

推动农村能源革命 助力实现乡村振兴

本刊编辑部

广大农村地区风能、太阳能、生物质能等可再生能源资源丰富，是落实碳达峰目标、大力发展新能源的重要增长极。推动农村能源革命，加大乡村清洁能源建设力度，有助于实现碳达峰、碳中和目标任务，促进农村产业提档升级、拉动产业链延伸，支撑宜居宜业和美乡村建设。为深入贯彻落实党中央、国务院决策部署，加大乡村清洁能源建设力度，助力全面推进乡村振兴，2023年3月国家能源局印发（国能发新能〔2023〕23号）《国家能源局生态环境部农业农村部国家乡村振兴局关于组织开展农村能源革命试点县建设的通知》，以点带面加快农村地区能源清洁低碳转型，助力实现乡村振兴。

推动农村能源供给革命，建立可再生能源多元供能体系。推进可再生能源发电就地就近开发和利用，按照集中开发和分散发展并举的原则，大力发展多能互补，在保护生态的基础上，加快风电、光伏发电建设开发，充分利用农村地区空间资源，积极推进风电分散式开发；加快推进可再生能源非电开发，因地制宜推动地热能、太阳能、生物质能清洁供暖，国家大气污染防治重点区域的试点县平原地区生物质能清洁供暖应采用热电联产、大型生物质锅炉等集中供暖模式，有序推进可再生能源安全可靠替代散煤，促进农村清洁取暖、清洁用能；探索建设乡村能源站，结合以县城为重要载体的城镇化建设，推动城镇清洁供热供电基础设施向农村延伸。

推动农村能源消费革命，实现县域清洁高效用能。加快推进电能替代，积极推进农业农村领域电气化，加强农业种植、养殖、农产品加工、农业大棚等农业生产加工领域电气化改造，加快提升农村地区炊事、取暖等生活用能电气化水平，深入推进交通领域电气化；巩固提升农村电网，聚焦农村电网薄弱地区和问题短板，深入实施农村电网巩固提升工程，提升农村电网供电保障能力和服务能力；探索扩大可再生能源终端直接应用规模，在有条件的区域结合当地资源及用能特点，以村镇为单元，综合利用新能源和各类能源新技术。

推动农村能源技术革命，提升农村智慧用能水平。推进分布式能源技术创新应用，加强适用于农村应用场景的风力发电、高效率光伏发电、新能源并网和运行控制、清洁高效生物质能供热供气等技术研发应用；探索建设新型农村能源网络，探索构建适应大规模分布式可再生能源并网和多元负荷需要的智能配电网，提升柔性开放接入能力、灵活控制能力、抗扰动能力和抗气候灾害能力，增强局部电力系统电源支撑能力、灵活调节能力和就地就近平衡能力，搭建清洁能源转换传输利用的枢纽平台，逐步实现县域内高比例清洁能源供电。

推动农村能源体制改革，提升清洁能源普遍服务水平。深化能源领域“放管服”改革优化营商环境，加大可再生能源领域简政放权改革力度，优化涉企审批服务，简化新能源项目核准（备案）手续，推动微电网内网源荷储打包核准（备案）；探索建立农村能源发展共享机制，统筹农村能源革命与农村集体经济发展，创新新能源投资建设模式和土地利用机制，鼓励地方结合实际情况依法利用存量集体土地通过作价入股、收益共享等机制，参与新能源项目融合共建。

通过开展农村能源革命试点县建设，以县域为基本单元统筹城乡清洁能源发展，推动乡村清洁能源高质量发展，将乡村清洁能源生产、消费与发展壮大村集体经济、建设宜居宜业和美乡村有机结合，为改善乡村生态环境、全面推进乡村振兴、加快推进农业农村现代化提供有力支撑。

农村电气化

NONGCUN DIANQIHUA

2023年第5期 总第432期 1979年创刊

2023年5月10日出版 月刊

刊名题字 李 鹏
主管 中国科学技术协会
主办 中国电机工程学会
中国标准连续出版物号 ISSN 1003-0867
CN 11-2181/TM
CODEN代码 NODIEE
编辑出版 北京国宇出版有限公司
地址 北京市大兴区地盛北街2号院17号楼
邮编 100176
网址 <http://www.chinarein.com>
微信公众号 re_magazine
总经理兼总编 陈士军
主编 盛万兴 耿立宏
副主编 袁 航 010-63231586
责任编辑 刘艳玲 010-63231649
张峰亮 010-63231647
投稿平台 <http://ncdh.cbpt.cnki.net>
邮箱 ncdqh@csre.org.cn
QQ交流群 35863746
印刷 北京盛通印刷股份有限公司
发行 北京国宇出版有限公司
邵文艳 010-63231592
张 节 010-63231638
秘 莹 010-63231636
刘翔羽 010-63231639
订阅邮箱 guoyu@csre.org.cn
内网邮箱 ndzwh@bj.sgcc.com.cn
订阅小程序 国宇出版
系统电话 926523085/86/90/91/92
广告 张朝勤 010-63231640
每期定价 16.00元
全年定价 192.00元

目次

电网建设

- 1 新型屋顶光伏支架基础简化计算设计方法 黄瑞璞
- 6 基于模糊综合评价法的电网工程社会效益评估 徐 丹, 高 超

运行维护

- 9 基于振动、场强信息的断路器三相不一致辨识方法
陈 昊, 徐伟伦, 徐晶冉, 徐 鹏, 汤宗尧, 陈予伦
- 14 输电架空线路防风加固技术策略分析 徐 晖

安全生产

- 17 一起220 kV变压器绕组变形缺陷的诊断及分析
刘胜军, 冯正军, 刘 钊, 郑献刚, 乔红军, 郭会永
- 21 变电站直流系统绝缘故障分析与防范
王耀升, 殷 军, 罗志远, 李锐锋, 郭 晓, 赵旭阳

智能电网

- 25 荷泽配网备用调度系统的建设 耿 晋, 林朋辉, 张炎萌, 邓 影
- 28 人工智能技术在电网调度中的应用研究
宋 倩, 蓝俊欢, 罗富贵, 李明珍
- 33 基于集成YOLOv5算法的输电线路杆塔目标检测
苏 晓, 张明晖, 陈峻宇, 丁 争, 许华栋, 白万崧

信息系统

- 40 人工智能视角下电力施工AR智能识别系统设计研究
朱亦振, 姜林波, 龚精业
- 44 基于在线用电监测仪的台区线损分段分析
蔡 潇, 李 明, 潘义云, 袁秋香, 陆永灿
- 48 配电网线损动态检测与处理方案研究 梁挺江
- 50 面向电力端对端控制类业务的无线通信单向时延测量方法研究与验证 刘志仁, 俞力珉

QC小组

- 54 新型变压器试验短路接地装置的研制 王 佼



中国科学技术协会优秀期刊
中国期刊方阵双效期刊
全国百家期刊阅览室指定赠刊

- 57 基于程序化的调度智能操作票系统开发
孔宪佐, 苏普春, 王晓红, 张伟, 王茂泽, 王一鸣

清洁能源

- 62 光伏发电可变端点最优轨迹法的最大功率点跟踪新策略研究
王映斐
- 68 分布式综合能源系统装机配置研究
董淑梅, 张爱平, 李伟, 马兰芳, 刘静

器具设备

- 72 基于智能巡检机器人的输电线路运维管理工作研究 黎文俊
- 75 输电线路 DB 型调整板几何结构分析与优化设计方法的研究
王昊, 芦凯旋, 李亚亮, 刘浩宇, 宰红斌, 菅瑞琴, 王晋强
- 79 变电站门型构架防鸟筒的研制 刘之然

经验点滴

- 83 基于微信小程序的输电线路防外破安全教育平台
林添进, 陈亮, 洪海涛, 程志杰, 邹振平, 陈肇隆
- 85 断路器状态量化评价研究
石佳, 丁俊, 苏俊霖, 奚路, 沈岩
- 87 电力用户低压采集成功率影响因素研究 向奕同
- 90 通过台区线损率变化及时发现和消除低压电网漏电隐患 汪岳荣

资讯

- 前插页 推动农村能源革命 助力实现乡村振兴 本刊编辑部
- 5 内蒙古超特高压公司: 开展 1000 kV 胜锡 II 线年度检修
- 39 江苏南京公司: 杆线入地为过江隧道施工“让路”

广告

- 封面 北京潞电电气设备有限公司电力装备实训基地
- 封2 施耐德电气
- 封3 珠海许继电气有限公司
- 封底 施耐德电气
- 拉页1 施耐德电气
- 拉页2 施耐德电气
- 拉页3 珠海许继电气有限公司
- 拉页4 珠海许继电气有限公司

编辑委员会

名誉主任委员

郑宝森

主任委员

路书军

副主任委员

孙吉昌	张莲瑛	林铭山	吴云喜
陈小良	周建方	张薛鸿	陈坚
盛万兴			

委员 (按姓氏笔画 排序)

丁孝华	马钊(英国)	王立地	王自军
元伟	戈立军	孔繁钢	艾闯
冯晋	宁昕	伊有福	刘东
刘伟	刘建华	汤克艰	杜松怀
李民	李斌	李江涛	李建锦
李瑞生	李震宇	邱明泉	何锐
汪发明	沈广	张恩源	陈俊章
陈振宇	范伟	欧阳亚平	岳红权
岳梦华	周开保	赵振宇	夏越
顾联军	黄震宇	黄燕	常俊祥
蔡丽华	蔡冠中	谭跃凯	缪学文
潘立志	潘继雄	薄博	

声明

本刊发表文章不收取任何费用, 一切收费行为均非本刊所为; 本刊已许可农村电气化网、中国知网、万方、维普、超星等及其系列数据库产品以数字化方式汇编、发行、网络传播本刊全文; 国宇出版公司向作者支付的稿酬已包含上述著作权使用费; 作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我公司上述声明; 未经同意, 本刊辑录之文章和插图, 不得转载或再编辑成书出版。

CONTENTS

◆Power Grid◆

- 1 Simplified Calculation and Design Method of New Roof Photovoltaic Support Foundation/HUANG Ruipu
- 6 Social Benefit Evaluation of Power Grid Project Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method/XU Dan, GAO Chao

◆Operation & Maintenance◆

- 9 The Identification Method of Three Phase Inconsistent of Circuit Breaker Based on Vibration and Electric Field Intensity Information/CHEN Hao, XU Weilun, XU Jingran, XU Peng, TANG Zongyao, CHEN Yulun
- 14 Analysis of Wind Protection and Reinforcement Technology Strategy for Overhead Transmission Lines/XU Hui

◆Safety◆

- 17 Diagnosis and Analysis of a 220 kV Transformer Winding Deformation Defect/LIU Shengjun, FENG Zhengjun, LIU Zhao, ZHENG Xiangang, QIAO Hongjun, GUO Huiyong
- 21 Analysis and Prevention of Insulation Faults in Substation DC System/WANG Yaosheng, YIN Jun, LUO Zhiyuan, LI Ruiheng, GUO Xiao, ZHAO Xuyang

◆Smart Grid◆

- 25 Construction of Heze Distribution Network Reserve Dispatching System/GENG Jin, LIN Penghui, ZHANG Yanmeng, DENG Ying
- 28 Research on the Application of Artificial Intelligence Technology in Power Grid Dispatching/SONG Qian, LAN Junhuan, LUO Fugui, LI Mingzhen
- 33 Target Detection of Transmission Line Towers Based on Integrated YOLOv5 Algorithm/SU Xiao, ZHANG Minghui, CHEN Junyu, DING Zheng, XU Huadong, BAI Wansong

◆Information System◆

- 40 Design and Research of AR Intelligent Identification System for Electric Power Construction from the Perspective of Artificial Intelligence/ZHU Yizhen, JIANG Linbo, GONG Jingye
- 44 Analysis of Line Loss Segmentation in Substation Area Based on Online Electricity Monitoring Instrument/CAI Xiao, LI Ming, PAN Yiyun, YUAN Qiuxiang, LU Yongcan
- 48 Research on Dynamic Detection and Processing of Line Loss in Distribution Networks/LIANG Tingjiang
- 50 Research and Verification of One-way Delay Measurement Method for Wireless Communication for Power End-to-end Control Services/LIU Zhiren, YU Limin

◆QC Group◆

- 54 Development of A New Short-circuit Grounding Device for Transformer Test/WANG Jiao
- 57 Develop a Scheduling Intelligent Operation Ticket System Based on Programming/KONG Xianzuo, SU Puchun, WANG Xiaohong, ZHANG Wei, WANG Maoze, WANG Yiming

◆Clean Energy◆

- 62 Research on the Application of Variable Endpoint Optimal Trajectory Method to Track Maximum Power Point of Three-phase Photovoltaic Grid Connected System/WANG Yingfei
- 68 Research on Installation Configuration of Distributed Integrated Energy System/DONG Shumei, ZHANG Aiping, LI Wei, MA Lanfang, LIU Jing

◆Equipment◆

- 72 Research on the Operation and Maintenance Management of Transmission Lines Based on Intelligent Inspection Robots/LI Wenjun
- 75 Research on Geometric Structure Analysis and Optimal Design Method of DB Type Adjusting Plate of Transmission Line/WANG Hao, LU Kaixuan, LI Yaliang, LIU Haoyu, ZAI Hongbin, JIAN Ruiqin, WANG Jinqiang
- 79 Development of Bird Proof Tube for the Gate-type Frame of Substation Structure/LIU Zhiran

◆Experiences◆

- 83 Transmission Line Anti External Burst Safety Education Platform Based on WeChat Mini Program/LIN Tianjin, CHEN Liang, HONG Haitao, CHENG Zhijie, ZOU Zhenping, CHEN Zhaolong
- 85 Study of the Quantitative Evaluation for Circuit Breaker's State/SHI Jia, DING Jun, SU Junlin, XI Lu, SHEN Yan
- 87 Study on the Influencing Factors of Low-voltage Acquisition Success Rate for Power Consumers/Xiang Yitong
- 90 Timely Find and Eliminate the Potential Leakage of Low-voltage Power Grid Through the Change of Line Loss Rate in Substation Area/WANG Yuerong

新型屋顶光伏支架基础简化计算设计方法

黄瑞璞

(上海电力设计院有限公司, 上海 黄埔 200025)

摘要: 为了解决在一些薄板和对裂缝要求比较高的建筑物屋面板做屋顶分布式光伏, 文章提出对光伏支架立柱下增加转换梁, 把基础支墩放置在主次梁上的布置形式, 并对该新型布置形式提出了二维简化计算方法。运用3D3S三维计算软件, 对有转换梁和无转换梁的光伏支架分别进行三维有限元计算。对比二维简化计算方法和三维有限元计算, 可知二维简化模型计算结果与三维模型计算结果相接近, 满足工程需要, 同时, 简化计算方法具有计算简便、实用的特点。对比有转换梁和无转换梁的光伏支架三维有限元计算可知, 转换梁的使用方便了屋顶光伏的布置, 并没用明显增加基础用量。

关键词: 光伏支架; 转换梁; 结构力学; 有限元计算

中图分类号: TM727

Simplified Calculation and Design Method of New Roof Photovoltaic Support Foundation

HUANG Ruipu

(Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai Huangpu 200025, China)

Abstract: In order to solve the problem of roof distributed photovoltaic in some thin plates and buildings with high requirements for cracks, this paper proposes to add a transfer beam under the photovoltaic support column and place the foundation pier on the primary and secondary beams. A two-dimensional simplified calculation method is proposed for the new layout. 3D finite element calculation was carried out for photovoltaic supports with and without a conversion beam by using 3D3S 3D software. By comparing the two-dimensional simplified calculation method with the three-dimensional finite element method, it can be seen that the calculation results of the two-dimensional simplified model are close to those of the three-dimensional model, which meets the engineering needs. At the same time, the simplified calculation method has the characteristics of simple calculation and practical. By comparing the three-dimensional finite element calculation of photovoltaic support with and without conversion beam, it can be seen that the use of conversion beam facilitates the arrangement of photovoltaic roof, but does not significantly increase the basic consumption.

Keywords: photovoltaic support; conversion beam; structural mechanics; finite element calculation

“2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和”已成为我国的国家战略。2021年10月, 中国政府印发了《2030年前碳达峰行动方案》提出了构建新型电力系统及全面推进风电、太阳能发电大规模开发和高质量发展的总体要求、规划目标和保障措施, 为非水可再生能源的大规模应用及可持续发展提供了良好的政策环境。另外, 根据《中国光伏产业发展路线图》(2021年版)中给出的预测, “十四五”期间, 我国光伏年均新增装机量将超过75 GW。可以看出, 过去10多年, 特别是“十三五”期间, 我国光伏装机量快速增长。

大规模开发、建设和利用可再生能源已经成为未来各国能源战略重要发展途径。太阳能是最常见、

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-03-31

最重要的可再生能源之一, 由于它具有不污染环境、建设成本低、运行维护简单、费用少、无噪声、可持续利用等优点, 是未来能源开发利用的重点方向。在多种类型太阳能发电站中, 以屋顶分布式光伏为载体的分布式光伏系统已成为每年光伏装机容量增长的一个重要方向, 也是我国“十四五”发展规划中明确鼓励发展的可再生能源发电方式^[1]。

文献[2]提出光伏支架成本占整个光伏电站投资比例相对较高, 光伏支架结构设计和优化是光伏电站设计的重要组成部分, 也是设计优化重点方向。行业内以现行其他国家规程规范为指导建立了光伏支架结构计算的理论方法, 颁布了相应的行业规范。文献[3]提出屋顶分布式光伏发电是解决能源紧张、环境恶化问题和提升人们生活水平的一个

重要途径。同时，论文中以某个县推进屋顶分布式光伏项目为例介绍分布式光伏在不同屋面的支架安装设计和屋顶太阳能电池组件结构及支架设计。

一般建筑屋顶楼板设计均有余度，故光伏支架用预制混凝土支墩固定在屋顶板上。但一些建筑比较旧，屋顶楼板设计余度不足，楼板的裂缝不满足规范要求，光伏支架支墩不能直接放置在楼板上。本文提出一种用转换梁将光伏支架支墩放置在楼顶主次梁上，光伏支架布置在转换梁上的安装光伏支架方式。支墩布置在主次梁上，位置相对比较固定；光伏支架布置在转换梁上，位置相对比较自由。

1 计算原理与计算步骤

为了说明新的布置方式及计算方法，如图1、图2取一组光伏组件作为一个计算单元，其中图1是光伏组件的布置图，图2为光伏组件的剖面图。

1.1 计算原理

本计算方法采用分层分步计算方法，即先算上部光伏组件所受荷载，再算出通过支架立柱传递到转换梁上的内力，把转换梁当做连续梁计算。由于支墩不能有位移和倾覆，故把支墩简化为连续梁固定支座，在所受多组力和弯矩情况下，验算转换梁

和求出支座反力，进而求出所需支墩大小。

1.2 计算步骤

1.2.1 荷载取值

因我国处于北半球，为了使光伏组件能接受更多的光照辐射，光伏组件通常被设计为成一定倾角，光伏组件和支架系统等构件具有承受风荷载和雪荷载的作用。光伏组件及其支架系统具有受风面积大、自重轻等特点，使风荷载、雪荷载成为了光伏系统承受的主要荷载。无论是正风时对光伏支架结构强度和变形等结构计算的要求，还是负风时对光伏支架基础稳定性的要求，都是光伏支架结构设计时控制工况，因此，合理的风荷载取值是光伏支架设计的重要内容。根据NB/T 10115—2018《光伏支架结构设计规程》^[4]相关规定光伏支架基本风压的确定应符合现行国家标准GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[5]的有关规定，且不应小于0.30 kPa。重现期应按下列原则确定：地面光伏支架设计时，应按25年重现期确定基本风压；地基基础设计时，应按50年重现期确定基本风压；建筑光伏一体化设计时，基本风压重现期应与主体结构一致。

综上所述，根据工程设计经验本研究屋顶分布式光伏支架结构设计采用重现期为25年一遇的基本

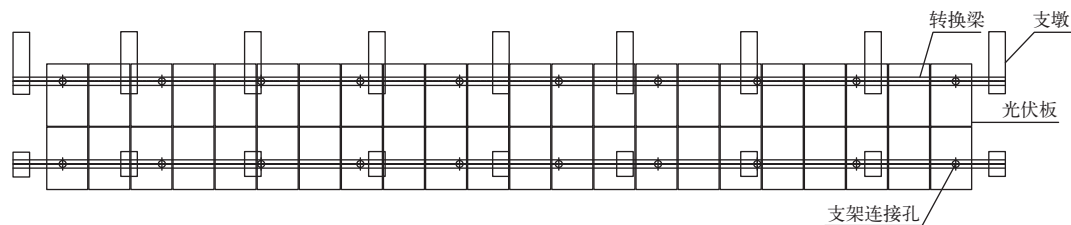


图1 光伏组件及支架布置图

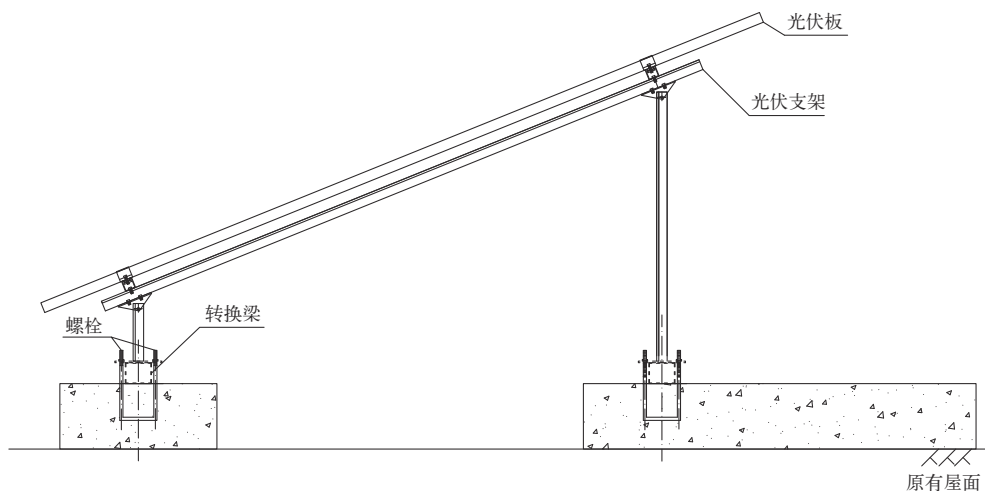


图2 光伏组件及支架立图示意图

风压和基本雪压进行光伏支架结构设计。

1.2.2 荷载组合

光伏支架结构设计时，应按承载能力极限状态计算结构和结构构件的强度、稳定性以及连接强度；按正常使用极限状态计算结构和结构构件的变形。结构或结构构件按承载能力极限状态设计时，应采用荷载的基本组合或偶然组合计算荷载组合的效应设计值，并按公式 (1) 进行设计。

$$\gamma_0 S_{ds} \leq R_d \quad (1)$$

式中： γ_0 为结构重要性系数，可取 1.0； S_{ds} 为作用组合的效应设计值； R_d 为结构或结构构件的抗力设计值。

结构或结构构件按正常使用极限状态设计时，应符合下式要求：

$$S_{db} \leq C \quad (2)$$

式中： S_{db} 为作用组合的效应标准值，如变形、裂缝等； C 为设计对变形、裂缝等规定的相应限值，应符合现行国家标准结构设计的有关规定。

非抗震设计时，荷载效应的基本组合应按下式计算，取其不利值：

$$S_d = \gamma_G S_{GK} + \gamma_w \psi_w S_{WK} + \gamma_s \psi_s S_{SK} \quad (3)$$

式中： S_d 为荷载组合的效应设计值； γ_G 为永久荷载的分项系数，应按现行国家标准 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》的有关规定采用； S_{GK} 为永久荷载标准值的效应，光伏组件荷载技术参数可按照相关规定选择； S_{WK} 为风荷载标准值的效应； S_{SK} 为雪荷载标准值的效应； γ_w 、 γ_s 为风荷载、雪荷载的分项系数，可取 1.4； ψ_w 、 ψ_s 为风荷载、雪荷载的组合值系数，风荷载为主导可变荷载时，风荷载组合值系数可取 1.0，雪荷载组合值系数可取 0.7；雪荷载为主导可变荷载时，雪荷载组合值系数可取 1.0，风荷载组合值系数可取 0.6。

