造,2021(1):6-9.

作者简介:

谢 伟(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为输变电工程管理;

范荣全(1966),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为智能电网与电网新基建;

周睿晗(1999),男,硕士研究生,研究方向为智能制造技术。

(收稿日期:2023-05-13)

Sichuan Shunengdianke Energy Technology Co.,Ltd.

四川蜀能电科能源技术有限公司

四川蜀能电科能源技术有限公司成立于2021年11月19日，注册及建设地为新津区天府智能制造产业园区。注册资本3000万元，为四川科锐得实业集团有限公司与四川蜀电集团有限公司合资企业。

一、业务范围

技术服务、技术开发、技术咨询、技术交流、技术转让、技术推广；信息技术咨询服务；互联网安全服务；互联网数据服务以及检验检测服务等。

1

二、发展方向

依托四川省新型电力系统创新基地的建设，打造成为国网四川省电力公司省管产业单位成果转化与新技术推广重要平台、技术支撑平台和专业化物资检测机构。

2

三、发展目标

以专业化高素质检测企业为目标，逐步构建门类齐全、品种完备的调试、检测校验资质体系，不断深入推进科技成果转化，全方位提升公司的社会化竞争能力，力争在两至三年内成功申报高新技术企业。

3

四、重点项目

四川省新型电力系统创新基地建设项目旨在落实国家和四川省“十四五”发展规划，支撑四川省“碳达峰、碳中和”示范样板建设和成渝双城经济圈建设战略部署，实施国家电网公司“一体四翼”战略布局。是国网四川省电力公司考虑当前生产需求和产业发展需要，立足四川，服务西部，面向全国，重点打造的国际领先、国内一流的电网物资质量检测及特高压试验基地。该基地位于新津区天府智能制造产业园区，总用地约69221.67m²，2023年启动建设。

4

四川蜀能电科能源技术有限公司

Sichuan Shunengdianke Energy Technology Co.,Ltd.

致力打造为国网四川省电力公司省管产业单位成果转化平台、新技术推广平台、技术支撑平台、专业化检测机构。

建设四川省新型电力系统创新基地，将成为国际领先、国内一流的电网物资质量检测及特高压试验基地。

门类齐全的调试、检测体系；质量检测、电网分析、新技术集成等领域深厚的技术、人才、软硬件储备。

刊号：ISSN1003-6954 CN51-1315/TM　广告发布登记编号：川广登字【2021】0005号　公开发行　国内定价12.00元/期