1.2.3 光伏支架立柱内力计算

如图 3 所示为简化计算模型，取单个立柱所受风载面积为 S ，光伏板的倾角为 α ，所受荷载为风荷载 q_1 、雪荷载 q_2 和施工检修荷载 F 。

利用结构力学求解器求出最不利荷载组合下立柱反力为 N 。

求出的立柱内力 N 作用在转换梁上，把转换梁简化为连续梁，简化模型如图 4 所示。

根据结构力学相关知识可以求出支座的反力。

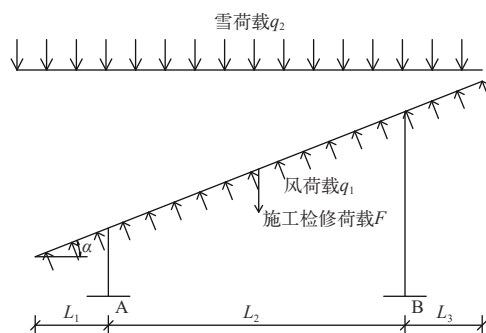


图 3 光伏支架计算简图

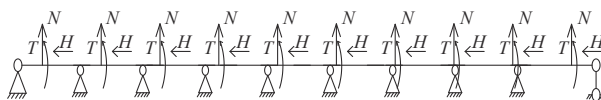


图 4 转换梁计算简图

为了便于计算支墩和施工，支座反力取所有反力最大值。

支墩计算简图如图 5 所示，前后支墩对 A 点做抗倾覆验算，如公式 (4)；前后支墩在外力作用下不能脱离屋面，如公式 (5)。根据公式 (4) 和公式 (5) 可以求出每个支墩的尺寸。

$$\frac{M_{\text{抗倾覆}}}{M_{\text{倾覆}}} > 1.20, \quad (4)$$

$$\frac{G_{\text{支墩}}}{N_{\text{支墩反力}}} > 1.0 \quad (5)$$



图 5 支墩计算简图

2 算例

某公司 2 MW 光伏发电项目是由上海电力设计院有限公司设计。屋顶光伏支架基础采用现浇混凝土制作，通过预埋的 U 型螺栓与上部支架连接。由于本工程厂房年代较旧，不宜把支墩直接放置在屋面板上，所以把支墩放置在顶层主次梁上，然后通过转换梁与光伏支架相连。

取一个光伏组件计算单元，光伏支架前、后立柱采用 3 mm 厚截面 61.9 mm × 41.3 mm 冷弯内卷 C 型钢，横梁采用 2.5 mm 厚截面 61.9 mm × 41.3 mm 冷弯内卷 C 型钢，斜梁采用 3 mm 厚 61.9 mm × 41.3 mm 冷弯内卷 C 型钢，拼接板采用 Q235 钢板，

连梁采用矩形钢管 100 mm × 80 mm × 2.5 mm。

2.1 荷载选取

2.1.1 风荷载

风荷载标准值

$$W_k = w_0 \mu_z \mu_s \beta_z \quad (6)$$

式中：根据荷载规范， w_0 为基本风压，上海地区基本风压为 ($n = 25$) 0.48 kN/m^2 ；离地面高 20 m 位置 C 类地区风压高度系数 $\mu_z = 0.65$ ；风振系数 $\beta_z = 1.00$ ；体型系数 $\mu_s = 1.3$ 。

风荷载标准值计算：

$$W_k = w_0 \mu_z \mu_s \beta_z = 0.4056 \text{ kN/m}^2 \quad (7)$$

2.1.2 雪荷载

雪荷载标准值

$$S_k = \mu_r S_0 \quad (8)$$

式中： S_0 为基本雪压上海地区基本雪压 ($n = 25$) 为 0.16 kN/m^2 ；体型系数 $\mu_r = 1.0$ 。

$$S_k = \mu_r S_0 = 0.16 \text{ kN/m}^2 \quad (9)$$

2.2 提出新计算方法计算结果

如图 6 为光伏支架计算简图，将一个三维支架简化为一个二维模型计算。根据结构力学知识，可以算出建模模型的内力和支座反力。图 7 为光伏支架计算内力图。表 1 为光伏支架支座结点计算结果。

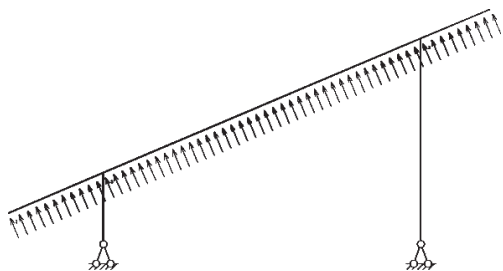


图 6 支架计算简图

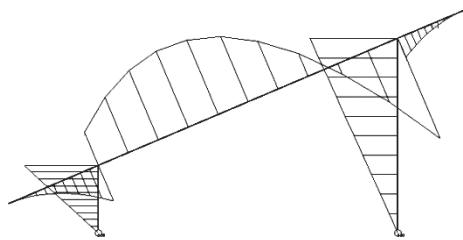


图 7 支架计算内力图

2.3 有限元软件 3D3S 计算结果

为了验证新型屋顶光伏支架基础简化计算方法正确性，采用 3D3S 对光伏支架采用三维建模，进

表 1 光伏支架支座结点计算结果

支座结点	结点约束反力		
	水平/kN	竖直/kN	力矩/(kN·m)
5	8.389	10.096	0
6	3.431	17.758	0

注：支座结点 5、6 为计算时前后立柱支座点。

行有限元分析。建模时，光伏支架与转换梁铰接连接，再对相应转换梁施加固定支座约束。如图 8 为光伏支架 3D3S 计算模型图。

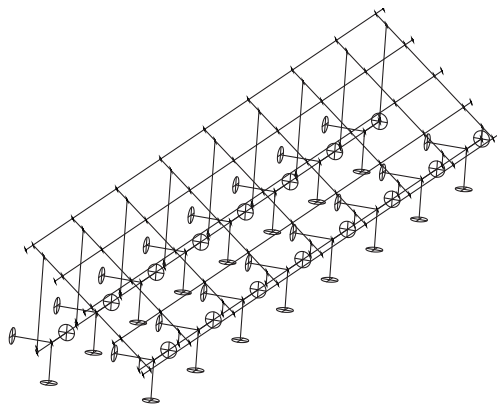


图 8 光伏支架 3D3S 计算模型

设计从最不利考虑，选取最不利荷载组合下结构支座反力和弯矩为： $N_x = 0.82 \text{ kN}$ ， $N_y = 3.38 \text{ kN}$ ， $N_z = 6.28 \text{ kN}$ ， $M_x = 1.23 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ， $M_y = 1.04 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ， $M_z = 0.61 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

2.4 有转换梁有限元 3D3S 计算

本算例 3D3S 计算模型与常规光伏支架计算模型的差别就在于本模型支架立柱底部用矩形钢管作为转换梁连接起来，在转换梁下一定长度距离增加支座。如图 9 有转换梁光伏支架 3D3S 计算模型。

设计从最不利考虑，选取最不利荷载组合下含有转换梁结构支座反力和弯矩为： $N_x = 0.21 \text{ kN}$ ， $N_y = 1.58 \text{ kN}$ ， $N_z = 2.12 \text{ kN}$ ， $M_x = 1.07 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ， $M_y =$

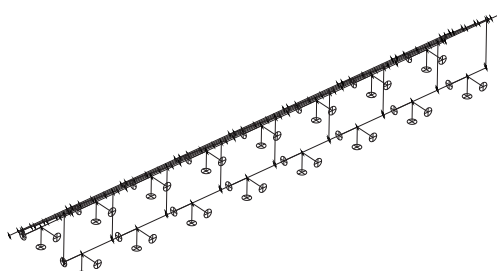


图 9 有转换梁光伏支架 3D3S 计算模型

1.80 kN·m, $M_z = 3.08 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

由上述计算转换梁内力可知, 转换梁主要剪力和弯矩。

2.5 无转换梁有限元 3D3S 计算

为了研究转换梁的作用和对结构的影响, 如图 10 建立无转换梁光伏支架 3D3S 计算模型。

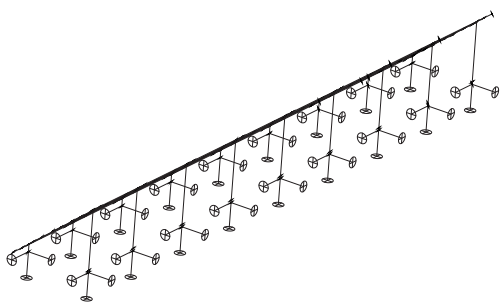


图 10 无转换梁光伏支架 3D3S 计算模型

由计算分析可知: 设计从最不利考虑, 选取最不利不含有转换梁结构支座反力和弯矩为为: $N_x = 0.41 \text{ kN}$, $N_y = 3.41 \text{ kN}$, $N_z = 5.78 \text{ kN}$, $M_x = 1.48 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_y = 0.08 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_z = 0.12 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

2.6 小结

比较简化计算方法和三维建模计算方法得出的计算支架混凝土墩的反力, 虽然简化计算方法计算出来结果比三维建模计算出来的结果大, 但考虑到简化计算方法计算出结果只有 2 个方向力无弯矩, 而三维建模计算输出的内力是 3 个方向的力和弯矩, 经过多个方向力的合成和弯矩转换实际项目计算可知简化计算方法计算出来的结果与采用三维建模计算出来的结果接近, 简化方法算出来的结果略大于三维建模计算出来的结果。

3 结束语

二维简化计算方法计算出来的结果与采用三维建模计算出来的结果接近, 且简化方法算出来的结果略大于三维建模计算出来的结果, 计算支架混凝土支墩偏保守, 也满足工程要求。新的简化计算方法经工程算例检验正确, 新方法计算简便, 提升计算效率。新的方法可以广泛应用于屋顶光伏和部分地质不好的地面光伏, 实现了计算模型简单, 计算步骤简洁, 计算结果安全可靠。转换梁的使用, 并没有明显增加基础用量。

有转换梁和无转换梁的光伏支架支座反力可知,

有转换梁光伏支架的支座反力要大于无转换梁的光伏支架支座反力, 但两种结构的支座反力相差不大。转换梁的使用, 使得屋顶光伏布置更加自由、安全; 同时, 转换梁的使用对光伏支架反力增大不多, 并没有增加明显基础用量。

屋顶分布式光伏常规在已有建筑物屋顶上, 已有建筑物在建设过程未考虑新增分布式光伏带来的附加荷载。分布式光伏项目开发需要根据现有光伏组件的布置方案, 须委托有相关资质的第三方对增加附加荷载后的建筑安全性进行鉴定和复核计算。后续阶段中, 须由该第三方出具正式的复核报告。对于不满足承载能力要求的建筑, 须采取适当措施进行加固。

参考文献

- [1] 李思岑, 杜威, 严中亮. 1 MWp 屋顶光伏并网系统设计与分析[J]. 山西电力, 2013,(181): 4-8.
- [2] 陈源. 光伏支架结构优化设计研究[J]. 电气应用, 2013, 32(17): 76-80.
- [3] 史嫻. 屋顶分布式光伏发电的支架结构设计探究[J]. 电气技术与经济, 2022,(28): 36-38.
- [4] 中国建筑科学研究院, 同济大学, 中国建筑设计研究院, 北京市设计研究院, 中国气象局公共气象服务中心, 哈尔滨工业大学. GB50009—2012. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [5] 内蒙古电力勘测设计院有限责任公司. NB/T 10115—2018. 光伏支架结构设计规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.

作者简介

黄瑞璞(1988—)男, 硕士研究生, 研究方向新能源结构设计。
(责任编辑: 张峰亮)

资讯

内蒙古超特高压公司: 开展 1000 kV 胜锡 II 线年度检修

2023 年 3 月 29 日, 国网内蒙古超特高压公司启动 1000 kV 胜锡 II 线年度检修工作。检修期间, 国网内蒙古超特高压公司认真落实各项规程、方案要求, 发挥自身优势, 坚决做到“应修必修、修必修好”, 确保圆满完成本次年度检修工作。

此外, 国网内蒙古超特高压公司探索“党建+工程”深度融合新模式, 将党建工作融入安全生产工作中, 实现党建与检修同频共振、步调一致, 以高质量党建引领护航检修精品工程。

信息来源: 国网内蒙古东部电力有限公司

基于模糊综合评价法的电网工程社会效益评估

徐丹¹, 高超²

(1. 中电联电力发展研究院有限公司, 北京 西城 100053; 2. 国网北京市电力公司
检修分公司, 北京 丰台 100076)

摘要: 模糊综合评价法的核心是依据隶属理论, 将一些边界条件不清晰的、不易进行定量测算的元素转化为定量元素进行测算, 进而得到评价结果, 其评价结果能够系统全面、层次清晰地对多因素制约对象进行反映, 用以解决非确定性问题。文章即采用模糊综合评价法, 通过建立常规电网工程社会效益评价指标体系, 同步确立各评价指标的权重以及他们的隶属度向量, 搭建电网工程社会效益评估模型。最后, 针对具体工程案例进行测算, 得出结论。

关键词: 模糊综合评价; 电网工程; 社会效益评估

中图分类号: TM727

Social Benefit Evaluation of Power Grid Project Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method

XU Dan¹, GAO Chao²

(1. Electric Power Development Research Institute. CEC, Beijing Xicheng 100053, China; 2. State Grid Beijing Maintenance Company, Beijing Fengtai 100076, China)

Abstract: According to the membership degree theory of fuzzy mathematics, the fuzzy comprehensive evaluation method transforms the qualitative evaluation into the quantitative evaluation. The result is clear and systematic. It can solve the fuzzy and difficult problems, and it is suitable for solving all kinds of uncertain problems. In this paper, the fuzzy comprehensive evaluation method is used to build the social benefit evaluation index system of power grid engineering, and the weight vector is constructed by AHP to carry out the fuzzy comprehensive evaluation. Finally, the social benefits of specific project cases are evaluated and the conclusion is drawn.

Keywords: fuzzy comprehensive evaluation; power grid engineering; social benefit evaluation

常规电网工程的建设通常具有投资额巨大、涉及相关人员较多、施工作业风险较大(包括客观因素和认为因素的双重影响)等特点, 但其建设往往对地方经济的拉动作用明显, 同时也会涉及到关系国计民生的方方面面, 因此, 电网工程的投资效益不仅关系到经济收入的多少, 还关系到社会民生的保障。

电网工程的投资建设给电网企业以及国民经济等带来的微观和宏观的效益, 都是电网工程建设投资价值的一种体现。因此, 科学的分析与评价电网工程的社会效益, 充分发挥社会责任对电网工程建设的引导作用, 实现电网工程建设投资效益最大化是十分必要的^[1-2]。

1 建立社会效益指标体系

为了能够科学、准确、客观地对电网工程所带

收稿日期: 2023-02-01

来的社会效益进行评价, 依据《中央企业固定资产投资项目后评价工作指南》和国家电网公司《110(66)kV-750kV交流输变电工程后评价内容深度规定》相关规定, 结合项目实际情况, 对于社会效益的指标体系进行模糊聚类, 并适时加以补充, 从利益相关者、社会影响以及互适性等3个方面, 构建包括利益相关者影响力、利益相关者、居民收入、居民生活质量、居民就业、文化、卫生、教育、城市发展、风俗、宗教、移民安置、民族矛盾、宗教等方面的影响在内的10项社会效益评估指标。其中所构建的指标可根据具体工程的实际情况以及差异性等进行调整和完善, 构建指标体系如图1所示^[3-4]。

2 搭建社会效益评估模型

为了确保评价结论的科学性和准确性, 本文结合层次分析法, 设置常规电网工程的社会效益评价

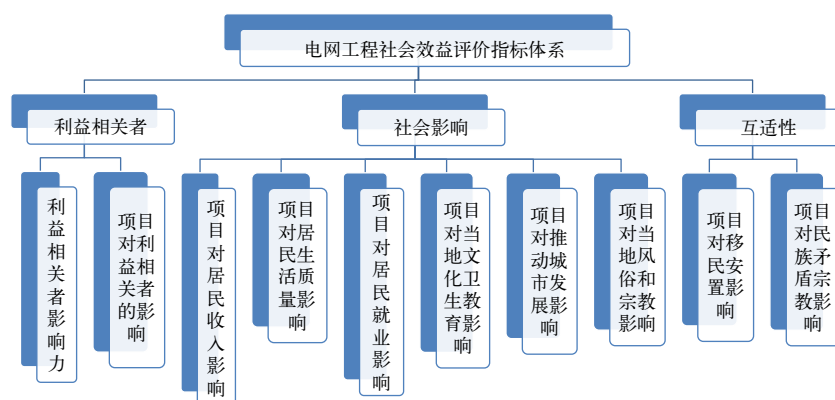


图1 社会效益评价指标体系

指标权重以及隶属度向量，搭建社会效益评估模型^[5-6]。... b_n), 得到不同的模型。

2.1 建立指标集

为确保指标体系的构建符合科学性和规范性要求，遵循典型、系统等基础原则以及可比、可量化等高级原则，建立指标集 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。

2.2 确定评语集

设立评语集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ ， V_i 为各级指标的评价结果。

2.3 确定权重及其归一化运算

首先，设置社会效益评价指标权重以及隶属度向量 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。

其次，结合层次分析法，确定重要性次序以及权重系数，归一化处理。

最后，将转化为定量指标的参数的超标情况进行处理，设定权重值为：

$$W_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中： W_i 为权重； C_i 为指标实测数据； S_i 为第 i 种指标各级标准值的算术平均值。

将上述指标及权重进行归一化运算：

$$V_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^m W_i}$$

式中： m 为最后选取的样本数量。

2.4 建立模糊关系矩阵 R

确立指标权重隶属度 ($R | X_i$) 以及模糊关系矩阵 R ：

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

2.5 综合评判

根据各因素权重 A 综合评判： $B = A \times R = (b_1,$

$$B = A \times R = (a_1, \dots, a_n) \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & r_{nn} \end{pmatrix}$$

根据矩阵 B 可以综合评判得出电网工程社会效益所属的等级。

3 案例分析

以某一地区投资建设的电网工程为例。该工程为联网工程，新建 500 kV、220 kV 变电站各 2 座，于 2018 年 8 月开工建设，2019 年 11 月底投入运行。

3.1 确定评语集

构建该电网工程的社会效益指标体系评语集合：

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{优}[100, 80], \text{良}[80, 60], \text{中}[60, 40], \text{一般}[40, 20], \text{较差}[20, 0]\}$$

不同等级的分值对应该地区社会效益评估不同的结果分数。

3.2 确定指标权重

首先，邀请行业内相关领域专家，针对该工程建设结果进行问卷调查，对所构建的一级指标进行重要性打分，根据专家打分结果可知，该工程社会影响指标对总体评价结果的影响最大，利益相关者指标影响次之，互适性指标影响最小。

其次，同样邀请行业内相关领域专家，针对该工程建设结果进行问卷调查，对所构建的二级指标进行重要性打分，得出专家打分结果。

利益相关者二级指标重要性排序：利益相关者影响力 > 对利益相关者的影响。

社会影响二级指标重要性排序：对居民收入的影响 > 对居民生活质量的影响 > 对居民就业的影响 > 对文化、卫生、教育的影响 > 对推动城市发展的影

表1 模糊综合评判隶属度

1	利益相关者	0.14	0.16	0.34	0.27	0.09
1.1	利益相关者影响力	0.10	0.10	0.40	0.25	0.15
1.2	项目对利益相关者的影响	0.20	0.25	0.25	0.30	0.00
2	社会影响	0.39	0.29	0.20	0.11	0.01
2.1	项目对居民收入影响	0.40	0.30	0.20	0.10	0.00
2.2	项目对居民生活质量影响	0.35	0.30	0.20	0.10	0.05
2.3	项目对居民就业影响	0.45	0.25	0.20	0.10	0.00
2.4	项目对当地文化、卫生、教育影响	0.30	0.35	0.25	0.10	0.00
2.5	项目对推动城市发展影响	0.45	0.35	0.10	0.10	0.00
2.6	项目对当地风俗和宗教影响	0.40	0.20	0.20	0.20	0.00
3	互适性	0.24	0.35	0.23	0.12	0.06
3.1	项目对移民安置影响	0.20	0.35	0.25	0.10	0.10
3.2	项目对民族矛盾、宗教影响	0.30	0.35	0.20	0.15	0.00

响>对风俗和宗教的影响。

互适性二级指标重要性排序：对移民安置的影响>对民族矛盾和宗教的影响。

3.3 模糊综合评价

设置模糊综合评判隶属度如表1所示。

表1中的3个一级指标通过加权平均法测算后，得到社会效益评价价值 $T = (0.29, 0.26, 0.25, 0.16, 0.05)$ ，综合评判得到项目环境效益得分为62.10，该工程社会效益评价结果为“良”。

针对工程各相关方来看，该电网工程的建设增强了各相关方的影响力，产生了有利于各相关方的影响；针对社会影响来看，该电网工程的建设提高了工程所在地居民的收入，提高了工程所在地居民的生活质量，提升了该地区的就业率，对该地区的文化、卫生、教育、发展、风俗和宗教等都起到了积极地推动作用；针对互适性影响来看，该工程的建设没有对移民安置以及宗教矛盾产生不良影响。综合来看，工程建设比较成功^[7-8]。

4 结束语

本文通过建立影响电网工程的社会效益指标体系、搭建电网工程社会效益评估模型、针对指标集、评语集、专家评分等进行了逐级分析，得出综合评价结果。该方法客观反映了各评价指标在整个评价体系中的重要程度，降低了主观因素对评价结果的影响，适用可行，且对于“社会效益大于财务效益”

或“具有完全公益性”的一类电网工程的社会影响评估准确性更高。本文最后针对某地区电网工程社会效益评价这一案例分析，对此评价方法进行验证，得出结论。

参考文献

- [1] 黄小娟. 基于多目标层次分析的输变电项目后评价体系研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [2] 高凡, 吴军, 刘涤尘, 等. 特高压电网社会效益评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 12-17.
- [3] 康重庆, 周天睿, 陈启鑫, 等. 电网低碳效益评估模型及其应用[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 1-7.
- [4] 李长青, 王秀青, 段玮. 我国发展可再生能源的社会效益分析[J]. 广西社会科学, 2016, (252): 79-83.
- [5] 张吉军. 模糊层次分析法 (FAHP) [J]. 模糊系统与数学, 2000, (02): 80-88.
- [6] SUN H, ZI J, DU D. Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation in Post-Evaluation of Power Transmission and Transformation Project[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2013, (11): 101-103.
- [7] CURTISS P S, RABLE A. Impacts of air pollution: general relationships and site dependence[J]. Atmospheric Environment, 1996, 30(19): 3331-3347.
- [8] HILIPPE Chone, LAURENT Flochel, ANNE Perrot. Allocating and Funding Universal Service Obligations in A Competitive Market[J]. International Journal of Industrial Organization, 2002, 20(9): 1247-1276.

作者简介

徐丹 (1982—), 女, 工程师, 主要从事能源电力发展规划、电力工程咨询研究等工作。

高超 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事输电线路工程建设、线路检修等工作。

(责任编辑: 张峰亮)

基于振动、场强信息的断路器三相不一致辨识方法

陈昊¹, 徐伟伦¹, 徐晶冉¹, 徐鹏², 汤宗尧², 陈予伦²

(1. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210019; 2. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司, 江苏 南京 211102)

摘要: 220 kV 及以上电网中采用分相操作机构的高压断路器在运行中可能出现三相位置不一致状态。常规的断路器三相不一致辨识方法仅能满足三相不一致保护的应用, 难以外引辨识结果供其他系统共享, 已不能满足当前变电站智能运检的实际需要。提出了一种基于振动、场强信息的三相不一致辨识新方法。首先, 通过振动信号监测断路器分合闸时刻; 进而通过电场强度 U 型曲线判断断路器是否处于三相不一致状态; 最后, 仿真及现场试验结果验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 高压断路器; 在线监测; 振动信号传感器

中图分类号: TM561

The Identification Method of Three Phase Inconsistent of Circuit Breaker Based on Vibration and Electric Field Intensity Information

CHEN Hao¹, XU Weilun¹, XU Jingran¹, XU Peng², TANG Zongyao², CHEN Yulun²

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Jiangsu Nanjing 210019, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co.Ltd. Extra High Voltage Branch Company, Jiangsu Nanjing 211102, China)

Abstract: Three-phase inconsistent state can occurred in high voltage circuit breakers with the split-phase operating mechanism in the 220 kV and above voltage power grid. The traditional identification method of three phase inconsistent of circuit breaker can only meet the requirement of application of three-phase inconsistent protection and the identification results are difficult to be exported and shared by other systems that cannot meet the practical requirements of intelligent maintenance in substation currently. A novel identification method of three phase inconsistent of circuit breaker based on vibration and electric field intensity information is proposed in this paper. Firstly, the moment of opening/closing of circuit breakers is detected by the vibration signal. Moreover, whether the circuit breaker is in the three-phase inconsistent state is judged by employing the U-shaped curve of electric field intensity. Finally, simulation and field test results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: HV circuit breaker; online monitoring; vibration sensor

220 kV 及以上高压断路器是电网的重要设备, 电网正常状态下, 高压断路器可以实现电网中空载电流和负荷电流的关断与导通; 而当电网发生故障时, 断路器能在继电保护装置的作用下有效切断过负荷电流和短路电流^[1-3]。220 kV 及以上高压断路器一般采用分相操作机构, 电力系统实际运行中, 高压断路器发生一相或两相误跳或偷跳、断路器发生三相触头非同期合闸、继电保护装置选相跳闸等^[4]均会造成断路器三相不一致运行, 也称为非全相运行^[5-6]。断路器处于非全相运行状态时, 系统中将存

基金项目: 国家自然科学基金项目(基于智能优化电场计算与空间电荷积聚规律的直流复合绝缘子表面电弧发展机理研究, 51807028)。

收稿日期: 2022-03-17

在较大的负序和零序分量, 危及设备安全, 甚至造成保护误动^[7]。因此, 220 kV 及以上电压等级断路器须要配置三相不一致保护辨识断路器三相不一致状态, 经延时跳开断路器, 结束断路器非全相运行状态, 保证电网运行的稳定性和安全性^[8], 因此, 对断路器三相不一致辨识是三相不一致保护能否正确动作的关键保障^[9-11]。

随着变电站智能运检技术的升级, 三相不一致状态辨识的应用已不局限于三相不一致保护, 高压断路器在线监测装置的故障诊断功能^[12-15]、智能运检智辅分析功能^[16-17]亦有辨识三相不一致状态的实际需求。但是, 出于保护的可靠性考虑, 现有的三相不一致保护所自带的三相不一致辨识不允许外接

作其他用途，无法和其他智能运检设备实现信息交互，具有局限性。另一方面，考虑到当前变电站智能运检技术已包含了对断路器振动^[18-20]、电场强度^[21-22]等物理特征量的监测，借助振动、电场强度等特征量实现一种基于新原理的断路器三相不一致辨识方法已具备条件。

有鉴于此，针对传统三相不一致状态辨识方法实际应用中的局限性，本文通过对振动、电场强度等特征量的非侵入式监测，在不改动断路器原有电气回路前提下，提出一种基于振动信号与电场强度信息的断路器三相不一致辨识方法，仿真和现场数据验证了所提方法的有效性。

1 传统的三相不一致辨识方法

传统三相不一致保护的三相不一致状态辨识的主流技术方案主要有断路器本体三相不一致保护和微型保护装置的电气量三相不一致保护 2 类。

1.1 断路器本体三相不一致保护

断路器本体三相不一致保护是将断路器 A、B、C 三相的常开、常闭辅助接点分别并联后再串联，然后串联时间继电器。当断路器出现三相不一致状态时，经时间继电器动作延时闭合其接点，启动出口中间继电器，由出口继电器跳开断路器三相，其典型设计方式如图 1 所示。

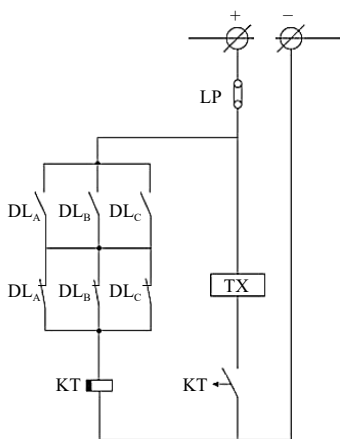


图 1 断路器本体三相不一致保护

其中，图中 LP 表示三相不一致压板，DL_A、DL_B、DL_C 分别表示分相断路器 ABC 三相的辅助触点，由 3 对常开和常闭触点组成回路，KT 表示三相不一致时间继电器及对应触点，TX 表示接触器，用于断路器控制。当断路器有一相或者两相断开运

行时，常开触点和常闭触点分别至少有一副触点处于闭合状态，回路导通，断路器三相不一致保护启动（三相不一致压板投入运行）。三相不一致时间继电器 KT 经整定延时后动作，接触器回路导通，断路器三相跳开。

1.2 微机保护电气量三相不一致保护

当三相不一致保护投入，任一相 TWJ 动作，且无电流时，确认为该相断路器处于跳闸位置，当任一相处于跳闸位置而三相不全部处于跳闸位置，则确认为不一致。三相不一致保护可经零序电流或负序电流开放，由“不一致经零负序电流”控制字来控制其投退。经“三相不一致保护时间”满足不一致动作条件时，出口跳开本断路器。一种典型的微机保护电气量三相不一致保护逻辑原理图如图 2 所示。

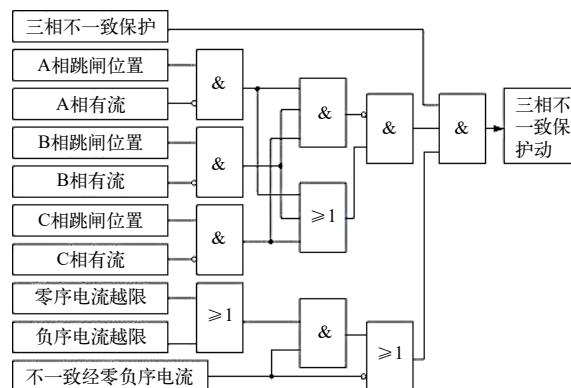


图 2 微机保护电气量三相不一致保护逻辑

应注意，微机保护电气量三相不一致保护的三相不一致状态辨识一般经零序、负序闭锁。

1.3 常规方法的局限性

1.3.1 断路器本体三相不一致保护的缺点

现场经验表明，在实际运行中存在断路器机构常开常闭辅助接点损坏、三相不一致时间继电器易受外界不利运行环境影响等问题，造成无法正确辨识出三相不一致状态，进而导致断路器本体三相不一致保护拒动。更重要的是，出于可靠性考虑，须要回路上保持相对独立，断路器本体三相不一致保护的三相不一致状态辨识仅供断路器本体三相不一致保护自己使用，一般不允许引出三相不一致状态辨识结果用作其他用途，无法与智能运检其他设备交互信息，不能用于断路器在线监测、智能辅助分析等用途。

1.3.2 微机保护电气量三相不一致保护的缺点

微机保护电气量三相不一致保护实际运行中可能存在 TWJ 异常, 致使无法辨识出三相不一致状态, 三相不一致保护拒动。同时, 在断路器断开时拉弧现象使得可能出现 TWJ 有开入同时对断路器仍有电流的情况, 进而导致无法正确辨识出三相不一致状态, 造成三相不一致保护拒动。上述问题造成长时间断路器非全相运行甚至将引起相邻线路零序后备保护越级跳闸。此外, 电气量三相不一致保护通常经零序、负序电流开放, 存在线路轻载时拒动问题。更重要的是, 微机保护电气量三相不一致保护的三相不一致状态辨识也是仅供微机保护电气量三相不一致保护自己使用, 一般不允许将三相不一致状态辨识结果引出用作其他用途(如断路器在线监测等)。

2 断路器状态综合判别方法

2.1 辨识思路

有鉴于传统方法的局限性, 不宜利用三相不一致保护里的三相不一致判别结果。实现新原理的断路器三相不一致辨识的思路可基于以下 3 点原则:

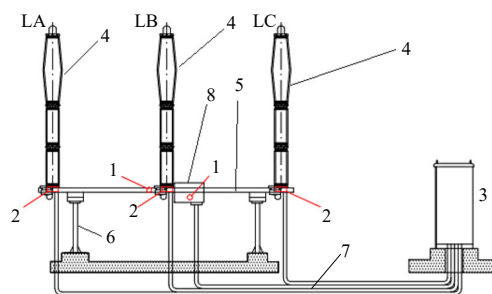
(1) 最大限度减少与传统二次回路的关联, 不依赖断路器辅助接点、监视继电器位置等; (2) 引入新特征量, 通过对特征量的分析可靠识别三相不一致状态; (3) 新特征量宜通过非侵入式监测方式获取。

考虑到变电智能运检建设不断深入, 断路器在线监测功能日益完善, 如为实现断路器机械故障监测已安装断路器振动信号传感器, 为实现断路器瓷套裂纹等外绝缘故障已分相安装断路器电场强度测量终端。振动信号传感器与电场强度测量终端均与断路器电气回路无直接联系。

这里将振动信号和电场强度数据作为新特征量, 基于振动信号判断高压断路器是否发生变位事件, 通过电场强度数据判断高压断路器是否处于三相不一致状态。

2.2 振动信号与电场强度信号的获取

现场安装振动信号传感器与电场强度测量终端安装位置如图 3 所示, 两者通过有线通信(或站内无线通信)和智能 IED 柜中断路器在线监测装置相关联。



1-振动信号传感器; 2-电场强度测量终端; 3-智能 IED 柜; 4-灭弧室; 5-横梁; 6-支柱; 7-线缆; 8-机构箱。

图 3 现场的振动传感器与电场强度测量终端

由图 3 所示, 现场现有的传感器和断路器在线监测装置为三相不一致辨识新方法的实现提供了必要的硬件条件。

2.3 基于振动信号幅值的断路器变位判别方法

下面以采样频率为 50 kHz 的振动传感器为例, 介绍断路器变位的判断方法。

由于断路器正常运行时振动传感器感受到的振动极小, 将所采集信号持续存入一个先进先出的队列中, 将数据不断滚动覆盖。断路器操作分合或故障分合闸时, 振动传感器感受到振动幅值远远高于断路器无分合时的振动幅值, 一旦感知到 5 个连续幅值较大的测量值, 即判为断路器已发生变位, 应形成振动信号记录。立即追溯保存在队列里的该时刻之前 20 ms 内的信号数据, (1000 个数据点) 并将第一个高幅值出现时刻定位为振动信号的初始点 t_0 。

当 t_0 时刻确定后, 继续收集数据, 进一步对监测数据是否存在典型坏信号(单点数值异常信号、多点排列异常信号)进行动态检测。若存在典型坏信号, 则视为该采样值无效, 重新采集振动信号直至不存在典型坏信号。

2.4 基于三相电场强度差异的识别方法

如前所述, 已在断路器 ABC 三相分别安装了电场强度测量终端, 平时动态采集电场信号, 采样频率为 1 kHz。考虑到现场安装的振动传感器、电场强度测量终端本身各有独立的监测功能, 采样频率有差异是一种常态。因此, 本文所提方法是在不增加额外投入调整两者采样频率的基础上进行的。

下面以断路器三相合闸, A 相未合上为例加以说明。由于电场强度测量数据亦持续存入一个先进先出的队列中, 将数据不断滚动覆盖。当振动传感

器判别出断路器变位后，确定 t_0 时刻后，触发断路器三相不一致识别机制，立即追溯保存在队列里的该时刻之前 20 ms 内的信号数据（20 个数据点），持续记录 3 s 电场强度数据。应注意这里的数据记录长度按照大于三相不一致保护动作时间来考虑，典型值为 3 s。

现场经验表明，运行状态下，高压断路器在场强测量终端安装位置附近的三相电场强度将呈现出 AC 相偏高，B 相偏低的规律，即呈现出“U 型曲线”现象。

下面以图 3 中所示的 3 个电场强度测点和抛物线型 U 型曲线加以说明：

所述三相电场强度值 U 型曲线，定义 x 轴为距离断路器 B 相测量点的距离，且 t 时刻以断路器 B 相测量点所在位置的垂线作为对称轴的连续函数 $g(x, t)$ ，该函数由两个半支组成，两个半支分别由连续可导函数 $g_1(x, t)$ 、 $g_2(x, t)$ 组成，所述两个半支在 $x = 0$ 处缀合成一个定义在二维域 $R_x \times R_t^+$ 的连续函数（变量 x 定义在实数域，变量 t 定义在正实数域）。

对于抛物线型三相电场强度值的 U 型曲线，两个半支 $g_1(x, t)$ 、 $g_2(x, t)$ 的表达式分别如式 (1) 所示：

$$\begin{cases} g_1(x, t) = E_B + \alpha_1 x^2, & x \text{ 位于 BC 相之间,} \\ g_2(x, t) = E_B + (\alpha_1 + \gamma)x^2, & x \text{ 位于 AB 相之间.} \end{cases} \quad (1)$$

式中： x 为其他测量点距离 B 相测量点的距离； E_B 为 B 点的电场强度； α_1 和 γ 为根据断路器经验数据估计出的当前运行状态下断路器附近电场强度 U 型曲线的拟合参数，正常状态下，一般有 $\gamma \ll \alpha_1$ ，即由式 (1) 表征的曲线大致呈现为“U 型”。

一般三个电场强度测量终端测点设置于 A 相，B 相，C 相瓷柱下方横梁上，此时 A 相、C 相测量点电场强度 $E_A(t)$ 、 $E_C(t)$ 如式 (2) 所示：

$$\begin{cases} E_A(t) = g_2(-x_{\max}, t) = E_B(t) + (\alpha_1 + \gamma)x_{\max}^2, \\ E_C(t) = g_1(x_{\max}, t) = E_B(t) + \alpha_1 x_{\max}^2. \end{cases} \quad (2)$$

式中： x_{\max} 为 A 相测量点距离 B 相测量点的最大距离。

易知，如三相合闸成功，则应满足三相一致判据，如式 (3)：

$$\begin{cases} |E_A(t) - E_C(t) - \gamma x_{\max}^2| < T_1, \\ |E_A(t) - E_B(t) - (\alpha_1 + \gamma)x_{\max}^2| < T_2, \\ |E_C(t) - E_B(t) - \alpha_1 x_{\max}^2| < T_3. \end{cases} \quad (3)$$

式中： T_1 、 T_2 、 T_3 分别为不同相测量点之间的电场

强度差异阈值。

假设 A 相未能成功合闸，则式 (3) 的前两项判据将不再满足。一般 $E_A(t)$ 测量值将偏低，显著低于 $E_C(t)$ 水平，根据三相一致判据可以判断 A 相合闸是否成功。现场应用中，考虑电场测量数值本身易受干扰的现实情况，可采取一种更为保守的辨识程序。如在前 20 ms（20 组 3 相数据比较）内出现 10 次以上前两项判据不满足，且在 20 ~ 30 ms 持续满足 $|E_A(t) - E_B(t)| > M$ （ M 为电场强度差异门限值，其推荐值与断路器电压等级相关，单位为 kV/m），则判为断路器三相合闸，A 相未合上。

2.5 辨识方法流程

断路器三相不一致辨识方法流程图如图 4 所示。

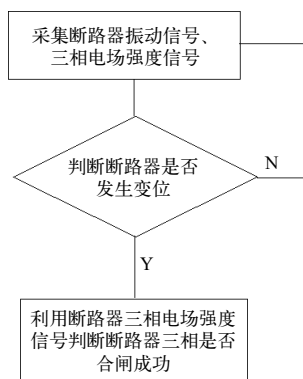


图 4 断路器三相不一致辨识方法流程图

2.6 三相不一致辨识的应用场景

由于上述判别完全基于非侵入监测手段，不受三相不一致保护限制，可单独应用于断路器故障诊断或后台高级应用，有前景应用包括如下几方面。

提供给断路器故障诊断系统，在分析断路器振动信号的同时，获悉了外部的三相不一致信息，实现断路器机械故障的精准诊断。

提供给断路器故障诊断系统，根据三相不一致信息，对断路器各相动作时间一致性的评价。

提供给变电站智能运检后台，传递断路器三相不一致告警信息。应注意，该功能并非三相不一致保护告警信号的重复。如保护电气量三相不一致保护，由于受到闭锁逻辑影响，有可能在低负荷无法动作，也无法告警。

3 应用实例

以 220 kV 西门子断路器（3AQ1EE）为研究对

象, 结合 500 kV 东善桥变现场实际安装尺寸, 基于 ANSYS 完成有限元仿真, 断路器在正常运行时呈现出“U 型曲线”, 同时在江苏地区某断路器实验室对 3AQ1EE 断路器进行了现场实验, 试验数据如表 1 和表 2 所示, 易见试验数据和仿真结果相一致。本文所提方法在实验室模拟的低负荷工况下测量到的电场强度差别足以可靠区分断路器是否出现了三相不一致, 可以及时给出告警, 便于变电运维人员应急处置。

表 1 断路器分合闸模拟

断路器变位判断	模拟分闸	模拟合闸
模拟次数	40	40
正确识别次数	40	40
1/4周波内识别次数	33	29

表 2 A 相故障模拟

A相故障模拟	$ E_A(t) - E_c(t) / (\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$	是否可分辨
1	0.5	是
2	0.8	是
3	0.6	是
4	0.5	是
5	0.7	是

进一步结合 500 kV 变电站智能运检工程建设, 在 500 kV 东善桥变某 220 kV 西门子断路器安装振动传感器、电场强度传感器及相关断路器在线监测装置, 如图 5 和图 6 所示, 现场收集数据表明, 基于振动信号可以可靠捕捉断路器变位信息。正常运行状态下, 断路器 AC 相电场强度偏高, B 相偏低, 呈现出 U 型曲线特征, 且与仿真及实验室结论相

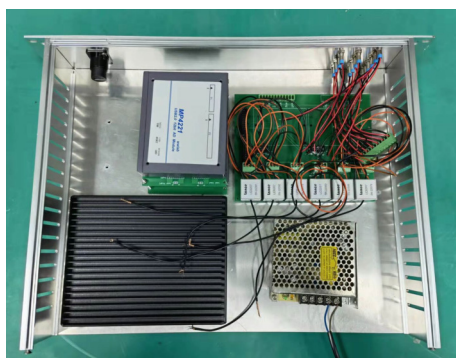


图 5 断路器在线监测装置



图 6 断路器在线监测装置的现场安装

一致。

由于相关传感器投运时间较短, 被监测断路器尚未实际发生三相不一致。但根据现场调试结果, 安装电场强度测量终端可以准确辨识 0.01 kV/m 的电场强度差异, 足以对是否满足三相一致判据做出准确判断。

4 结束语

本文基于实测的断路器振动信号和电场强度数据提出了一种断路器三相不一致辨识方法, 取得如下结论: (1) 基于对振动信号的分析可以准确判断断路器是否发生变位; (2) 经验性的电场强度 U 型曲线可以用于分析断路器是否处于不一致状态; (3) 现有的振动传感器精度和电场强度测量终端的测量精度足以保证本文所提方法的实用性。

参考文献

- [1] 陈昊, 徐鹏, 谭风雷, 等. 基于改进隐马尔可夫模型的高压断路器健康度评估方法[J]. 湖南电力, 2021,41(3): 7-11.
- [2] 付荣荣, 赵莉华, 荣强, 等. 高压断路器操作机构机械特性研究[J]. 高压电器, 2017,53(5): 56-62.
- [3] 石巍, 曹冬明, 杨兵, 等. 500kV整流型混合式高压直流断路器[J]. 电力系统自动化, 2018,42(7): 102-107.
- [4] 李斌, 郝建成, 刘一涛, 等. 断路器机械特性特征数据稳定性和故障机理[J]. 中国电力, 2015,48(2): 59-65.
- [5] 杨松, 赵小妹, 程晓翊. 500kV线路两侧保护动作不一致现象分析[J]. 电工技术, 2016,(11): 54-55+57.
- [6] 钱碧甫, 夏仁义, 张翔, 等. 一起220kV线路间隔断路器三相不一致异常告警的故障分析[J]. 电工技术, 2018,(13): 88-89+91.
- [7] 包雪铭, 吴刚, 许洁. 一起断路器三相不一致保护误动事件的分析及改进[J]. 华东电力, 2014,42(12): 2648-2650.
- [8] 杨文超. 断路器非全相非同期故障中继电器保护问题分析与处理[J]. 中国电力, 2007,(5): 75-77.

(下转第 53 页)

输电架空线路防风加固技术策略分析

徐 晖

(广东电网有限责任公司潮州供电局, 广东 潮州 521000)

摘要: 根据输电线路在强风环境下造成倒塔机理, 通过对常用的几种防风加固技术策略开展分析, 为沿海架空输电线路防风加固工作提供了工程实践经验。

关键词: 倒塔机理; 防风加固; 架空输电线路

中图分类号: TM752

Analysis of Wind Protection and Reinforcement Technology Strategy for Overhead Transmission Lines

XU Hui

(Chaozhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Chaozhou 521000, China)

Abstract: The article analyzes several commonly used wind reinforcement technology strategies based on the mechanism of tower collapse caused by transmission lines in strong wind environments. Provided engineering practical experience for wind protection and reinforcement of coastal overhead transmission lines.

Keywords: tower collapse mechanism; wind reinforcement; overhead transmission line

早期沿海地区建设的输电线路其设计气象条件重现期普遍采用为 15~30 年, 且未考虑导地线风荷载调整系数, 执行的设计标准相对较低, 导致抗风能力偏弱。这些线路若执行现行国标及南方电网相关防风导则的要求, 普遍未能达到 I、II 类风区 50 年一遇的要求, 因此研究沿海线路防风加固技术, 对提升设备防灾抗灾能力具有重要意义。

1 架空线路风荷载分布情况分析

杆塔抗风能力与杆塔基础、杆塔结构、导线型号等因素相关。风力过大即最大风速超过了杆塔设计的抗风标准是造成杆塔倒塌的主要原因。

输电线路铁塔承受的风荷载由 3 部分组成, 分别为导地线风荷载、绝缘子串风荷载及塔身风荷载。根据过往工程设计中的铁塔计算结果及经验, 对于整个铁塔而言, 导线风荷载及塔身风荷载约各占一半的比重。相对而言, 线路的金具串构造简单, 迎风面积小, 当档距较大时, 在整个铁塔的风荷载中所占重比较很小^[1]。

要弥补现有杆塔强度上的差距, 一方面可以考虑采用防风性能较好的导线(如应力转移型导线)

收稿日期: 2023-03-13

替换旧导线, 减小导线的外径从而降低铁塔承受的线条风荷载; 另一方面可以考虑采用打孔拼接、夹具等方式将原有塔身主材与新增杆件固定, 添加杆件改变原杆件长度及局部更换薄弱杆件等技术手段, 提升杆塔整体的承载力; 对于部分强度较弱的杆塔考虑更换成加强型铁塔^[2-3]。

2 常用加固技术策略分析

2.1 导线更换

我国线路早期设计标准对于导地线荷载计算低估了阵风效应, 特别作为早期设计铁塔导地线荷载输入相对不足, 因此降低导地线荷载是提高线路铁塔抗风能力最为直接有效的方法。

降低导地线风荷载有 2 个有效手段, 一个是降低导地线直径, 一个是采用低风阻导线。

降低导地线直径可以采用截面较小的耐热导地线, 因此除非降低输送容量, 否则无法采用更小直径的导线。

降低导地线风压还可以采用低风阻导线。相对于传统的钢芯铝绞线及铝包钢绞线, 它具有更小的风阻系数, 风压也相应有所降低, 低风阻导线的风压只有常规导线的 60%~90% 左右。但目前该类导

线在国内未广泛应用，各地区的运行经验较少。

2.2 铁塔加固

铁塔加固主要有无损加固与有损加固 2 类。

有损连接加固通过焊接或螺栓打孔连接，将加固构件连接于被加固构件从而起增强加固作用。该加固方式缺点在于焊接与螺栓打孔会导致构件镀锌层受到破坏，从而影响结构防腐性能，原加固后的铁塔防腐维护成本较高。

螺栓打孔加固会导致原构件截面由于打孔而承载力下降，虽然一般加固构件可以予以补偿，但由于节点避让等原因，加固构件与被加固构件之间或者有较大间隙，或者在节点位置无法加固，这既影响了加固效果，又较大地增大了塔身风阻。原塔打孔须要高空打孔操作，孔定位准确性也将影响加固构件与被加固构件之间的受力。一般来说，该加固方法对铁塔的防风加固效果可提升 1 个等级可靠度水平。螺栓打孔加固形式如图 1 所示。

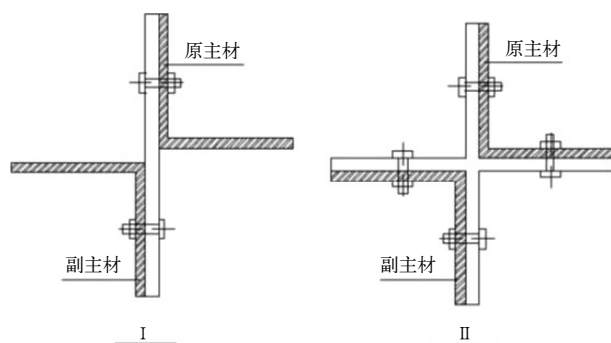


图 1 螺栓打孔加固形成十字组合角钢示意图

焊接加固由于其灵活性而有较好的加固效果，无论是节点避让还是节点加固都优于螺栓打孔加固，但原塔加固需要高空焊接作业，增大了施工作业难度，焊接后的喷锌防腐也将产生较大成本，焊接加固对防风加固效果一般可提升 2 个等级可靠度水平。

无损加固一般通过夹具将加固构件连接于被加固构件，被加固构件无须打孔、焊接，被加固构件没有损伤。由于夹具加固须避让节点，因此加固构件与被加固构件无法紧密连接，被加固构件与加固构件之间受力不均匀，加固效果甚至不如螺栓打孔式加固，对塔身风阻的增大也较大，该加固方法对铁塔加固效果为提高 1 个等级的可靠度水平。夹具加固形式如图 2 和 3 所示。

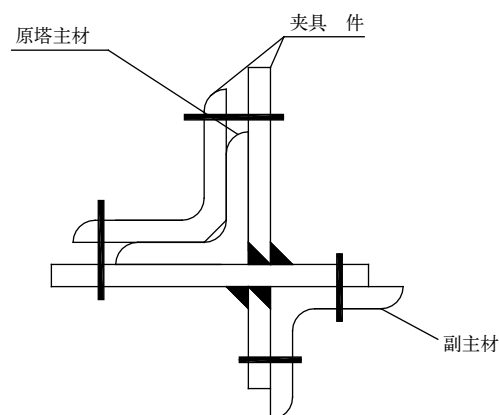


图 2 夹具加固形成十字组合角钢示意图



图 3 夹具加固铁塔



图 4 基础连接加固现场

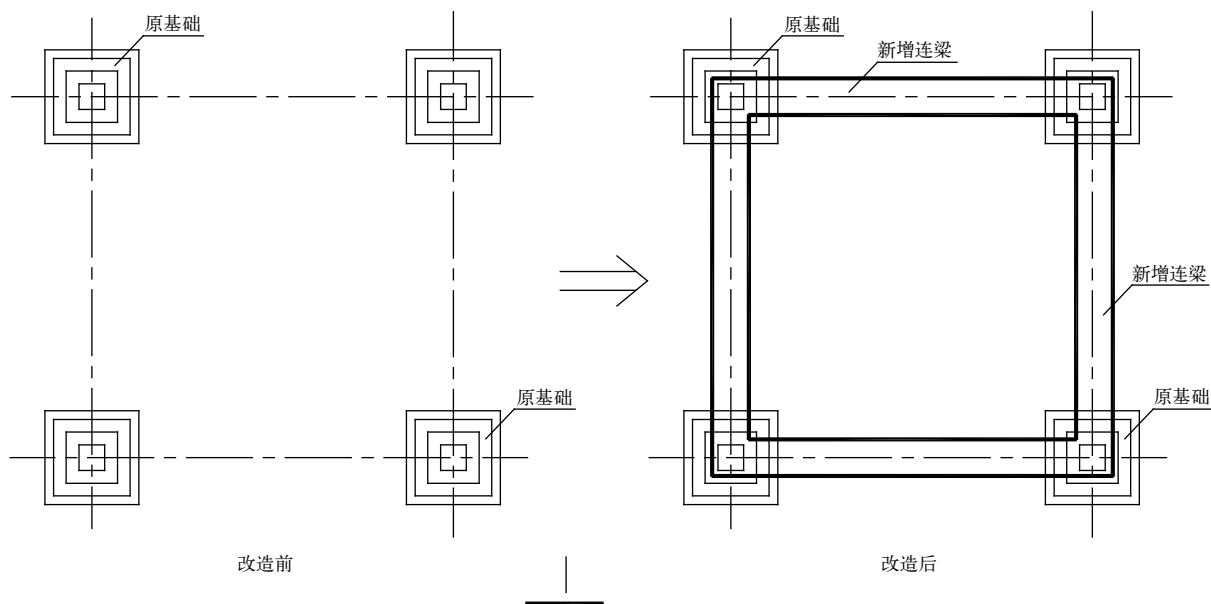


图5 铁塔基础添加连梁的加固方案示意图

2.3 基础连接加固

基础连接加固可通过植入钢筋方式进行，其中地脚螺栓加固主要是通过植入钢筋和原地脚螺栓一起承担上拔力，加固形式如图4所示。

2.4 基础加固

基础加固包括钢筋混凝土基础加固与地基土体加固。

地基土体加固是为了增强土体下压承载力、上拔承载力与抗侧力承载能力。加固方式一般有土体注浆、换填等方式。

钢筋混凝土加固包括主柱外包植筋、基础底板植筋加固等。由于底板加固及地面以下主柱（包括陶挖桩体）须基坑开挖，而线路安全又要求基坑土体稳定，因此土体以下的钢筋混凝土基础加固很难带电作业。

对于平腿塔位也可在原基础主柱边上浇筑一圈钢筋混凝土连梁，这样不但可使基础同方向的水平力相互抵消，同时利用连梁的自重和连梁底地基土承压来实现提高原基础抗拔、抗压的能力。加固示意图和加固工程照片如图5和图6所示。

除对原基础进行加固外，也可以考虑在基础旁边加设加固基础如辅助桩的方式进行基础加固。

3 结束语

文章分析了沿海地区输电架空线路在防风加固



图6 铁塔基础添加连梁的工程应用

方面主要采用的防风加固技术及管理对策。沿海架空输电线路局部改造时，应结合抗风评估结果、结合设备所处环境存在的施工难度，通过技术经济比较，选择最为合适的改造方式，全面提高架空线路抵御风灾的能力，切实做好架空线路的防风加固工作。

参考文献

- [1] 张飞华, 黄卫菊, 武利会, 等. 强风作用下输电塔风致倒塌机理和抗风加固方法探讨[J]. 广西电力, 2011, 34(6): 78-79.
- [2] 张勇. 输电线路风灾防御的现状与对策[J]. 华东电力, 2006, 34(3): 28-31.
- [3] 李茂华, 李正, 任吉华, 等. 500 kV输电线路杆塔结构的可靠性分析[J]. 电网技术, 2008, 32(23): 91-94.

作者简介

徐晖(1988—), 男, 中级工程师, 主要研究方向: 输配电专业。
(责任编辑: 刘艳玲)

一起 220 kV 变压器绕组变形缺陷的诊断及分析

刘胜军, 冯正军, 刘 钊, 郑献刚, 乔红军, 郭会永

(国网河北省电力有限公司保定供电分公司, 河北 保定 071000)

摘要: 介绍一起通过常规停电试验发现220 kV变压器中压绕组存在严重变形缺陷, 分析了该变压器中压绕组变形的原因, 提出了日常维护的建议, 并提出为了避免类似缺陷的发生, 设计大型变压器时, 应优化产品设计和制造工艺。同时, 改善变压器运行环境也是一项重要措施。

关键词: 变压器; 绕组变形; 抗短路能力; 短路故障

中图分类号: TM411

Diagnosis and Analysis of a 220 kV Transformer Winding Deformation Defect

LIU Shengjun, FENG Zhengjun, LIU Zhao, ZHENG Xiangang, QIAO Hongjun, GUO Huiyong

(Baoding Power Supply Company of State Grid Corporation of China, Hebei Baoding 071000, China)

Abstract: This article introduces a defect of severe deformation of the medium voltage winding of a 220 kV transformer discovered through routine tests. Analyzed the reasons for the deformation of the medium voltage winding of the transformer. Suggested daily maintenance. To avoid similar defects, product design and manufacturing processes should be optimized when designing large transformers. Meanwhile, improving the operating environment of transformers is also an important measure.

Keywords: transformer; winding deformation; short circuit resistance; short circuit fault

近年来, 为了满足社会和经济快速发展的需要, 电力系统容量越来越大, 导致中低压侧短路冲击尤其近区短路冲击对变压器所产生的后果越来越严重, 可能导致中低压绕组变形。绕组变形是大型变压器运行的重大隐患, 如不能及时发现, 将对电网安全稳定带来重大威胁^[1]。

1 基本情况

某 220 kV 变电站 2 号变压器设备信息为: 型号 SFSZ11-180000/220, 额定容量 180/180/60 MV·A, 额定电压比 $230 \pm 8 \times 1.25\%/121/38.5$ kV, 接线组别: Ynd11, 出厂及投运日期 2008 年 6 月。该变压器于 2015 年 9 月 7 日曾进行停电试验, 各试验项目试验数据均正常。

该变电站 220 kV 采用 3/2 接线方式, 110 kV 采用双母线带旁路接线, 正常运行方式为并列运行, 35 kV 采用单母线分段接线, 未装设母联开关, 正常运行方式为分列运行。该变电站 1 号变压器 220/110 kV 中性点接地刀闸在合位, 2 号变压器 220/110 kV 中性点接地刀闸在断位。

收稿日期: 2022-07-05; 修回日期: 2022-07-12

2 试验情况及分析

该 220 kV 变电站 2 号变压器停电试验时, 当地天气阴, 环境温度 19 ℃, 相对湿度 70%, 油温 15 ℃。该变压器开展了绕组电阻、绕组电压比、绕组介损电容量、低电压短路阻抗、绕组频率响应分析、油中溶解气体分析、套管试验、绕组绝缘电阻、铁芯及夹件绝缘电阻等试验项目, 其中绕组电阻、绕组电压比、油中溶解气体分析、套管试验、绕组绝缘电阻试验、铁芯及夹件绝缘电阻试验数据均符合标准要求。

2.1 绕组介损电容量试验

该变压器绕组介损和电容量试验结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 高压、中压、低压绕组对其他绕组及地的电容量增大分别为 -5.2%、14.2%、16.3%, 高压及中压绕组对低压绕组及地的电容量增大至 22.1%, 高压、中压、低压绕组对地的电容量增大 3.7%, 可见中压绕组对高压、低压绕组及地, 低压绕组对高压、中压绕组及地, 高压、中压绕组对低压绕组及地的电容量变化远超过规程要求。另外高压绕组对中压、低压绕组及地, 高压、中压、

表 1 绕组的介损值和电容量

测量端	2022/05/10		出厂值		电容量 初值差 /%
	$C_x/\mu\text{F}$	$\tan\delta$	$C_x/\mu\text{F}$	$\tan\delta$	
高压—中、低压 及地	15 520	0.002 34	16 370	0.002 68	-5.2
中压—高、低压 及地	27 880	0.003 01	24 420	0.002 40	14.2
低压—高、中压 及地	39 870	0.003 41	34 270	0.002 42	16.3
高、中压—低压 及地	25 030	0.003 11	20 500	0.002 56	22.1
高、中、低压 —地	33 410	0.003 21	32 220	0.002 68	3.7
高压—地(C_H)	6 185	—	6 225	—	-0.6
中压—地(C_M)	3 100	—	3 000	—	3.3
低压—地(C_L)	24 125	—	22 995	—	4.9
高压—中压(C_{H-M})	9 035	—	10 145	—	-10.9
中压—低压(C_{M-L})	15 745	—	11 275	—	39.6

低压绕组对地的电容量变化也超过规程要求^[2]。试验人员利用图 1 所示的绕组电容量分解模型对电容量进行分解发现，高压绕组对中压绕组的电容量减小达到 10.9%，中压绕组对低压绕组的电容量增大达到 39.6%，低压绕组对铁芯的电容量增大 4.9%，高压绕组对地的电容量变化无明显异常。初步判断中压绕组变形严重，向内塌陷。

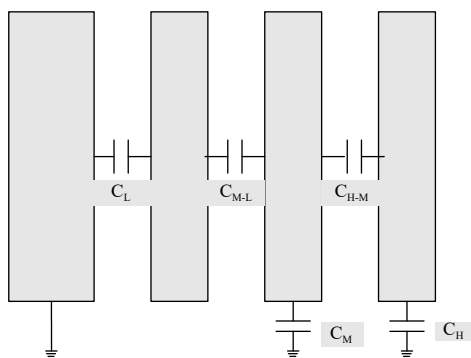


图 1 绕组电容量分解示意图

2.2 低电压短路阻抗试验

该变压器低电压短路阻抗试验结果如表 2 所示。由表 1 可以看出，在最大分接位置，A 相、B 相、C 相高压绕组对中压绕组初值差均超过“初值差不超过 $\pm 1.6\%$ ”的规程要求，其中 B 相、C 相分别达到 11.94% 和 11.08%。最大相对互差也超过不应大

于 2% 的规程要求。在最大分接位置，A、B、C 相高压绕组对低压绕组初值差同样均超过规程要求。另外，在额定分接位置，A、B、C 相中压绕组对低压绕组初值差同样均超过规程要求，其中 B、C 相分别达到 -13.37% 和 -12.22%。最大相对互差远超过规程要求^[3]，达到 11.78%。从低电压短路阻抗结果来看，初步判断 B 相、C 相中压绕组变形严重，A 相中压绕组也存在变形。

表 2 低电压短路阻抗 %

分接位置	测量值	A 相	B 相	C 相	最大相对互差
高压—中压 最大分接	试验值	13.37	14.161	14.051	5.92
	铭牌值	12.65	12.65	12.65	
	初值差	5.69	11.94	11.08	
高压—低压 最大分接	试验值	22.553	22.532	22.707	0.78
	铭牌值	23.29	23.29	23.29	
	初值差	-3.16	-3.25	-2.50	
中压—低压 额定分接	试验值	7.03	6.289	6.373	11.78
	铭牌值	7.26	7.26	7.26	
	初值差	-3.17	-13.37	-12.22	

2.3 绕组频率响应分析

图 2~4 分别为该变压器高压、中压、低压绕组的三相频率响应特性曲线。由图 2 所示高压绕组 A 相在低频段出现了谐振峰的位置及大小变化，在中频段 C 相出现了谐振峰的大小变化，高频段相关性基本良好^[4]。从图 3 可以看出，中压绕组低频段 C 相的谐振峰大小有变化，中频段 A 相出现了较明显的谐振峰位置和大小变化，高频段相关性基本良好。由图 4 所示低压绕组 A 相、C 两相绕组在低频段也出现了较明显的谐振峰的位置及大小变化，而中、

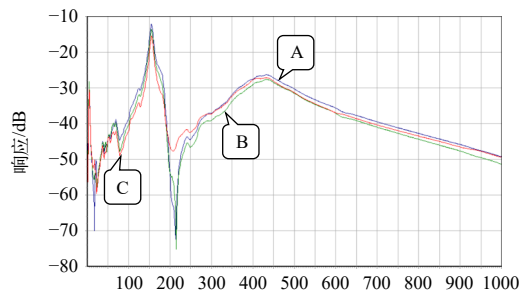


图 2 高压绕组频率响应特征曲线

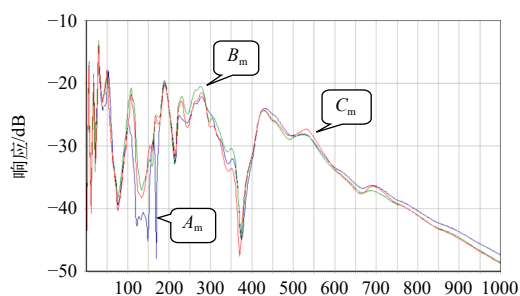


图3 中压绕组频率响应特征曲线

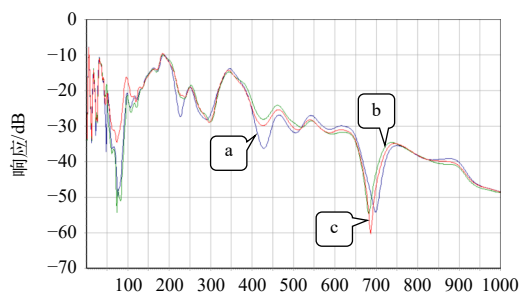


图4 低压绕组频率响应特征曲线

高频段相关性基本良好。初步判断该变压器三侧绕组均存在绕组变形情况，以中压绕组尤为严重，集中在中频段。

2.4 缺陷原因初步分析

当短路电流尤其出口短路电流通过变压器中压、低压绕组时，因绕组周围漏磁场的存在，且与通过绕组电流成线性关系，绕组会承受巨大电动力的作用。因为高压绕组对于电力系统为用电设备，中压、低压绕组对于电力系统为电源，所以流经变压器高压绕组的电流方向与中压、低压绕组相反，遭受短路故障时，短路电流在轴向漏磁场作用下，使处于最外层的高压绕组受到扩张径向力，使处于内部的中压、低压绕组受到压缩径向力，导线材质、结构等多种因素决定其抗弯强度远低于抗拉强度，所以极易发生绕组变形等机械失稳问题^[4]。另外，变压器遭受短路故障时，中压、低压绕组承受的短路电流远大于高压绕组承受的短路电流，在漏磁场作用下，受到的电动力更大，故短路电流更易造成中压、低压绕组变形^[5]。

该变压器已运行近 15 年，尽管抗短路能力校核结果中压绕组满足规程要求，但投运以来中压侧遭受多次短路故障，特别是 2022 年 5 月 2 日，线路侧断路器因机构问题，延时分闸，该变压器中后备保护动作跳闸，切除线路故障。此次短路故障对该变

压器中压侧造成较长时间的短路电流冲击。具体情况如下：

2022 年 5 月 2 日 13:10:24.872，某 110 kV 线路发生 B 相接地故障，该 220 kV 变电站 154 线路保护零序 I 段、距离 I 段动作，154 断路器未跳开，该 110 kV 线路故障电流未消除。随后，该 220 kV 变电站 2 号变压器中压侧过流保护 I 时限动作，跳开 101 断路器，过流保护 II 时限动作，跳开 112 断路器，故障电流切除，67 s 后 154 断路器跳开。

综合以上试验情况，初步判断 A 相、B 相、C 相中压绕组均变形，但绕组未出现匝间短路或断股情况，因此油色谱未见异常。变压器绕组变形缺陷有明显的积累效应，由于遭受了多次短路冲击，绕组机械强度受到破坏，该变压器以往试验数据未发现异常，直至遭受最近一次短路冲击，中压绕组受到压缩径向电动力的作用，自身固有应力失衡，中压绕组更靠近低压绕组，其对低压绕组电容量增大，对高压绕组电容量减小，故判断该变压器中压绕组已发生明显变形，具体情况须返厂吊罩解体检查。

3 解体检查情况

2022 年 5 月 25 日，对该变压器进行解体检查，情况如下。

调压绕组外观无异常。高压绕组受中压绕组变形挤压位置出现轻微变形，部分油隙垫块可见明显偏移，如图 5 所示。

A 相中压绕组在靠近旁柱的相间侧，上半段发生扭曲变形，其中 7-11 撑条间线饼变形尤其严重，如图 6 所示。内外径对应区域可见多处绝缘破损，其中外径侧在第 16、18、19、20 饼，9 撑条位置，各有 1 处露出铜线，如图 7 所示。上部右数第 3~15 根内径侧撑条出现分层，如图 8 所示。B 相、C 相中压绕组同样存在严重变形。

低压绕组外部围屏纸板发生严重变形，局部撕裂损伤，受中压绕组变形挤压位置出现变形，部分油隙垫块受挤压变形。

高压、中压、低压绕组均未使用自粘换位导线，不满足现行的抗短路能力设计要求。

该变压器下节油箱为透形结构，与常见的 U 形传统结构存在差异，存在油流循环不畅的问题。



图 5 高压绕组垫块偏移情况



图 6 A 相中压绕组变形情况



图 7 A 相中压绕组绝缘损坏情况

解体检查结果表明，该变压器中压绕组多次遭受短路故障后，三相绕组已发生严重变形，部分绝缘已损坏，如未及时发现，运行中再次遭受短路故障，将造成严重设备及电网事故^[6]。



图 8 A 相中压绕组撑条分层情况

4 结束语

任何设备事故的发生都是由内部原因和外部原因共同作用引起的，对于变压器绕组变形故障产生的外部原因因为遭受短路电流冲击和运输、运行过程中遭受物理碰撞，对于本起缺陷而言是短路电流的冲击。而造成变压器绕组变形的内部原因因为本身抗短路能力不足。因此为防止大型变压器发生短路损坏事故，应在产品制造和运行管理 2 方面采取综合措施^[1]。在变压器遭受短路电流冲击后，应在油气监视的基础上，综合考虑变压器设计、工艺水平、材料质量、电气试验等多重因素，开展变压器诊断试验，判断变压器健康状况，防止变压器带病运行。

参考文献

- [1] 刘胜军, 周永强, 何燕. 突发短路造成 220 kV 变压器损坏原因分析及处理[J]. 电子世界, 2013, (009): 79-80.
- [2] 中国电力企业联合会. 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 北京: 中国计划出版社, 2010.7.
- [3] 刘胜军. 突发短路造成 220 kV 变压器损坏原因分析及处理[J]. 变压器, 2013, (12).
- [4] 穆永保. 一起 220 kV 变压器绕组变形缺陷的诊断与原因分析[J]. 变压器, 2014, (11).
- [5] 中国电力科学研究院. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB 50150—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.6.
- [6] 中国电力企业联合会. 电力变压器绕组变形的频率响应分析法: DL/T 911—2016[S]. 北京. 2016.7.

作者简介

刘胜军 (1974—), 男, 高级工程师, 从事技术监督专业管理工作。

(责任编辑: 刘艳玲)

变电站直流系统绝缘故障分析与防范

王耀升, 殷 军, 罗志远, 李锐锋, 郭 晓, 赵旭阳

(国网浙江省电力有限公司嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 分析了变电站直流系统绝缘故障的危害和防范措施。首先, 对某地市级供电公司近3年内发生的直流系统绝缘故障进行了统计分析, 总结造成变电站直流系统绝缘故障的原因主要为直流支路二次电缆、辅助接点的绝缘老化破损和进水受潮。其次, 以变电站发生的直流绝缘故障事件为例开展分析, 剖析暴露的问题。最后针对各类故障原因提出相应的防范治理措施, 提升变电站运行可靠性。

关键词: 直流系统; 绝缘故障; 二次电缆; 进水受潮

中图分类号: TM854

Analysis and Prevention of Insulation Faults in Substation DC System

WANG Yaosheng, YIN Jun, LUO Zhiyuan, LI Ruifeng, GUO Xiao, ZHAO Xuyang

(Jiaxing Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhejiang Jiaxing 314000, China)

Abstract: This article analyzes the hazards of insulation faults in the DC system of substations and proposes preventive measures. Firstly, a statistical analysis was conducted on the insulation faults of the DC system that occurred in a certain municipal power supply company in the past three years. The main causes of insulation faults in the DC system of the substation are aging, damage, and moisture in the insulation of the secondary cables and auxiliary contacts of the DC branch. Secondly, analyze the DC insulation faults that occurred in the substation. Finally, corresponding preventive and governance measures are proposed for various types of fault causes. Improve the reliability of substation operation.

Keywords: DC system; insulation fault; secondary cable; water ingress and dampness

直流系统由变电站直流电源及各直流支路组成, 其中直流电源主要由充电单元、馈电单元、监控单元、绝缘监测及蓄电池等部分组成, 各直流支路主要包括一、二次设备装置电源、遥信电源及控制电源回路等。直流系统是变电站中的重要组成部分, 为控制、信号、继电保护、自动装置、事故照明及倒闸操作等提供直流电源, 直流系统运行状况的好坏直接影响到变电站的安全稳定运行^[1]。

直流系统绝缘故障是指变电站直流系统单极对地电压或绝缘降低并发出接地告警信号的情况^[2]。一般 220 V 直流系统按照两极对地电压绝对值差超过 40 V 或绝缘降低到 25 kΩ 以下, 110 V 直流系统按照两极对地电压绝对值差超过 20 V 或绝缘降低到 15 kΩ 以下进行整定^[3]。直流系统绝缘故障发生后, 如果不及时处理, 进一步发展成两点及以上接地时, 将有可能引起开关误动、拒动, 控制、信号回路异常等, 严重威胁电网设备安全运行^[4]。

收稿日期: 2022-10-20

本文对某地市级供电公司近 3 年内发生的直流系统绝缘故障进行了统计分析, 总结了造成变电站直流系统绝缘故障的原因, 并对实际发生的直流系统绝缘故障案例进行分析, 剖析暴露的问题。最后针对直流系统绝缘故障的各类故障原因提出相应的防范治理措施, 提升变电站运行可靠性。

1 直流系统绝缘故障统计分析

近 3 年来, 某地市供电公司主网共发生直流系统绝缘故障缺陷 78 起, 以下从缺陷设备运行年限、户内外情况、设备类型、故障类型及原因等维度进行分析。

1.1 站所分析

针对发生直流系统绝缘故障的变电站, 从是否 GIS 站、户内户外、变电站运行年限以及电压等级等角度进行统计分析, 如表 1 所示。GIS 变电站发生直流系统绝缘故障的有 18 起, 占比 23%, AIS 变电站有 60 起, 占比 77%; 220 kV 变电站发生直流

系统绝缘故障的有 66 起，占比 85%，110 kV 变电站 10 起，35 kV 变电站 2 起；户外或半户内变电站发生直流系统绝缘故障有 71 起，占比 91%，户内变电站有 7 起，占比 9%。

表 1 不同类型变电站直流系统绝缘故障数据统计

变电站类型	10年以内 (含10年)		10~15年		15年以上 (含15年)	
	户内	户外	户内	户外	户内	户外
GIS站/起	4	15	3	21	0	35
AIS站/起	3	9	1	5	0	0
总数量/起	1	6	2	16	0	35

由以上统计数据可以看出，发生直流系统绝缘故障的主要是运行年限比较久的 220 kV 变电站，220 kV 变电站均为户外站且大部分为 AIS 变电站。

1.2 故障设备分析

对引起直流系统绝缘故障的设备进行统计分类，故障设备可分为直流电源和直流支路 2 类，直流电源包括直流装置和蓄电池，直流支路包括有二次电缆、辅助接点、负荷装置、回路端子以及回路原件等^[4]，如表 2 所示。

表 2 直流系统绝缘故障数据统计

直流电源		直流支路					
直流装置	蓄电池组	二次电缆	辅助接点	回路端子	回路原件	负荷装置	不明原因
2	2	28	22	8	6	2	8

由表 2 可以看出，直流系统绝缘故障缺陷主要集中在直流支路方面，共 74 条占比 95%。支路中涉及二次电缆及辅助节点绝缘异常缺陷较多，共 50 条占比 64%；支路中涉及回路端子、元件异常、负荷装置缺陷及自行恢复原因不明确的直流绝缘故障相对较少，共 24 条占比 31%。

对直流支路故障设备进行详细分析，如表 3 所示。

可以看出，直流支路二次电缆故障中信号回路故障次数最多，这也跟站内信号回路数量最多有关。直流支路辅助接点故障中电容器电抗器网门和闸刀辅助接点故障次数最多。主变的非电量回路共发生直流系统绝缘故障 8 起，故障率较高。其次，回路端子故障中因端子受潮引起、回路原件故障中因分合闸线圈故障引起故障次数较多。另外有 8 起故障由于短时复归未能确定故障点。

1.3 故障原因分析

经过现场检查处理，确定发生直流系统绝缘故障的主要原因为设备进水受潮、绝缘不良及设备自身故障。如图 1 所示。

由图 1 可以看出，因设备进水受潮造成的直流系统绝缘故障有 28 起，占比 36%，因老化或电缆破损造成绝缘不良的有 24 起，占比 31%，总占比 67%。其次因设备故障引起的直流系统绝缘故障 12 起，占比 15%，因工作工艺引起故障 6 起，占比 8%，另外有 8 起自行恢复原因不明确的绝缘故障占比 10%。

由此可以总结造成直流系统绝缘故障的原因有：

支路二次电缆绝缘老化、破损及工作工艺引起，主要有变电站运行年限较长（20 年左右）导致电缆老化，绝缘降低；户内外设备二次电缆受工作、工艺问题造成绝缘故障。

支路设备端子、辅助接点进水受潮及支路设备故障、异常引起，主要有户外机构箱、端子箱、汇控柜、表计、容抗器网门等设备密封不严及防雨措施不到位；户内外设备加热器故障导致设备内部受潮严重；设备分合闸线圈及闸刀辅助节点等设备故障引起直流系统绝缘故障。

直流系统设备故障、异常引起，主要有直流电源、直流绝缘主控盒、蓄电池等设备故障引起直流系统绝缘故障。

表 3 直流支路故障数据统计

二次电缆				辅助接点			回路端子			回路原件		负荷装置	不明原因	
信号回路	控制回路	主变非电量	事故照明	网门	闸刀	开关	主变非电量	端子受潮	端子松动	端子错接	分合闸线圈	继电器等	测控、消防	不明原因
14	6	5	3	11	7	1	3	5	2	1	4	2	2	8

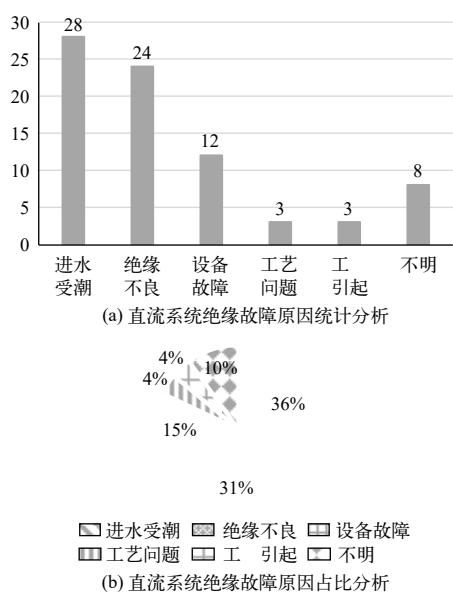


图1 直流系统绝缘故障原因分析

其他情况，直流系统绝缘故障频繁动作，难以确认故障点。可能的原因有支路电缆或节点绝缘受潮出现的绝缘短暂性降低、恢复情况，电缆绝缘下降至告警界限附近的情况以及遥信误报的情况。

2 直流系统绝缘故障案例分析

首先以某 220 kV GIS 变电站 220 kV 线路开关机构箱发生渗漏水事件为例。

某变电站 220 kV 2345 线 B 相开关频繁变位，并报第一套保护装置异常、第一套保护 GOOSE 总告警、第一套智能终端异常。20 min 后，第一套直流系统故障、直流系统绝缘故障，一体化电源总故障动作。现场检查发现有雨水通过开关机构箱外侧防雨板与机构箱连接处渗漏到航空插件内，如图 2 所示。



图2 开关机构箱与外侧防雨板连接处渗漏水

现场运检人员对航空插件外部进行烘干处理后异常未能消除，为防止问题扩大向省调申请停开关，打开航插进行检查处理。2345 线开关停役后，拉开控制电源，隔离航空插件故障点后直流系统恢复正常。现场打开航空插件发现，内部确有渗水情况，插件公母侧均有部分熏黑痕迹，未见锈蚀，初判为新渗入雨水导致，如图 3 所示。



图3 航空插件渗水短路

综合现场断路器机构箱内检查情况和航空插件打开后检查情况，确定本次异常的主要原因为开关机构箱防水板安装处防水胶老化，导致在连续强降雨情况下有雨水沿防水板与机构箱体的拼接面缝隙向下渗入，并沿航空插件插接处防水胶存在的微小渗漏点进入航空插件内，最终引发内部绝缘下降，导致一系列异常告警。后续须要加强户外箱体标准化整治，对断路器机构采用航空插件连接方式的进行防雨罩安装和防水胶密封整治。同时应加强现场防水密封的日常巡视，除开箱检查外，应将外部防水措施密封情况纳入现场检查，发现问题及时处理。

另以一起二次电缆破损引起直流系统绝缘故障事件为例。

某 220 kV 变电站报直流系统绝缘故障，现场天气晴朗，设备无操作，检修人员拉路检查确定某 220 kV 线路开关第一组控制回路存在接地，开关在运行状态，拉开第一路控制电源，对故障点进行隔离。进一步检查二次回路后判断是断路器 A 相机构箱内存在接地。现场检查断路器机构箱密封完好，加热器正常运行，无凝露进水现象，箱体清洁无异物，二次元器件和二次线无烧伤、过热痕迹。

申请开关改冷备用后进一步查找接地点，发现开关 A 相机构箱内二次线缆有明显磨伤痕迹，金属

线外露，对受损线缆进行绝缘包扎后缺陷消除。

分析故障原因为二次导线捆扎成束直接靠在机构箱支架钢板上，自身重量较大，钢板截面积小，导致与钢板接触的外侧导线受到压强较大。在机构箱内储能电机运转、分合闸等过程中发生的震动加剧了导线磨损，最终导致二次线缆磨伤，金属外露导致接地。现场采用橡胶电缆皮对线缆与金属支架板做填充隔离，并对 BC 两相进行同样的电缆防护处理。

现场处理消缺后应同时对同类型断路器机构进行排查，确认无类似磨破情况发生，针对类似捆束电缆压在钢板支架的现象开展电缆防护整治。在新设备验收和全面巡视（开箱）检查时，须要对二次线缆有无保护措施（例如直接压在支架等金属构件上的情况）进行重点验收和检查。

3 直流系统绝缘故障防范措施

通过以上分析，可考虑从以下几个方面制定提升措施，减少直流系统绝缘故障缺陷。

强化户外设备箱体密封、受潮情况排查整治：

(1) 结合天气情况，强化户外设备开箱检查工作，确认箱体密封及内部加热、除湿设备运行良好，科学分析进水受潮原因，及时上报、处理缺陷异常，重点关注运行 15 年以上的变电站；(2) 结合日常巡视，强化户外设备二次电缆进出箱体封堵、护管破损及引水孔设置以及电缆安装工艺情况检查；(3) 结合专项巡视、停电检修针对性开展户外设备特别是 GIS 设备闸刀机构箱密封情况检查，及时发现、处理密封不严问题，同时及时落实存量户外设备箱体密封不严问题整改工作；(4) 每年梅雨季节过后，变电站运维、协同专项开展一次户外箱体密封情况排查，形成问题清单，编制整治计划，确保下次梅雨季节前落实全部整改措施。

强化户外设备辅助节点防雨措施排查、整治：

(1) 强化户外敞开式接地闸刀辅助节点防护罩密封情况检查、治理，特别是运行年限 15 年以上的变电站设备，结合综合检修项目针对性更换户外机构箱密封条、封堵材料。(2) 强化户外变压器瓦斯、压力释放、油位及油温节点等密封及防雨措施检查、治理，确保防雨罩安装规范、防雨保护到位。(3) 调整电容器（电抗器、站用变）网门闭锁回路，对运

行工况较差的网门，可以取消合闸回路闭锁节点，加装防误机械锁实现闭锁。

强化直流系统各支路电缆绝缘试验，及时发现、整治绝缘问题。

做好直流系统电源设备的巡视维护，及时发现异常问题，确保可靠供电。重点开展经常性出现异常的老旧直流电源设备的巡视和维护，运行工况差的及时安排改造，确保直流电源系统状态良好。开展直流系统绝缘故障个性化问题专项整治。强化新技术、新设备探索研究。

4 结束语

直流系统绝缘故障对电网设备安全运行影响很大且检查消缺困难度高，一些绝缘故障处置甚至须要设备退出运行开展检查消缺，对电网正常运行影响较大。本文通过对直流系统绝缘故障事件的统计分析，总结了变电站发生直流系统绝缘故障的主要原因和主要故障点，其次通过对典型案例的分析提出相应的整治措施，以防相似故障再次发生，最后结合分析结果，针对性提出直流系统绝缘故障的防范措施，减少故障事件的发生，保障电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 黄煜炜. 电力系统用直流绝缘检测算法研究[D]. 合肥工业大学, 2021.
- [2] 周军, 吴瑜坤, 李书瀚. 主从式便携直流系统绝缘检测装置设计[J]. 电子器件, 2021, 44(03): 718-724.
- [3] 张振兴. 220 V 直流系统常见绝缘异常分析[J]. 集成电路应用, 2018, 35(12): 97-98.
- [4] 熊萍, 于雅丽. 变电站直流绝缘监测装置误报漏报接地支路原因分析[J]. 农村电气化, 2021, (12): 21-24.

作者简介

王耀升（1993—），男，工程师，硕士研究生，主要从事变电运检方面的研究。

殷军（1988—），男，技师、副高级工程师，主要从事智能运检技术方面的研究。

罗志远（1985—），男，高级工程师，主要从事智能运检技术方面的研究。

李锐锋（1994—），男，工程师，主要从事变电运检方面的研究。

郭晓（1993—），女，工程师，主要从事变电运检方面的研究。

赵旭阳（1994—），男，工程师，主要从事变电运检方面的研究。

（责任编辑：刘艳玲）

菏泽配网备用调度系统的建设

耿 晋, 林朋辉, 张炎萌, 邓 影

(国网山东省电力公司菏泽供电公司, 山东 菏泽 274000)

摘要: 根据菏泽配网的实际情况, 通过对菏泽配网备用调度系统建设的必要性和可行性分析, 提出了备用调度系统设计原则, 并阐述了主备调并行运行方式及变电站、光纤与无线终端接入配网备用系统方案, 对比其实现的优缺点, 为配网备用系统建设提供技术保障及支撑。

关键词: 配电自动化系统; 备调系统; 终端传输方案

中图分类号: TM764

Construction of Heze Distribution Network Reserve Dispatching System

GENG Jin, LIN Penghui, ZHANG Yanmeng, DENG Ying

(State Grid Shandong Electric Power Company Heze Electric Power Supply Company, Shandong Heze 274000, China)

Abstract: Based on the actual status of Heze distribution network and after analyzing the necessity and feasibility of the construction of Heze distribution network reserve dispatching system, this paper puts forward the design principle of reserve dispatching system was proposed, elaborates parallel operation mode of main and standby dispatching, the scheme of distribution automation terminal access to the distribution network reserve system, and then compares the advantages and disadvantages of its realization, providing technical guarantee and support for the construction of distribution network reserve system.

Keywords: distribution automation system; dispatching system; terminal transmission scheme

1 备用配调系统建设必要性

菏泽供电公司配电自动化系统肩负着菏泽地区八县三区的配电调度业务, 集配电网管理、调度、操作、监控于一体, 利用多种通信方式, 实现对配电网的监测与控制, 是提高配网网络运行水平、管理水平和降低损耗的一个重要手段^[1]。

目前配电自动化系统主站部署在市公司, 县公司仅配置远程工作站, 现阶段县公司配电自动化系统备用方式为临近两个县两两互备, 市公司配电自动化主站系统一旦出现问题, 全市配网调控业务均在瘫痪的风险。因此, 备用配调系统作为整个配电自动化系统的有效组成部分, 只有完成备用配调系统的建设, 才能形成完整的配电自动化系统体系, 满足电网运行控制和调度生产指挥连续性的需要。

2 建设目标

菏泽供电公司配调备用系统建设的目标是: 持续提高配网调控系统应急能力, 系统建设与制度建设相结合, 高标准建成“双核共存、独立调控”模

收稿日期: 2023-02-20

式配调体系。配调备用系统建设遵循主备同质化原则, 同步配置配调大厅、数据库、SCADA、前置、图模调试、标准化接口等服务器和工作站, 在主调场所因失火失电、公共卫生事件等原因失效后实现主备系统一键切换, 满足配网运行控制和调度生产指挥不间断的要求

3 选址分析

3.1 选址基本原则

备用调度其选址应充分考虑: 通信网络、环境条件、基础设施、运行维护、与主调的距离、地质、与相关调度合建的可能性等多种因素; 备用调度的建筑设施应简约实用、坚固牢靠; 系统选址与主调的距离尽可能远^[2]。

3.2 选址位置介绍

按照以上要求, 菏泽供电公司的配调备用建设选址在巨野县公司调度楼, 与地调备用在同一位置。

巨野县公司距离菏泽 60 km, 距离适中。新建生产楼, 环境条件、基础设施较好, 系统维护和运行保障条件较好。

机房运维环境良好。巨野县调配电自动化机房满足电源、空调、消防、动环、门禁、配电自动化运维场所需要，机房内尚有剩余机柜，满足备调建设需求，设备投资小、改造费用省。

具备与菏泽地调备调同建优势，办公、用餐、饮水、休息、保洁等后勤保障责任清晰，具备突发情况下能够快速联动转移至备调场所值班等优势。

4 建设方案

4.1 系统设计原则

正常主场所配电自动化系统运行时，主备调系统采用并行运行方式，通过主备调前置服务器进行实时交互方式，主备系统同时接收终端实时数据，主场所具备配电自动化系统所有功能，备调系统具备 FA 故障定位功能及人工遥控等功能。

主备调切换，主备调系统具备专门的切换界面进行人机交互，同时支持主场所配电自动化数据失电后自动切换数据自动切换至备调运行。

备场所配电自动化系统运行时，实时数据另一路通道即备调数据网传送至备场所配电自动化系统，同时支持将备调数据通过前置服务器同步至主调系统，备调系统具备数据采集处理及 FA 故障定位等功能。

备用配调系统包括服务器、工作站、交换机、横向隔离、路由器、纵向加密、天文钟、安全网关、加密机。备用配调系统通过调度数据网接收直采或转发变电站，通过接受站外光纤和无线终端；与主调配电自动化通过网络互连，实现图形、模型等单侧维护；配调备用系统运维与监视通过布置工作站实现运行值班。

4.2 关键技术分析

4.2.1 主备调并行运行方式

并行运行期间，主备系统均须保持同步同样的配置，主备调图模数据通过图模数据库交互，并接收同样的实时数据，主调系统切换后，主站作为在线备用的状态，备调的图模数据同步至主调系统。

方案一：主备调前置服务器交互。市县所有终端的实时数据通过市公司前置服务器双发至主备调 DAS 主站，达到主备调基于实时数据并行运行的目的。

方案二：主备调采集服务器交互。市县所有终

端的实时数据通过主备调系统采集服务器交互方式，经正反向隔离至主备调 DAS 主站。

主备调并行运行方案比对如表 1 所示。

表 1 主备调并行运行方案比对

主备调并行运行方式	建设阶段	维护阶段	综合评估
前置服务器交互	软件功能研发简单，易实现	备用系统无法实时监护安全接入区设备的运行状态	★★★
采集服务器交互	软件功能研发周期较长	备用系统可实时监护安全接入区设备的运行状态	★★★★

4.2.2 变电站传输数据接入方式

方案一：变电站直采 + 转发。

与配电自动化主调保持一致，直采变电站仍直采接入备调，转发变电站通过转发接入备调。

技术层面上，直采变电站远动机配置新网段地址与配电自动化主、备系统进行通信，转发变电站通过备调 D5000 系统实现对备调配电自动化系统业务数据的转发。通信方式上，直采变电站（223 座）通过调度数据网与配网备调传输，直采变电站数据先传输到 D5000 备调核心路由，再传输到配网备调纵向加密；转发变电站（10 座）数据从 D5000 备调系统前置交换机通过隔离装置实现数据的安全传输。后期维护上，在配电自动化主系统进行图模数据维护，采用离线导入或实时传输方式同步，确保主备系统数据一致。

改造投资说明：全市 223 座直采变电站站端远动装置须站端修改配置，实现与备调传输，站端纵向加密、路由配置须新增策略，备配侧新增纵向加密装置。

方案二：变电站全部转发。

技术层面上，全部变电站从 D5000 备调系统前置交换机通过隔离装置实现数据的安全传输。后期维护上，配电自动化主备系统变电站配置不同，存量设备须更改备调配置，增量设备须分别维护图模数据，确保主备系统数据一致。

改造投资说明：备调须新增 2 台转发服务器、主配网正反向隔离设备，须开发变电站同时向备调、备用配调系统数据同时转发策略功能。

主备调并行运行方案比对如表 2 所示。

表2 主备调并行运行方案比对

变电站传输技术方案	建设阶段	维护阶段	综合评估
变电站直采+备调D5000转发	投资较多, 施工周期长	主系统的数据维护, 采用离线导入或实时传输方式同步, 确保主备系统数据一致	★★★
D5000备调全部转发	投资最少, 节约人力, 易实现	主备系统分别维护存量图模数据	★★★★★

4.2.3 光纤终端传输

方案一：对光纤传输终端，联合互联网部增加一路光纤通路到备调系统，在需要时切换至备用通路，使终端信号传输至新建备系统处。

方案二：在光纤终端配置2个IP地址，分别与配电自动化主、备系统进行通信^[3]。

改造投资说明：光纤配电终端须配置2个IP，分别与配电自动化主、备系统进行通信，全市共861台光纤终端，每个终端均须现场新配IP，且建设周期较长。

光纤终端传输方案比对如表3所示。

表3 光纤终端传输方案比对

光纤终端传输技术方案	建设阶段	维护阶段	综合评估
新增光纤通路至备调系统	节约人力、财力成本, 易实现	备用系统无法实时监护终端运行情况, 切换有个过程	★★★★★
光纤终端双发改造	投资较多, 全部终端均须现场更改配置, 施工周期长	备用系统可实时监护终端运行情况	★★★

4.2.4 无线终端传输

方案一：对无线传输终端，联合联通公司新建一路专网至备调机房，在需要时切换至备用通路，使无线终端信号传输至新建备系统处。

方案二：无线传输配电终端须配置2个无线采集地址，分别与配电自动化主、备系统进行通信。

改造投资说明：无线传输配电终端须配置2个无线采集地址，分别与配电自动化主、备系统进行通信，全市共6332台无线终端，每个终端均须更改配置且部分终端无法支持双发功能，建设周期较长。

无线终端传输方案比对如表4所示。

综上所述系统采集环节技术方案如表5所示。

表4 无线终端传输方案比对

无线终端传输技术方案	建设阶段	维护阶段	综合评估
新建联通专网至备调机房	投资较少, 施工周期较短	无线终端备用通道处于热备用, 无法同时监测	★★★★★
无线终端双发改造	投资较多, 每个终端均须更改配置, 施工周期长	备用系统可实时监护终端运行情况	★★★

表5 配电自动化备调关键环节技术方案选定

各环节技术方案	建设阶段	维护阶段
主备调前置服务器交互	软件功能研发简单, 易实现	备用系统无法实时监护安全接入区设备的运行状态
D5000备调全部转发	投资最少, 节约人力, 易实现	存量图模主备系统分别维护
新增光纤通路至备调系统	节约人力、财力成本, 易实现	备用系统无法实时监护终端运行情况, 切换有个过程
新建联通专网至备调机房	投资较少, 施工周期较短	无线终端备用通道处于热备用, 无法同时监测

5 结束语

菏泽供电公司配网备调系统的建成及投运，能与主网备调系统有效配合，持续提高了配网调度自动化系统应急能力以及异地容灾能力，为电网安全运行提供坚实的支撑^[4]。

参考文献

- [1] 孟骁. 配电自动化技术应用与运行管理分析[J]. 中国设备工程, 2022,(511): 69-71.
- [2] 高道春, 何金定, 邵其专, 等. 备用调度建设运行管理方案[J]. 云南电力技术, 2016,44(06): 18-20.
- [3] 范英, 杨仁利. 配网备用调度系统配电自动化终端接入模式技术研究[J]. 电子测试, 2022,36(20): 104-106.
- [4] 梁彩玲, 董巧玲, 张德峰. 浅谈洛阳地县级备用调度系统的建设和应用[J]. 中国管理信息化, 2016,19(20): 59.

作者简介

耿晋(1991—), 女, 工程师, 从事配网调度及自动化方面研究工作。

林朋辉(1995—), 男, 工程师, 从事配电自动化技术方面研究工作。

张炎萌(1996—), 男, 工程师, 从事配电自动化技术方面研究工作。

邓影(1992—), 女, 工程师, 从事配电自动化技术方面研究工作。

(责任编辑: 张峰亮)

人工智能技术在电网调度中的应用研究

宋倩¹, 蓝俊欢², 罗富贵¹, 李明珍¹

(1. 河池学院大数据与计算机学院, 广西 河池 54630; 2. 广西电网有限责任公司
河池供电局, 广西 河池 546300)

摘要: 随着我国双碳目标的确立, 新型电力系统建设如火如荼地开展, 以及大数据技术、人工智能、物联网的应用范围扩展, 人工智能在电网调度运行控制中的角色也越发重要, 对其进行研究探讨, 可对欠发达地区电网调度业务提供参考和借鉴, 以提高电网调度工作的智能化水平。文章对人工智能在电网调度中负荷预测、故障辨识和智能人机交互等应用进行了探讨。人工智能对于电网调度智能化既是机遇也是挑战, 调度运行人员应积极学习以应变求变。

关键词: 人工智能; 电网调度; 深度学习; 知识图谱; 人机交互技术

中图分类号: TM764

Research on the Application of Artificial Intelligence Technology in Power Grid Dispatching

SONG Qian¹, LAN Junhuan², LUO Fugui¹, LI Mingzhen¹

(1. Big Data and Computer College of Hechi University, Guangxi Hechi 546300, China; 2. Hechi Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Guangxi Hechi 546300, China)

Abstract: With the establishment of China's dual-carbon target, the construction of new power systems is in full swing, as well as the expansion of the application scope of big data technology, artificial intelligence, and the Internet of Things, and the importance of the role of artificial intelligence in power grid dispatching and operation control are becoming more and more prominent. The applications of artificial intelligence in load prediction, fault identification and intelligent human-computer interaction in power grid dispatch are discussed. Artificial intelligence for the intelligent dispatching of power grids is both an opportunity and a challenge, and dispatching operators should actively learn to adapt to changes.

Keywords: artificial intelligence; grid dispatching; deep learning; knowledge graph; human-computer interaction technology

新一代人工智能, 相较几十年前的人工智能已是云壤之别。其更新进步是因具备了3个新条件^[1-2]。超强的计算能力, 在处理器飞速发展的今天, 算力已不是制约因素; 海量的数据产生和存储变得容易, 人工智能所需训练样本量不再捉襟见肘; 深度学习和机器学习等保障了优秀的算法和学习模型^[3]。三者在新的阶段重新推动了人工智能的新发展进步。

作为地区电网的组织指挥指导协调中心, 电网调度机构承担着电网的安全稳定运行重要职责, 不仅汇聚了大量的电网实时信息、潮流数据、监控异

基金项目: 2022年广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY0606); 2021年广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY0620、2021KY0615)。
收稿日期: 2023-03-06

常信号, 日常工作还须依据复杂烦琐的调度规程和操作规程, 还依赖于调度员对地区电网运行、故障异常情况等的处置经验^[4]。在新一代人工智能快速发展的背景下, 当前电网调度存在主要依赖于调控人工判断经验, 存在操作任务多且调控人员精力不足的限制^[5], 如日常的解并列解合环操作、线路停送电操作是典型的重复脑力过程, 其智能化和自动化程度有待提高, 人工智能为日常调控业务效率的提高、解放调度人员劳动力提供了一个新观点。

当前双碳背景下新型电力系统呈现出来的一些新特点, 如当前分布式能源、新能源的快速发展, 大大增加了电网运行的不确定性、非线性^[6]。机器学习擅长汇聚历史数据, 对电力系统整体进行把握,

进而进行聚类分析。当前地区用电负荷不确定性增大,加上阶梯电价的调节,用户的用电行为更难预测,对用户负荷进行预测也是当前研究的一个热点^[7]。深度学习和机器学习算法对电网负荷的预测和评估建立在庞大的数据之上,将对电网负荷的实时平衡和电量市场交易提供有益参考。

人工智能如知识图谱技术,对调度规程、调度人员经验知识的学习和模仿,将很大程度上将调度员从固定的常规重复式劳动中解放出来^[8]。其之所以能在调度领域应用,在于日常调度工作中调度操作票填写模式方法较为固定、有章可循、安全校核遵守一定规则,线路停送电、强送试送、检修方式下运行方式的安排都在一定的框架和程序下执行,核心是调度规程和调度操作规定,此外如事故处理也有通常遵循的处理优先级,调度日常工作的上述特点为知识图谱等人工智能技术的应用创造了条件。

在人工智能如火如荼应用于社会领域的方方面面趋势下,电网调度领域也不得不加紧与人工智能结合,提高调度工作效率和加大对高效转型的研究和创新^[9]。在调度系统应用软件算法上,既要立足传统物理数学模型,遵循从电磁感应定律到派克变换、潮流算法等,还要建立数据驱动的负荷预测、新能源消纳电网规划以及风险辨识等,同时要严格依托调度业务流程,在人工智能既能充分保障电网安全稳定运行、人身和设备安全的前提下,又能充分发挥其有力的驱动和变革作用。以下通过人工智能在电网调度的最新发展和应用,并结合西南某地区电网中人工智能应用的探索,探索双碳背景下未来调度业务可发展的方向。

1 总体设计

1.1 设计思路

3大技术的飞速发展支撑和促成了新一代人工智能技术的发展。具体来看,科学技术部还提出优先发展的10个人工智能示范应用场景,如图1所示,包括智能工厂、自动驾驶和智能供应链等。数据存储技术的更新换代,使以往难以存储的大量数据得以实现,各种存储技术的发展和大数据中心的建设,为机器学习、深度学习提供了巨量数据样本,为学习和模拟训练的准确度和精度的提升保障来源^[10]。

中央处理器等硬件技术的发展,在当前国际国内形势下芯片行业的激烈竞争更是助推了硬件技术特别是数字集成电路的发展,使人工智能处理数据的速度和能力有了保障。

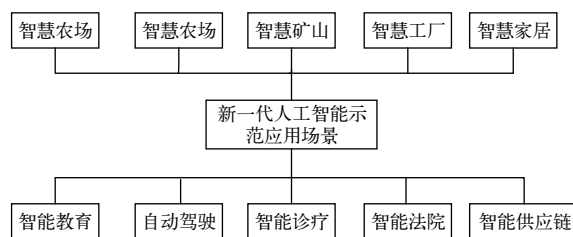


图1 新一代人工智能示范应用场景

电网调度领域应用人工智能,首先要收集并存储大量的电网运行相关数据,包括但不限于区域电网当前运行方式、系统接线图、地理接线图、主变容量、发电机装机容量、输电线路径、杆塔坐标,电网潮流、调度日志、应急处置方案、保供电方案、气象条件等,上述都是训练学习的必要数据^[11]。此类非结构化文本类数据,也是机器学习和深度学习所需学习和模拟的对象。有了数据之后,以CPU为基础架构的计算处理能力保障学习的效率。利用人工智能开展电网运行的分析和辅助处置决策,须结合实际选取适宜的人工智能算法和适用的场景和事件^[8]。

智能调度系统总体框架如图2所示,可分为实时运行系统和智能学习系统,实时运行系统为智能学习系统提供大量电网运行实时数据和信息,智能

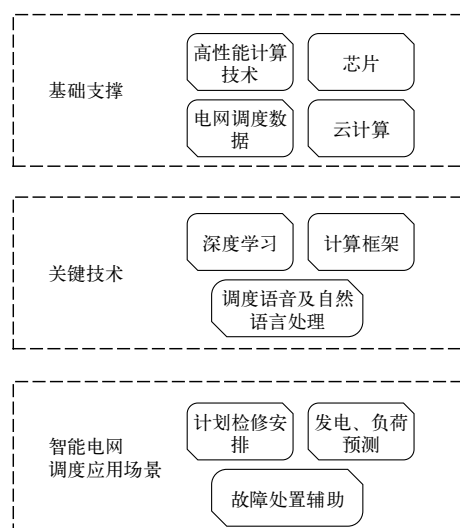


图2 电网调度领域人工智能应用框架

学习系统负责基于数据和规程文本的学习和模拟，为电网实时调度提供参考和辅助^[12]。智能调度学习系统综合运用机器学习、深度学习、知识图谱深度神经网络，学习和训练的样本既有电网海量数据，又有调度规程和调度日志、调度员经验和预案等文本，模仿调度员的思维行为，为电网的稳定运行、电压频率调整、跳闸等异常故障处置、负荷预测等决策判断提供一定参考和支撑。

1.2 总体设计

高性能计算架构（HPC），包括计算、存储、网络等设备，个人和组织使用的设备收集了大量数据，这使人工智能成为技术颠覆的核心。各种企业和组织包括电网调度机构对人工智能的使用正在增加，这推动了对高性能机器的需求。对 HPC 的关注在很大程度上是因为须为人工智能工作负载计算大量数据。人工智能和 HPC 之间的联系是共生的，因为 HPC 为人工智能工作负载提供动力，但人工智能可以识别 HPC 数据中心的改进^[13]。例如，人工智能可以优化加热和冷却系统，降低电力成本并提高效率。AI 系统还可以监控服务器、存储和网络设备的健康状况，检查系统是否保持正确配置，并预测设备何时会出现故障。

数据汇集层，汇集海量的电网调度数据，潮流、继电保护动作信息、故障录波，以及外部自然环境信息，包括气象信息，如雨雪冰冻、雷电、台风、山火等。数据汇聚不仅仅是数据采集，更重要的是构建数据汇聚任务的配置、管理、监控、调度等服务。旨在为电网的调度决策提供数据支撑和访问服务。

算法驱动层为电网调度应用提供算法支撑，是通过知识图谱、深度神经网络、图像识别等算法，并利用自然语言处理技术对调度规程、调度日志等文本进行学习，形成文本规则库^[14]。

智能电网调度业务层是在计算、数据、算法三者基础之上构筑起来的，主要包括电网运行感知和辅助决策等。在传统物理数学建模基础上，结合数据驱动，提供发电预测、负荷预测、新能源并网预测，以海量数据和人工智能算法为依托，进行学习训练分析，由于数据的海量、跨越周期长，算法效率得以提升，智能化高，能为电网调度提供更准确的预测，预测可能重过载的线路或主变，提前预知

和告警^[15]。辅助决策包括辅助检修管理、故障处置、断面监视、电压频率监视和调整、线路强送试送等，以及语音交互、面容识别、图形开票等。

2 关键技术

2.1 高性能计算技术

深度神经网络等人工智能技术得以被重新提起和认识，发展为新一代人工智能，高性能计算技术（HPC）的发展是一个主要因素。我国在 2021—2025 年的十四五规划中提出：达到拥有 10 个国家数据库云服务器超级计算中心的目标。此外，深度学习等人工智能技术都须巨大的算力，全球范围内训练 AI 程序所需算力以每 3~4 个月翻一番的速度快速增长，因此对高性能计算的需求也不断加大。电网调度控制系统每秒都将产生海量的数据，计算规模庞大。为了适应各种调度业务场景、各种算法的需要，须结合 CPU、GPU、网络、存储、服务器等资源。形成的智能调度系统架构既要提高效率，又要兼顾成本。

2.2 调度大数据技术

随着数字电网建设的加快，数据量也随着快速增多。调度大数据平台将分散的数据信息汇集、清洗、建立联系，为调度业务提供学习模拟样本，以提升算法学习效率和效果。

调度数据内容涵盖电网运行信息，潮流分布、调度日志、气象信息、继电保护信息、故障录波、设备状态和信息，厂站设备、线路地理坐标信息等。以上都是广域的时空数据。在对数据进行存储汇集清洗等处理过程中，须关注各数据间的联系。一是不同来源系统数据的关联可以采取引用、外键等方式，因为其数据都是整个电网调度数据整体的一部分，须进行有机联系。二是不同数据库的使用需要根据不同数据结构具体分析，如数学物理模型用关系型数据库存储，调度规程和日志、保供电预案等用分布式文件系统存储，进行分门别类。对外提供统一数据服务。针对数据汇集，设计不同的数据抽取和汇集方式，将大数据通过 Sqoop 等方式与传统 Java 数据库连接（JDBC）、消息队列（MQ）、web 服务等数据接入方式结合，完成电网调度数据全量抽取，配合检验提取工具完成数据的清洗规范化。

2.3 基于深度学习的电网预测和辨识技术

目前人工智能与电网调度结合的一个研究热点，是借助于电网调度海量的大数据，依靠机器学习和深度学习等人工智能算法，通过对样本的训练和学习，对未来电网运行情况进行发电预测和负荷预测，故障风险提前辨识、断面预控等。目前电网负荷预测以超短期预测为主，有机器学习和深度学习2种主流方法，相较前者，深度学习具有更强的特征自提取能力，研究侧重于网络结构、模型参数和不同的模型组合等^[15]，常用的预测算法有LSTM、CNN、GRU等。负荷预测更多受社会环境因素主要是人的行为影响，发电预测则受自然环境条件的影响，如光照、风力风向、降水、气温等，其预测更多是基于相似日预测，常需要历史发电数据和气象数据作为参考和输入。

故障辨识和诊断是利用监视告警窗和自动化主接线图以及故障录波等系统采集故障或异常信息，辨别出故障设备和类型。人工判断和辨识过多依赖于调度员的经验，在电网规模不断扩大、运行方式日益复杂化的形势下，传统方法的不足日益凸显，且电网运行数据、故障录波等数据为多源异构数据，传统方法辨识的难度增加，而深度学习有特征自主提取与学习的优势，并将所学有机融入建模的过程，避免了人工提取的不足，其应用范围更广。

2.4 知识图谱智能辅助决策技术

当电力系统发生故障后，调度人员须快速定位故障位置和原因，及时派遣人员，甚至须反复查阅大量的调度日志和历史资料，如故障处置要点、故障案例等文件，使得传统故障应急处置工作的效率较低。

针对上述电网故障处理应用场景中的问题，推出电力故障模式知识图谱^[16]，一个典型的电网故障处置知识图谱如图3所示。知识借助自然语言处理、深度学习、图计算等技术，将其可视化。借助知识图谱的智能问答检索、故障归因分析等功能，在电网故障发生时，更高效地辅助调度员进行故障处置。电网故障知识图谱可以构建电网系统故障模式、故障原因、故障处理措施等信息之间全方位的关联^[17]。

电网故障知识图谱支持细颗粒度解析失效关联

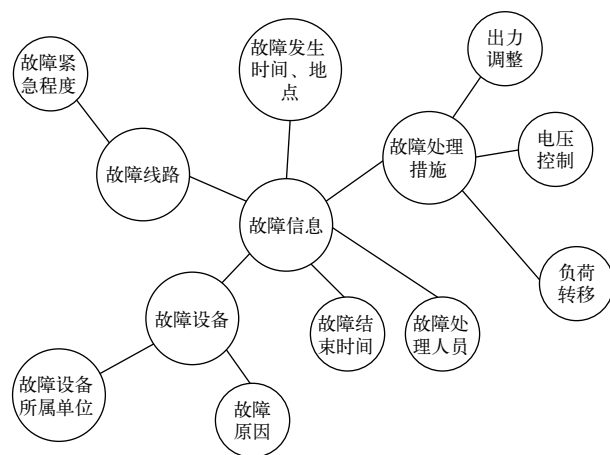


图3 电网故障处置知识图谱

的失效案例FA、失效树FTA和FMEA，智能理解失效现象、抽取失效要素并定位到深层故障原因，通过探索图谱发现可能引起该现象的失效模式、该失效的改善措施、分析实验等。

除了故障诊断，故障后的调度处置也是影响整个故障解决效率的重要环节。调度任务须分析故障后电网的状态、参数变化情况，全面考虑调度规程、安全规程等工作规定，结合故障预案、历史故障记录，然后制定相应的故障处置措施，协调各部门做出快速准确的应对措施和工作部署，整个过程依赖于调度员的工作经验和专业知识。电网故障知识图谱详细记录了各类故障的事故特征，当事故发生后根据事故后电网运行方式的变化情况，对知识图谱进行检索和推理，实现知识驱动型的辅助决策^[18]，借助知识图谱处理事故中的部分非关键环节，减少事故处理期间对调度员的干扰，使调度员能够将精力集中于事故处理中，以便制定更加优化的调度决策。如制定符合规定的故障处理流程，根据历史资料推荐有相应经验的专家解决故障等。

此外，电网故障知识图谱支持基于时间维度的数据更新，通过开放的API接口在知识图谱进行更新完善，确保知识图谱提供更为精确、全面、动态化的决策辅助支持。

2.5 调度人机交互技术

相较互联网和智能手机领域，电网调度领域人机交互技术仍旧未广泛使用和开展，仅通过简单的鼠标键盘与调度运行系统发生联系，对调度员的日常工作帮助甚微。未来电网调控领域应主动借鉴互

联网和智能手机行业的人机交互技术，逐步提高日常调度业务的智能化水平以及调度自动化系统的友好度、人性化程度。

运用调度人机技术较好的有广州供电局，其经验可供借鉴。广州调控中心先行探索人机协同、多域适配、智能高效的“数字管家助手”，助力实现电网调度业务“以机代人”的“轻办公”。以电网异常事件为驱动，实现电网异常-设备-班组-通信录的关联辨识，自动语音电话通知急修班，指挥急修人员进行“开工—就位—巡视—汇报—收工”等全流程故障自主查线，现阶段平均每月减少约500通电话，为调配联动、故障处置、用户复电等提供“广州效率”。以2021年为例，广州配网调度运行操作全年累计超过29万项，平均每次挂牌置位耗时1 min，全年预计可节省工时约4833 h。下一步，进一步夯实人工智能与配网调度深度耦合的建设成果，助力数字南网建设和新型电力系统构建。

3 结束语

电力系统的安全稳定运行是国家能源安全的重要支撑，电网调度控制是保证电网安全稳定运行的关键，随着电网规模的扩大和调度复杂性的提升，传统电网调控面临改革提升，有必要深度结合人工智能技术，应用于电力负荷预测、电网大数据、故障诊断、知识图谱智能辅助决策、调度人机交互等领域，以提升电力调度智能决策水平，助力新型电力系统建设。

参考文献

- [1] ZHU L P, HILL D J, LU C. Hierarchical deep learning machine for power system online transient stability prediction[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020,35(3): 2399–2411.
- [2] DENG Z M, LU Z L, GUO Z F, et al. Coordinated optimization of generation and compensation to enhance short-term voltage security of power systems using accelerated multi-objective reinforcement learning[J]. *IEEE Access*, 2020,8: 34770–34778.
- [3] 余琼芳, 路文浩, 杨艺. 基于深度长短时记忆网络的多支路串联故障电弧检测方法[J]. *计算机应用*, 2021,41(S1): 321–326.
- [4] WANG C, YU H, CHAI L, et al. Emergency load shedding strategy for microgrids based on dueling deep q-learning[J]. *IEEE Access*, 2021,9: 19707–19715.
- [5] HUANG Shuai, HE Haibo. Online Scheduling of a Residential Microgrid via Monte-Carlo Tree Search and a Learned Model[J].

- IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021,12(2): 1073–1087.
- [6] WANG T J, TANG Y. Comprehensive evaluation of power flow and adjustment method to restore solvability based on GCRNN and DDQN[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021,133: 107160.
- [7] QIN Z, LIU D, HUA H, et al. Privacy preserving load control of residential microgrid via deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021,12(5): 4079–4089.
- [8] KHOOBAN M, GHEISARNEJAD M. A novel deep reinforcement learning controller based type-II fuzzy system: Frequency regulation in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2020,5(4): 689–699.
- [9] YANG Q L, WANG Gang, SADEGHI A, et al. Two-timescale voltage control in distribution grids using deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020,11(3): 2313–2323.
- [10] MEMARZADEH G, KEYNIA F. Short-term electricity load and price forecasting by a new optimal LSTM–NN based prediction algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2021,192: 106995.
- [11] ZHAO J, LI F, MUKHERJEE S, et al. Deep Reinforcement Learning based Model-free On-line Dynamic Multi-Microgrid Formation to Enhance Resilience[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022.
- [12] 李琦, 乔颖, 张宇精. 配电网持续无功优化的深度强化学习方法[J]. *电网技术*, 2020,44(04): 1473–1480.
- [13] DU Y, WU D. Deep Reinforcement Learning from Demonstrations to Assist Service Restoration in Islanded Microgrids[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022.
- [14] YANG T, ZHAO L, LI W, et al. Dynamic energy dispatch strategy for integrated energy system based on improved deep reinforcement learning[J]. *Energy*, 2021,235: 121377.
- [15] LI J W, ZHANG X S, LI F S, et al. Efficient experience replay based deep deterministic policy gradient for AGC dispatch in integrated energy system[J]. *Applied Energy*, 2021,285: 116386.
- [16] 彭刘阳, 孙元章, 徐箭, 等. 基于深度强化学习的自适应不确定性经济调度[J]. *电力系统自动化*, 2020,44(9): 33–42.
- [17] 张吉祥, 张祥森, 武长旭, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. *计算机工程*, 2022,48(03): 23–37.
- [18] 蒲天骄, 谈元鹏, 彭国政, 等. 电力领域知识图谱的构建与应用[J]. *电网技术*, 2021,45(06): 2080–2091.

作者简介

宋倩 (1995—), 女, 硕士, 主要研究方向为深度强化学习。

蓝俊欢 (1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为电网调度自动化。

罗富贵 (1984—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为数字图像处理、模式识别。

李明珍 (1986—), 女, 博士生, 讲师, 主要研究方向为信息安全、模式识别。

(责任编辑:张峰亮)

基于集成 YOLOv5 算法的输电线路杆塔目标检测

苏 晓, 张明晖, 陈峻宇, 丁 争, 许华栋, 白万崧

(国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司, 江苏 无锡 214000)

摘要: 杆塔是输电线路中的重要组成设施, 其安全直接影响电网电力输送的安全稳定。根据遥感影像中杆塔小目标识别精度低等问题, 研究基于 YOLOv5s 和 YOLOv5x 算法进行集成建模, 并加入加权框融合 (weighted boxes fusion, WBF) 推理机制, 借助高分辨率遥感杆塔影像数据集进行模型训练测试, 并对数据集做测试时增强 (test-time augmentation, TTA)。实验结果显示: 与单模型识别结果相比较, 集成 YOLOv5 模型识别精确度、召回率、mAP@.5 显著提升, 分别达到 0.952、0.944、0.929; 并且在一些复杂背景、不同光照环境和不同天气条件下模型都具有良好的识别效果, 具有较强的鲁棒性。

关键词: 目标检测; 遥感; 输电线路杆塔; YOLOv5

中图分类号: TM75; TP391.41

Target Detection of Transmission Line Towers Based on Integrated YOLOv5 Algorithm

SU Xiao, ZHANG Minghui, CHEN Junyu, DING Zheng, XU Huadong, BAI Wansong

(Wuxi Power Supply Branch of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214000, China)

Abstract: Transmission tower is an important component of transmission line, and its safety directly affects the safety and stability of power transmission. According to the low accuracy of small target identification of transmission tower in remote sensing images, in this study, integrated modeling was conducted based on YOLOv5s and YOLOv5x algorithms, weighted boxes fusion (WBF) reasoning mechanism was added, model training was conducted with high-resolution remote sensing tower image data set, and performed a test-time augmentation of the data set. The experimental results showed that compared with the single model recognition results, the recognition accuracy, recall rate and mAP@.5 of integrated YOLOv5 model are significantly improved, reaching 0.952, 0.944 and 0.929 respectively. In addition, under some complex background, different illumination environment and different weather conditions, the model proposed in this paper has good recognition effect and strong robustness.

Keywords: target detection; remote sensing; transmission line towers; YOLOv5

随着社会的快速发展, 国内输电网络建设不断加快, 为城镇乡村群众的生产、生活等活动带来巨大便利。输电线路的安全保证着整个电网的正常供电, 而杆塔是电力工程中的基础设施, 也是电网安全持续供电的基础。由于杆塔周围自然和人为环境的不断变化, 一些杆塔还分布于地势较高且无人的区域, 输电线路运维工作人员开展巡视工作十分困难。通过遥感进行输电线路运维可以减轻巡检作业人员的工作负担, 提升运维效率。由于输电线路杆塔分布呈现点多、面小、布设复杂等特点, 所以对杆塔精确高效的识别是遥感输电线路运维的基础。

基金项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目“基于空间数据与人工智能的输电线路通道运维关键技术及应用研究”(J2021169)。

收稿日期: 2022-12-21

随着计算机视觉技术的高速发展, 利用深度卷积神经网络的目标检测方法对高分辨率遥感影像中的地物进行检测成为当今的热点研究方法之一。文献 [1] 获取高分三号影像数据构建杆塔数据集, 利用卷积神经网络分类算法进行训练和测试, 可以精准识别复杂背景中的微小目标。文献 [2] 结合 YOLOv2 和 VGG 算法对 SAR 图像的杆塔目标进行识别。文献 [3] 基于深度卷积网络 Faster RCNN 级联目标检测方法对无人机影像中的杆塔螺栓缺失进行识别。文献 [4] 利用深度学习迁移网络对光学遥感影像中的高压输电杆塔进行检测识别研究。文献 [5] 利用电力塔遥感数据, 通过改进 Faster RCNN 进行预测, 并使用迁移学习对网络进行快速训练, 得到了较高的识别精度。

由于遥感影像中的杆塔特征尺度小，背景复杂，传统的图像识别方法难以对其特征进行很好的学习。目前深度学习目标检测算法根据检测策略分为双级检测和单级检测，双级检测方法以 R-CNN 系列算法^[6-8]为主要代表，单级检测方法以 YOLO 系列^[9-12]为主要代表。考虑到输电杆塔影像的成像特性以及不同深度学习目标检测方法优缺点，本研究通过卫星遥感影像数据，利用 YOLOv5 系列网络模型具备的优势，进行集成建模，并进行数据优化，实现对输电线路杆塔的精确定位。

1 YOLOv5 算法原理

YOLOv5 算法作为当前 YOLO 系列提出检测速度最快、检测精度最高和最轻量级的单阶段实时目标检测算法，其在继承 YOLOv4 算法优势的同时，也进行了一定的改进。YOLOv5 对主干网络进行了优化，修改了正样本匹配机制，使得模型的收敛更加快速。杆塔作为遥感影像上的小目标，YOLOv5 的改进适用于其检测任务。YOLOv5 系列算法包括

了 YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5l、YOLOv5x 4 种，4 个模型的基础结构是一致的，YOLOv5s 网络深度最小且特征图宽度最小，其他 3 个网络都是以 YOLOv5s 为基础拓宽、加深。故以 YOLOv5s 模型为例，其结构由输入端 Input、网络主干 Backbone、颈部 Neck 以及输出端 Head 4 部分组成，如图 1 所示。

样本数据输入端中采取了 3 步处理流程：图像归一化、Mosaic 数据增强、自适应锚框计算。由于样本数据中的图像长宽可能并不一致，所以须要图像归一化来将原始图像缩放到统一尺寸，分别经过计算缩放比例、缩放后尺寸、黑边填充值，最后输入网络训练。Mosaic 对样本随机裁剪后缩放、拼接，提供更多样本特征，提高模型的训练效率。自适应锚框计算就是在训练时自动计算不同训练集中的最佳锚框值，不同于 YOLOv3 和 YOLOv4，YOLOv5 可以跨层预测，即使有些预测框在多个层中都是正样本，最多可以匹配 3~9 个。利用 K-means 算法^[13,14]对训练样本数据聚类分析，得到影像中杆塔的 9 个

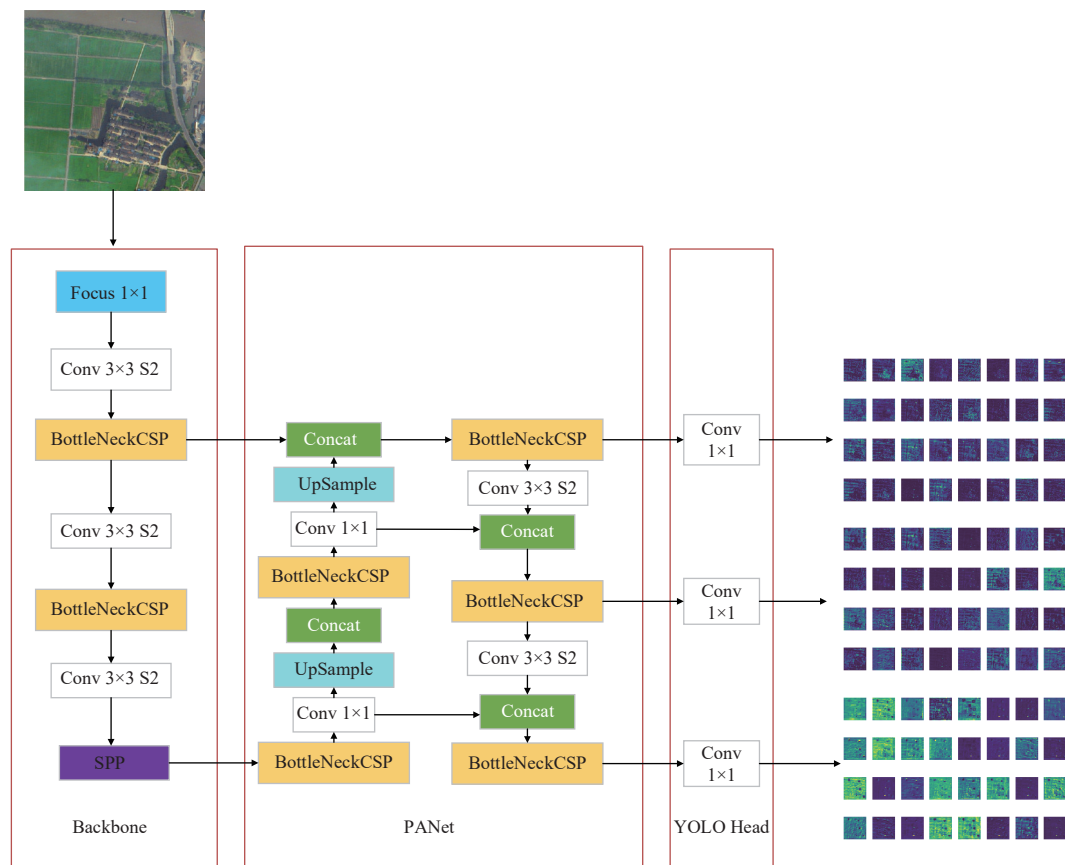


图 1 YOLOv5s 网络结构图

锚框以及最佳宽高比，每个特征图对应3个锚框，根据锚框大小排序，大尺度的特征图使用小的锚框，这样可以更好地提取图像的特征信息。

Backbone 模块主要由 Focus 切片结构、CSP 结构和金字塔池化结构 (spatial pyramid pooling, SPP)^[15] 组成。Focus 结构通过切片操作，将原始输入影像的通道扩充，在信息不丢失的情况下提高算力。CSP 包括两种结构 CSP1_X 和 CSP2_X，CSP1_X 应用于 Backbone，CSP2_X 则是应用于 Neck。

Neck 模块借鉴了语义分割领域的 PANet 结构^[16]，由特征金字塔 (feature pyramid network, FPN) 和路径聚合结构 (path aggregation network, PAN) 组成，并使用了另外一种 CSP2_X 的结构，加强了网络特征融合的能力。FPN^[17] 通过传递高层语义特征，提升了金字塔的语义信息特征，但是定位信息并没有加入。PAN 是在 FPN 后增加了一个自下向上的金字塔，补充了低层的强定位特征，通过特征融合得到了大、中、小 3 个尺度的特征图，实现对目标的预测。

输出层 Head 模块在训练阶段与 YOLOv4 一样采用了 CIoU_Loss^[18]，推理阶段采用了加权 nms 的方式。

2 基于 YOLOv5 算法的集成模型

2.1 模型集成

在目标检测任务中，当任务实时性不是很强时，通过集成多个模型来预测可以得到更好地结果。集成建模是通过使用几种不同的建模算法或使用不同的训练数据集，创建多个不同的模型来预测结果的过程，其流程图如图 2 所示。集成模型聚合每个基本模型的预测，并对未见数据进行一次最终预测。集成模型能达到较好结果的前提是基分类器之间须要保持相对独立性并且每个基

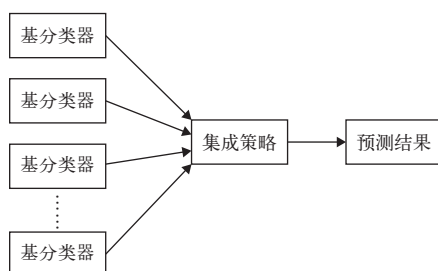


图 2 集成建模流程图

分类器都应该有合理的精度。基分类器可通过实例、特征、算法的划分来构造，本文中选择了 YOLOv5 系列算法作为基分类器，其中 YOLOv5s 网络最小，检测速度最快，但是 AP 精度在 4 个模型中最低的，若是检测大目标，识别效果还是相对较好的，而 YOLOv5x 网络参数多识别慢，但是检测效果最好，通过结合 2 种模型的优势，以提升输电线路电塔识别的准确度。

集成策略中最简单也是最有效地方法就是装袋法 (Bagging)，以并行式进行集成学习，将多个基分类器同时训练，分别进行预测，最后所有的基分类器按照模型检测任务是分类还是回归以投票或均值的方式得到集成的预测结果。本研究对于基分类器的构建借鉴了 Bagging 的思想，通过对训练样本按 50% 比例有放回的抽样，抽出 5 个样本子集分别通过 YOLOv5s 和 YOLOv5x 两种算法进行训练，即构建 10 个基分类器，最后利用投票法进行决策。

2.2 加权框融合

在模型预测阶段，通常将会使用非极大抑制 (non-maximum, NMS) 来筛选预测框，但是 NMS 只在单模型预测时效果相对较好，简单的筛选预测框。而加权框融合 (weighted boxes fusion, WBF) 是对多模型预测出的多个预测框来处理产生新的平均框，这样最终得到的结果会更加贴近真实框。在预测结果产生多个预测框时，WBF 首先将每个预测框置信度得分和坐标分为一组，并进行归一化处理，使数据分布在 [0,1] 之间，再按照置信度得分的高低排序将每个框归一化后的信息放入一个数组中，最后处理时也是从得分最高的开始每次取出一个进行加权融合。在融合前还须要判断两个预测框是否预测的同一目标，这时可以计算交并比 (intersection over union, IOU) 来判断，当 IOU 判断正确后就可以进行预测框加权融合。假设此时有两个非常接近的预测框进行融合，在数组中两个预测框的形式便是 boxA: $[A_{x_1}, A_{y_1}, A_{x_2}, A_{y_2}, A_s]$ ，boxB: $[B_{x_1}, B_{y_1}, B_{x_2}, B_{y_2}, B_s]$ ，其中， (x_1, y_1) 代表该预测框左上角的坐标，而 (x_2, y_2) 代表该预测框右下角的坐标， s 代表该预测框的置信度得分。根据如下公式融合得到 boxC。

$$C_{x_1} = \frac{A_{x_1} \times A_s + B_{x_1} \times B_s}{A_s + B_s} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{A_s + B_s}{2} \quad (2)$$

仅做给预测框单个坐标 C_{x_i} 和置信度 C_s 的计算方式，其他坐标同理。可以看出，公式是根据预测框的置信度得分作为权值，将两个预测框进行融合，置信度越大的预测框权值更大，最终融合的预测框也与其较为接近。若是多个预测框融合，在公式中继续加入即可。

2.3 测试时增强技术

一般来说数据增强是通过对图像数据做平移、翻转、旋转等操作对整个样本集进行扩充，提高机器学习模型性能和准确性。在集成模型中还可利用测试时增强 (test-time augmentation, TTA) 对测试数据进行增强，获得多份增强后的样本与原图组成一个数据组，然后用这些样本获取预测结果，最后把多份的预测结果按一定方法合成得到最后的预测结果再进行精度指标计算，并且这种多份预测结果的情况可以利用到 WBF。本模型自定义了数据多尺度缩放、对比度受限的自适应直方图均衡、随机亮度、图像翻转等增强手段对预测图执行 TTA 优化。

3 基于 YOLOv5 算法的集成模型

3.1 实验平台

本实验采用 Ubuntu18.04 操作系统、Intel Xeon E5-2698 v4 @ 2.20 GHz 处理器、TITAN RTX 显卡、CUDA10.2、CUDNN8.0，选用 Python 编程语言和 PyTorch 深度学习框架。

3.2 数据预处理

本文获取 2020 年无锡市输电线路区域 2 m 分辨率高分一号卫星影像。影像标注是基于 ArcGIS 平台实现，标注规则通过目视杆塔的形态进行正矩形框标注。

将遥感影像和标注的矢量文件裁剪为 1024×1024 像素大小，影像格式为 tif；标签文件为归一化后的目标框的中心点横坐标、中心点纵坐标、目标宽、目标高，格式为 txt。裁剪后的每张图像至少包含 1 个杆塔目标，影像包括不同光照下并且背景具有森林、草地、裸地、农田、河流、道路、建筑等。

样本数据在输入网络训练前须要进行数据增强，分别对样本图像做色彩调整、翻转、旋转、Mosaic

等数据增强操作，扩增训练样本数据量，减小网络过拟合以及图像背景对识别目标准确度的影响。图 3 为 Mosaic 数据增强效果示意图。



图 3 杆塔目标 Mosaic 处理示意图 (左原图, 右处理图)

3.3 模型训练策略

获取无锡市 (惠山区 309 个样本, 江阴区 869 个样本, 吴新区 235 个样本, 宜兴区 2249 个样本) 总计 3750 个样本数据集按照 8 : 2 的规则划分为训练集和测试集进行模型训练与测试。

神经网络训练初始化设置参数包括: 训练步数为 200 个 epochs、batch_size 批量大小为 8、img_size 大小为 512、选用 SGD 优化器; 采用 WarmUp+余弦退火衰减策略, 初始学习率为 0.1, 热身步骤为 10 个 epochs, 动量和重量衰减分别设置为 0.937 和 0.0005。

3.4 精度评价

对于训练完后的检测模型, 须要通过一些评价指标来衡量模型的好坏, 主要从检测精度和检测速度这两个角度进行评估。本研究中具体使用到的评价指标有: 精确率 (Precision)、召回率 (Recall)、平均精确率 (mean average precision, MAP)、F1 值 (F1-score)。在计算指标时须要利用混淆矩阵中的一些参数, 其中 TP 为正类别预测正确的个数, FP 负类别预测正确的个数, FN 为正类别预测为负类别的个数。

Precision 和 Recall 是从不同维度来看对正例的预测效果, Precision 是从主观层面来看正例被正确分类的效果, 也就是实际上预测到真正例的比例。

3.5 实验结果分析

3.5.1 模型训练结果

对训练数据按 8 : 2 的比例分为训练集和验证集, 再输入网络进行训练, 模型训练和验证时损失函数的变化及收敛情况如图 4 所示。

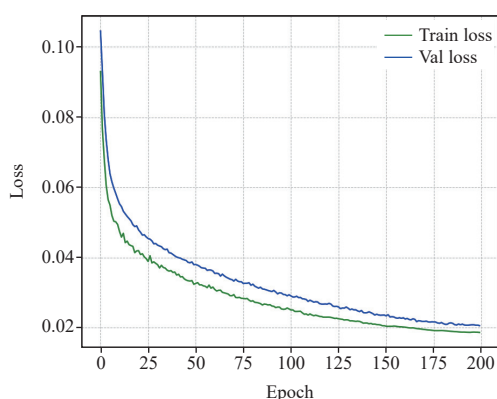


图4 Loss函数变化曲线

由图4可以看出在模型的训练效果较好，模型可以较好的收敛，训练结束时训练集和验证集损失最终分别达到了0.0186和0.0206。在训练到15轮次附近可以看到损失值震荡相对严重，但总体趋势还是在收敛的方向，此时可能是由于模型预热结束后学习率调整较大导致的，并且后续训练时整体曲线相对平稳，在150轮次时模型收敛完成，在此之后损失值没有过大变化。在验证集损失曲线上可以看到整体较为平滑，并且最终接近训练损失，说明网络学习情况很好，可以很好的学习数据中的特征。

图5中展示了模型训练时其他指数的变化情况，分别是精确率、召回率、mAP@.5、mAP@.5:.95。

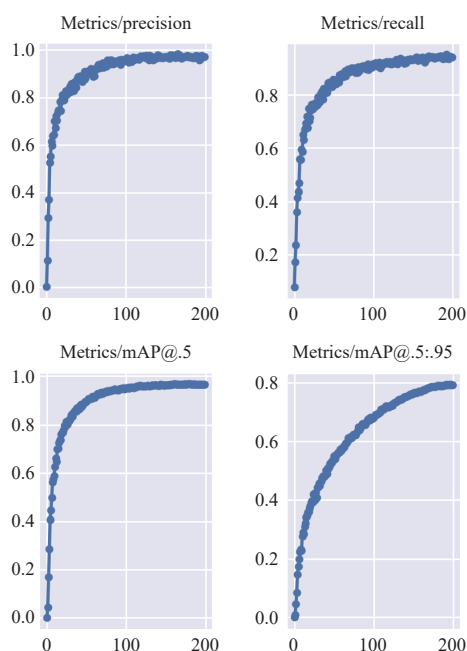


图5 其他指标变化曲线

可以看出模型训练精确率和召回率在训练过程中持续上升，上升过程中均有小幅震荡，但在150轮次时曲线几近平稳，说明模型训练情况较好，最终训练完成时模型精确率和召回率分别达到了0.966和0.952。mAP@.5、mAP@.5:.95分别表示所有类别预测锚框的IOU阈值达到0.5的mAP值和从阈值0.5到0.95的平均mAP值，可以看出mAP@.5的提升很快且平滑，没有过多震荡，而且最终结果也很好，达到了0.957，而mAP@.5:.95在训练时呈持续上升的状态，可以看到在150轮次之后其上升趋势减缓，并在训练结束前有平稳的态势，继续训练对其影响并不是很大，说明模型预测的结果总体分布相对较好，模型达到较好的收敛状态。

3.5.2 不同环境条件下模型识别结果

本文从测试集中选择不同地区、不同背景、不同光照、不同天气条件下的图像用于模型性能测试。图6为不同天气情况下的识别结果，图7为不同背景条件下的目标检测结果，图8为不同光照强度下的识别结果。图中显示“tower 0.95”表示目标为杆塔，置信度为95%。从结果中可以看出基于集成YOLOv5的输电线路杆塔目标检测方法，对于不同背景、不同光照、不同天气等条件下都可以准确识别目标，具有较强的鲁棒性。

集成模型减少了对图像背景内容的依赖，提升了对图片色彩、亮度变化的适应能力，对图像的适应性和目标识别的准确性有了保证，在恶劣天气下也可以对目标准确识别，并且能够识别不同背景下的目标，实验结果还表明此模型能够识别不同光照强度下拍摄的目标图片，并且可以看出对于图像中显示较小的杆塔目标也都可以识别到。但可以看出在有雾、背景复杂、弱光的图像中，目标识别的置



图6 在不同天气下杆塔目标检测结果示例



图 7 在不同背景下杆塔目标检测结果示例

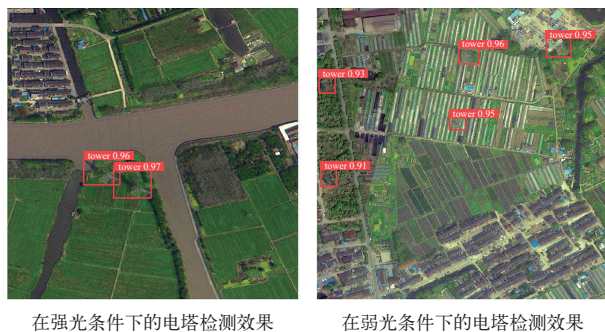


图 8 在不同光照下杆塔目标检测结果示例

信度明显低于图像质量较好的识别结果，图像的质量对目标识别的结果影响较大，但使用文中的模型还是可以识别出目标，并有较好的置信度。

3.5.3 算法对比结果

本研究通过对比单模型、集成模型以及加入 WBF 后的模型进行对比，验证模型集成效果，设置对比算法分别为 YOLOv5s、YOLOv5x、YOLOv5s 和 YOLOv5x 集成、YOLOv5s 和 YOLOv5x 集成+WBF，对比结果如表 1 所示。由表 1 可知，集成模型的检测效果是要明显优于单模型的，模型识别精确率、召回率、mAP@.5 和 mAP@.5:.95 分别达到了 0.941、0.928 和 0.902，并且加入 WBF 后，模型识别精度也有一定提升，精确率提升 0.011，召回率提升 0.016，mAP 提升较大达到 0.027 和 0.032，故

表 1 算法对比结果

算法	Precision	Recall	mAP@.5	mAP@.5:.95
YOLOv5s	0.886	0.859	0.865	0.715
YOLOv5x	0.927	0.905	0.883	0.827
YOLOv5s和 YOLOv5x集成	0.941	0.928	0.902	0.875
YOLOv5s和 YOLOv5x集成+WBF	0.952	0.944	0.929	0.907

集成 YOLOv5 模型可以较好的完成输电线路杆塔识别任务。

4 结束语

本文利用了无锡地区的高精度遥感影像建立输电线路杆塔数据集，通过 YOLOv5s 和 YOLOv5x 算法集成并加入 WBF 进行输电线路杆塔识别任务，并在测试集推理前使用 TTF 进行增强，改善了在大分辨率图像中小目标难识别的现象，提升小目标识别精度，解决漏检等问题。相较于单模型目标检测算法也有一定提升。在不同背景、光照和天气条件下都具有良好的识别效果，具有较强的鲁棒性。但可以看出在图像因云、雨模糊或光照较差时，目标识别的置信度普遍较低，可以在图像预处理时加入去云去雨算法或一些提升图像质量的算法，使后续模型训练时可以更好地提取目标的特征信息，提升识别精度。本文研究为电网系统维护提供了新的思路，能够大幅减少人力消耗，为能够快速定位输电线路杆塔目标做出参考，具有较高应用价值。

参考文献

- [1] SUN Zhengsheng, LIU Peng, YU Tao, et al. Electricity Pylon Detection and Classification for GF-3 Imagery Using Deep Convolutional Neural Networks[J]. Remote Sensing information, 2019,34(5): 10-97.
- [2] TIAN G, MENG S, BAI X, et al. Electric Tower Target Identification Based on High-resolution SAR Image and Deep Learning[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2020,1453: 12117.
- [3] XU Min, LUO Jin, LIU Hua. Detection of Missing Pylon Bolts Based on Faster R-CNN Cascade[J]. Guangdong Electric Power, 2021,34(06): 65-71.
- [4] 俞利健. 基于深度迁移学习的光学图像输电塔检测识别算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [5] ZHENG Xin, PAN Bin, ZHANG Jian. Power tower detection in remote sensing imagery based on deformable network and transfer

- learning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(08): 1042-1050.
- [6] GIRSHICK R. Fast r-cnn[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2015: 1440-1448.
- [7] REN S, HE K, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [8] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017.
- [9] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. Computer Vision & Pattern Recognition[C], 2016.
- [10] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition[C], 2017.
- [11] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: An Incremental Improvement[J]. arXiv e-prints, 2018.
- [12] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection[J]. arXiv preprint arXiv:2004.10934, 2020.
- [13] QU C, ZUO Z, CAO L, et al. Comprehensive dissection of transcript and metabolite shifts during seed germination and post-germination stages in poplar[J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1).
- [14] YUAN Y, ZHANG B, TANG X, et al. Comparative Transcriptome Analysis of Different Dendrobium Species Reveals Active Ingredients-Related Genes and Pathways[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(3).
- [15] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2015, 37(9): 1904-1916.
- [16] LI H, XIONG P, AN J, et al. Pyramid attention network for semantic segmentation[J]. arXiv preprint arXiv:1805.10180, 2018.
- [17] LIN T Y, DOLLAR P, GIRSHICK R, et al. Feature Pyramid Networks for Object Detection. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)[C], 2017.
- [18] ZHENG Z, WANG P, LIU W, et al. Distance-IoU Loss: Faster and Better Learning for Bounding Box Regression[J]. arXiv, 2019.

作者简介

苏晓(1987—),男,工程师,主要从事工作为智能运维、输电线路运检等。

张明晖(1991—)男,工程师,主要从事工作为输电线路运检。

陈峻宇(1986—),男,高级工程师,主要从事工作为输电线路运检。

丁争(1994—),男,助理工程师,主要从事工作为输电线路运检等。

许华栋(1995—),男,助理工程师,主要从事工作为输电线路运检等。

白万崧(1984—),男,副高级工程师,主要从事工作为输电线路运检。

(责任编辑:张峰亮)

资讯

江苏南京公司:杆线入地为过江隧道施工“让路”

2023年4月3日清晨,在江苏南京惠民大道上,昔日的高压杆线不见了踪影,空中显得格外清爽。这得益于国网南京供电公司220kV下中、下晓线迁移入地工程圆满竣工,8条高压杆线由空中“藏身”地下,保障了南京惠民大道综合改造工程的顺利推进。

惠民大道综合改造工程是南京建宁西路过江通道的江南连接线之一,于2020年开始实施,计划于2025年建成通车。此次杆线迁移入地,为惠民大道主线隧道施工腾出了空间,也改善了沿江片区环境风貌,提升了南京西环网的供电可靠性。

杆线迁移工程涉及的220kV下中、下晓线,承担着南京鼓楼、玄武、栖霞等主城核心区域的供电任务,是南京城北地区的重要输电通道。按照计划,需要拆除该线路220kV下关变电站到阅江楼段的8基电力杆塔、2km架空线路,新建2km双回电力电缆及1基220kV终端塔。该段线路沿途经过3条交通要道以及滨江商务区、学校、居民区、文物保护区等地带,更增加了施工风险和难度。

为尽可能减少施工对道路交通、居民生活的影响,国网南京供电公司优化施工计划,利用清晨、午间及周末等非出行高峰时段安排施工。在工程最后停电切改阶段,该公司提前完成负荷转移,确保不影响居民用电,并采用线路搭接方式,降低电网风险。3月24—30日,在经过3次线路搭接,连续7天不间断立塔、架线、制作电缆终端等工序后,最终在居民无感知情况下完成了杆线迁移。

施工中,国网南京供电公司还注重周边环境友好。由于新立的1基终端塔临近阅江楼前的卢龙河,处于河流和干道之间,建设场地仅100m²左右。该公司创新设计了窄基化终端塔,将杆塔上的旋转爬梯、检修平台、电缆终端、避雷器等设备集中布局,创下了南京市区内新建220kV终端杆塔最小占地面积的纪录。

信息来源:国网江苏省电力有限公司

人工智能视角下电力施工 AR 智能识别系统设计研究

朱亦振, 姜林波, 龚精业

(金华八达集团有限公司监理分公司, 浙江 金华 321000)

摘要: 电力施工现场需要极为严格的安全管控以降低误操作率, 减少安全事故。研究从人工智能和AR技术出发, 构建了一种专门应用于电力施工现场监控的智能识别系统。该系统以卷积神经网络算法为基础, 实现了对电力施工现场人员、设备等实时监控, 可以满足不同班组、不同岗位人员在同一大场景下的配合作业, 在很大程度上提高了人员处理突发事件和团队协作能力, 为电力安全施工提供了保障。

关键词: 人工智能; 电力施工; AR技术; 智能识别; 安全作业

中图分类号: TM764

Design and Research of AR Intelligent Identification System for Electric Power Construction from the Perspective of Artificial Intelligence

ZHU Yizhen, JIANG Linbo, GONG Jingye

(Jinhua Bada Group Co., Ltd., supervision branch, Zhejiang Jinhua 321000, China)

Abstract: The electric power construction site requires extremely strict safety control to reduce safety accidents caused by misoperation. Based on artificial intelligence and AR technology, this paper constructs an intelligent identification system which is specially applied to power construction site monitoring. Based on convolution neural network algorithm, the system realizes real-time monitoring of personnel and equipment at the power construction site. It can meet the cooperation of different teams and different positions in the same scene. To a large extent, it has improved the ability of power employees to deal with emergencies and team cooperation, and provided sufficient guarantee for the safe construction of power.

Keywords: artificial intelligence; power construction; AR technology; intelligent identification; safe operation

AR技术是一种实时计算摄影机影像的位置及角度并加上相应图像的技术, 可通过海量数据计算、多元情景跟踪及虚拟透视展示形成在线模拟, 实现真实互动^[1]。利用AR技术不仅可以实现电力施工现场资源的高效识别和科学应用, 还有助于电力施工现场中不同班组、不同岗位间的配合作业, 增强电力施工人员处理突发事件和团队协作的能力, 大大降低作业成本, 值得深入研究和拓展。

1 需求分析

电力施工作业较为复杂、工作量大, 对施工操作、协同作业等提出了更高的要求, 主要体现有如下几点:

科学操作。电力施工作业环节涉及多种工器具,

基金项目: 国网浙江省金华八达集团有限公司监理分公司科技项目资助, 项目编号: BD2022JH-JLXM005。

收稿日期: 2023-01-03; **修回日期:** 2023-03-02

尤其是在安全工器具、高压工器具等使用过程中, 一般具有配套标准化流程。因个人能力、技术水平等影响, 施工人员无法快速查找相应资料, 须要花费长时间进行文字学习, 缺乏实践容易出现操作失误, 给电力施工埋下了安全风险和质量隐患^[2]。研究旨在提供一种新兴工业场景AR智能识别技术与AI相结合, 通过移动端设备摄像头对工业场景中的工器具进行AR智能识别, 识别后快速高效地从后台调取对应工器具名称、种类、简介、实景图片与教学影音等相关资源, 并直观地展现在用户面前, 进行快速认知, 达到在工业场景中能够快速有效核对与学习的目的。

高效协同。电力施工作业环节涉及多个班组、不同岗位, 需要人员协同配合进行平台施工、架线敷设、设备安装等。受环境因素、技术因素的影响, 很容易出现监管不及时、配合不到位造成的进度问

题、隐蔽缺陷^[3]。本研究依托 AR 识别技术,满足不同班组人员分时协同配合,提高电力员工处理突发事件和团队协作的能力,为施工安全提供充分保障。尤其是物联网、算法、人工智能等优化时,使 AR 智能识别系统实时识别和预警,弥补一般人工监控过程中的监管乱象。

2 电力施工 AR 智能识别系统设计

2.1 系统设计

本次设计 AR 智能识别系统主要由服务端和客户端 2 部分组成,可实现区域标定、对象识别、环境交互及数据管理,在获取真实场景信息并对真实场景和相机位置信息进行分析后生成虚拟景物,合并视频或直接显示^[4]。

首先根据相机的位置信息和真实场景中的定位标记来计算虚拟物体坐标到相机视平面的仿射变换,然后按照仿射变换矩阵在视平面上绘制虚拟物体,最后直接通过与真实场景的视频合并后,一起显示在屏幕上。

服务端。可进行模型训练,通过 CNN 对数据集进行对应的训练,建立相关模型,再使用模型对相对应物品进行分类识别。同时,还可实现识别图片的样例上传管理、模型训练,为客户端提供图片、文字、语音、视频等数据的存储与上传管理。

服务端采用基于视觉的跟踪注册技术,从真实环境中获取 1 幅或者多幅图像,然后标定摄像机与

目标间的相对位置和方向,与真实环境进行匹配^[5]。为保证获得最佳匹配,本次设计的 AR 智能识别利用图像处理和计算机视觉的方法协助注册,且使得测量局限在图像空间范围内。

客户端。通过 AR 智能识别辅助配合服务器在线模型识别技术,进行工具分类识别。根据识别的结果反馈,进行文字、图片、视频、语音等资料的介绍和展示。上述 AR 展示方式是手持视频显示以及头戴视频显示,这种显示方式原理为设备通过外置的摄像头获取真实世界的信息,并根据机器视觉等技术同时叠加虚拟信息,使得用户通过配置在用户眼前的平板看到的真实世界和虚拟叠加信息。

2.2 功能模块

2.2.1 识别模块

识别功能模块是电力施工 AR 智能识别系统中的核心功能,设计时采用视觉跟踪标定技术,将三维空间位置与它们在图像平面中的坐标注册,从而掌握三维空间点的特征,形成平面标志物体的识别基准,如图 1 所示。

上述系统经采集装置、视图设备等将图片采集到平台中,经物联网、5G 网络等传输,经过应用集群进行轮廓识别以后,根据识别结果自动分析图像,与数据库中轮廓特性一一对比,分析该元素是否属于监管范围内的元素。若是,则对监管对象定位,识别其所处位置及使用情况。若不是,则略过该设备重新进行视频数据采集。同时 AR 智能识别系统

ID	名称	种类名称	简要描述	描述	图片	视频	添加时间	操作
320	SecondaryCable	二次电缆	二次电缆	二次电缆		上传视频	2023-02-07 15:21:17	修改 删除
319	VacuumPump	移动式真空泵	移动式真空泵	移动式真空泵		上传视频	2023-02-07 15:20:45	修改 删除
318	StreetlightCrane	路灯吊车	路灯吊车	路灯吊车		上传视频	2023-02-07 14:42:31	修改 删除
317	WalkingBoard	走板	走板	走板		上传视频	2023-02-07 14:39:49	修改 删除
316	HydraulicPress	液压机	液压机	液压机		上传视频	2023-02-07 14:39:34	修改 删除
315	SuspensionClamp	悬垂线夹	悬垂线夹	悬垂线夹		上传视频	2023-02-07 14:39:20	修改 删除
314	Shackle	卸扣	卸扣	卸扣		上传视频	2023-02-07 14:39:09	修改 删除
313	CoatingDetector	涂层检测仪	涂层检测仪	涂层检测仪		上传视频	2023-02-07 14:38:58	修改 删除
312	Lifter	提升器	提升器	提升器		上传视频	2023-02-07 14:38:47	修改 删除
311	Level	水准仪	水准仪	水准仪		上传视频	2023-02-07 14:38:27	修改 删除
310	DoubleHook	双钩	双钩	双钩		上传视频	2023-02-07 14:38:15	修改 删除

图 1 电力施工 AR 智能识别系统识图管理

应用 Canny 边缘检测算法，结合 findcontours 函数实现对现场人员、设备等元素的智能识别^[5]。

上述识别过程中，边缘检测主要涉及 3 个参数：输入图像、层次类型和轮廓逼近，其关键操作包括：

(1) 按照二值化输出显示，将彩色图像转换为灰度图像并进行高斯模糊，利用像素梯度、图像梯度，计算出图像边缘幅值角度，得到初步边缘识别结果。

(2) 按照可靠度要求进行非最大信号压制处理，将灰度图像边缘细化，同时双阈值边缘连接处理，使用滞后阈值方法保留高于梯度幅值的像素，输出边缘识别结果。

2.2.2 定位模块

在对电力施工中的关键项进行定位前，须对电力施工现场的各主体赋予唯一的定位标签，通过定位基站、子站及 AR 建模服务器等对视频中的元素进行定位。这一举措可弥补一般 AR 眼镜在对视频中某元素进行定位时存在延迟或定位不够精准等问题，是一种理想的定位功能补充模块，如图 2 所示。

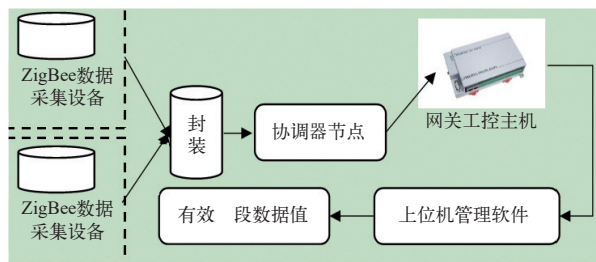


图 2 电力施工 AR 智能定位拓扑图

数据由传感器到最终获得有效字段数据值须经历 ZigBee 数据采集设备、封装帧、协调器串口加密、网关工控主机以及上位机管理软件等环节，上位机会在一定规则下完成数据子字符串的截取。一般截取过程中以设备所处纵横坐标为有效字段，配合 GPRS 信息形成字段与位置信息的匹配，系统在获取有效字段后可根据关联信息进行图像定位。

2.2.3 管理模块

管理员功能模块是电力施工 AR 智能识别系统最关键的模块之一，其包括视频、图片、ID 及描述 4 种权限。其中，视频、图片、ID 分别指的是 AR 智能识别系统中的识别视频、图片及现场工作人员/设备绑定的传感器 ID 等；描述指的是 AR 智能识别环节所有电力施工现场的设备、人员、工艺等的简要描述、具体描述。

权限管理。按照电力施工管理工作内容进行权限划分，使人员依照权限等级访问所需设备，调取相关识图信息或进行识图管理。

文件管理。通过历史数据在线存储，对生成的图表进行保存，在可视化显示中直接借用历史数据功能调出可视化图像，实现快速对比，为识图比对提供全面数据支撑。

识图管理。可显示图像 ID、名称、种类、简要描述等，展示电力施工中设备、工具及物料状态，确定电力施工中是否存在违规行为或安全隐患。在识图过程中可直接上传拍摄视频，如监理视频、施工放线视频、安全带视频、SF₆ 气体检验标准化作业等，将其作为施工管理的重要参考依据。

3 电力施工 AR 智能识别系统应用评估

3.1 应用分析

本次设计的电力施工 AR 智能识别系统支持识图上传、修改和删除，可在识图管理主界面中直接进行操作，将图像信息存储到后台文件库中，实现三维数据采集和模型数据训练。并配合拍照识别，进行特征点比对，在本地相册和远程相册中快速分类识别，得到关键设备信息，如图 3 所示。

上述 AR 智能平台在电力施工监管中应用场景广泛，优势显著。如操作时对须要识别的工具进行多角度的图片拍摄，作为数据源进行模型训练，满足电力施工的真实场景需求；进行大量工具分类识别图数据上传，并在后台进行数据模型训练，将训练好的数据模型部署到服务器的识别数据池中，提升了样本检索数据的广度和精度，使结果更加准确有效；根据用户使用习惯，打开程序后即可自动调用摄像头进行拍照上传，操作便捷，增强了用户使用舒适度；服务端进行数据分析、检测、比对、完成图片分类和识别后，将数据结果反馈到 App，App 对对应的资料检索和展示，减少人工检索时间，增强电力施工学习效益和监管效果。

3.2 效益评估

安全效益。基于人工智能的电力施工 AR 智能识别系统能够有效提升电力施工现场的监管与沟通效率，其能够以可视化视频、语音及虚拟操作等方式对施工现场工作人员进行沟通、工作指导等，具有较好的实用价值。尤其是在可视化展示过程中，

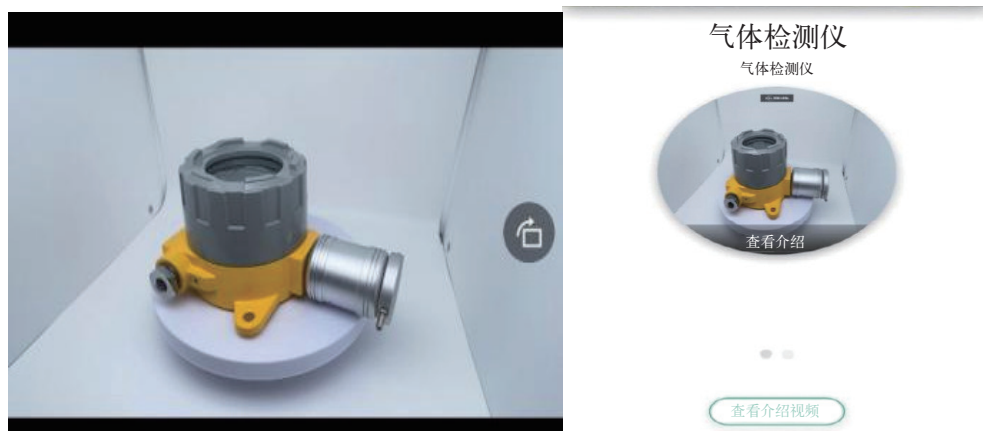


图3 电力施工 AR 智能识别效果

可实时发现漏检、错检问题，降低安全风险发生的可能性。同时，该系统采用 ZigBee + 5G 搭建物联网通信体系，可在多模态 AI 目标识别引擎的帮助下，适应更为复杂的电力施工现场场景，帮助施工监管人员开展更为精准的现场监控。

经济效益。AR 智能识别系统解放了电力施工现场监管、巡检人员的双手，监管人员无须携带大量的设备即可实现施工现场监管和故障维修，实现电力施工现场的智能化、自动化监管。电力施工 AR 智能识别系统开通了专家经验捕获复用功能，可通过头戴式设备，记录技术人员每个关键的技术操作步骤，将原本在大脑中的知识沉淀为企业的专属数字资产，通过字段搜索、智能匹配等方式调取记录，指导培训和工作，降低企业人力成本投入。

3.3 技术优化

提升电力施工现场单人智能化水平。目前使用的 AR 识别设备记录仪很难实时监测，经常因距离对象太近，难以录制完整要素或难以长时间在手上托举录制或识别，须优化硬件提升辨识能力，进行数据增强。

实现预测性维护。未来电力施工 AR 智能识别系统的预测性维护系统须全面整理历史数据，采集故障点前后时间线信息，分析异常情况，并输出辅助解决方案，形成发现问题解决问题并预测问题的数据闭环。

引入 AR 智能防呆系统。AR 智能防呆系统可通过骨骼特征检测摄像头扫描员工工作流程步骤，对比后台标准工作步骤，查找员工异常操作动作并告警，提示员工检查工作流程，优化现有生产线和生产工艺，进一步提升电力施工现场监管效率和精

准度。

4 结束语

AR 智能识别系统可在空间定位技术、数据处理技术、特征匹配算法等基础上实现业务流程的数字化管控，通过虚拟物与虚拟物之间、虚拟物与现实物之间、现实物与现实物之间的空间位置绑定、标记，将电力施工中的关键信息展示在服务端，提供虚拟增强活动服务。尤其是在电力监理工作中，支持模型训练、资源云平台动态存储、智能学习和模糊检索，从根本上改善电力施工作业的安全性、可靠性和时效性，实用效果显著。

参考文献

- [1] 宋俊慷, 黄秀梅, 杨秀增. 物联网开放平台在智慧农业监测系统中的应用[J]. *农村经济与科技*, 2020, 31(18): 89-91.
- [2] 刘万元, 黄连清, 黄方连, 等. 基于OneNET物联网开放平台的智慧农业监测系统设计[J]. *农业科技与信息*, 2021, (5): 82-85.
- [3] 刘子俊, 简学之, 时伯年, 等. 基于增强现实技术的智能变电站设备运维仿真[J]. *南方电网技术*, 2019, 13(11): 69-75.
- [4] 刘思, 傅旭华, 叶承晋, 等. 考虑地域差异的配电网空间负荷聚类及一体化预测方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(3): 70-75.
- [5] 闫丽梅, 王艺婷, 徐建军, 等. 基于蜂群算法的配电网负荷分配优化方法[J]. *化工自动化及仪表*, 2018, 45(7): 555-559.

作者简介

朱亦振 (1988—), 男, 高级工程师, 主要工作方向: 输变电工程建设监理和输电线路运维检修管理。

姜林波 (1989—), 男, 工程师, 主要工作方向: 输变电工程建设监理。

龚精业 (1988—), 男, 工程师, 主要工作方向: 输变电工程建设监理。

(责任编辑: 袁航)

基于在线用电监测仪的台区线损分段分析

蔡 潇¹, 李 明², 潘义云¹, 袁秋香¹, 陆永灿²

(1. 泰州三新供电服务有限公司兴化分公司, 江苏 兴化 225700; 2. 国网江苏省电力有限公司兴化市供电分公司, 江苏 兴化 225700)

摘要: 用电信息采集系统虽然能通过供电量及售电量等数据计算出台区线损率, 但对于台区各层级电气设备及各支路的用电情况, 无法做到更深度的感知, 线损精细化管理缺乏必要的工具和手段, 而“跑冒滴漏”在运行台区中占有很大比重, 应采取相应措施降低台区损耗, 进一步提质增效。利用固定式或移动式线损监测工具, 可对低压台区内线损异常分支进行监测, 获取异常分支区段线损数据, 通过采取精细化降损措施, 实现线损异常台区精准化治理。

关键词: 用采系统; 台区线损; 精细化管理; 移动式线损监测

中图分类号: TM714

Analysis of Line Loss Segmentation in Substation Area Based on Online Electricity Monitoring Instrument

CAI Xiao¹, LI Ming², PAN Yiyun¹, YUAN Qiuxiang¹, LU Yongcan²

(1. Taizhou Sanxin Power Supply Service Co., Ltd. Xinghua Branch, Jiangsu Xinghua 225700, China; 2. Jiangsu Xinghua Power Supply Branch of State Grid, Jiangsu Xinghua 225700, China)

Abstract: Although the electricity consumption information collection system can calculate the line loss rate of the substation area through power supply and sales data, it cannot achieve a deeper perception of the electricity consumption of electrical equipment and branches at all levels in the substation area. The refined control of line loss lacks necessary tools and means. The "running, emitting, dripping, and leaking" in the operating station area accounts for a large proportion. Taking corresponding measures to reduce substation losses can further improve the quality and efficiency of the power grid. By using fixed or mobile line loss monitoring tools, abnormal branches of line loss in low-voltage substation areas can be monitored. Obtain abnormal branch section line loss data. By implementing refined management and loss reduction measures for line loss, we aim to achieve precise management of abnormal line loss areas.

Keywords: procurement system; line loss in the substation area; refined control; mobile line loss monitoring

台区线损率是基于用电信息采集系统供电量、售电量同步采集的基础上, 通过系统在线监测自动统计计算^[1]。台区线损异常通常是指某供电台区线损率超出台区线损考核值范围, 其类型主要包含台区高损、台区负损、非经济运行以及台区线损不可算。

针对所辖用户较多且分支复杂的台区, 如出现用户用电异常, 加之窃电手段一般较为隐蔽, 无法迅速确定造成台区线损异常的原因, 采取传统的用电检查人员现场逐户排查用电异常的方式, 耗时、耗力且效率低下。基于上述背景, 本文提出一种快速定位台区高损区段的监测工具, 不论固定监测还是移动监测, 都可实现对线损的分支、分段分析和

实时计算。通过线损精细化管理可以自动筛选出线损异常的区段, 排查出计量异常、窃电、漏电等问题, 实现台区线损管控透明化、精准化。

1 主要技术路线

开发一种台区线损在线监测工具, 在线路侧安装物联监测设备, 每 15 min 定期采集该区段用电负荷曲线, 根据负荷曲线中正向有功电能与反向有功电能计算 24 h 区间用电量, 在主站(手机 App)上显示。按照用采系统电量冻结规则进行该区段下用户冻结电量采集, 由工作人员人工与物联监测单元采集电量进行比对, 实现线损异常区段精准定位^[2-5]。在线用电监测仪异常分析原理如图 1 所示。

收稿日期: 2023-02-26; 修回日期: 2023-03-28

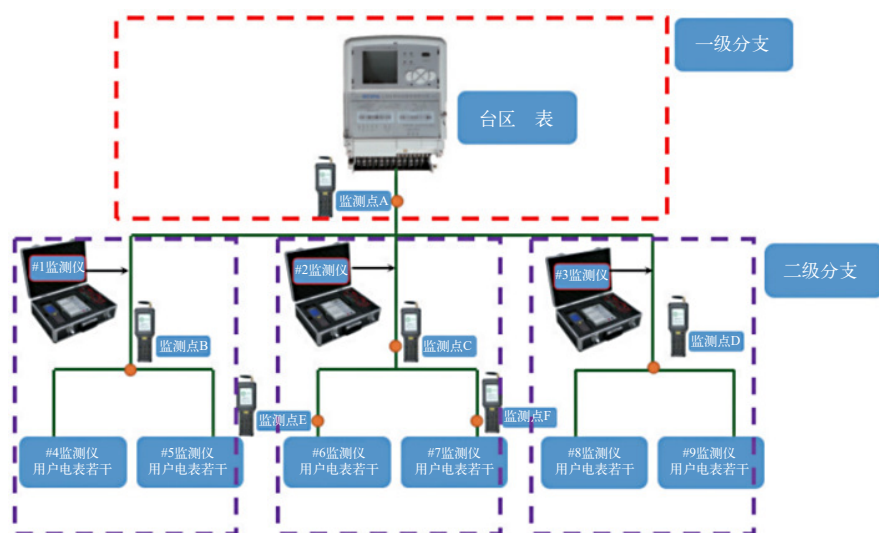


图1 在线用电监测仪异常分析原理图

低压在线用电监测终端（以下简称“监测仪”）采用一种可以直接接入 0.4 kV 配电网的可拆装结构设计，方便用户在不停电的情况下，在任意监测点移动用电监测仪^[6]。满足在户外可移动式的前提下、自然外界条件不确定因素下的使用需求。

监测仪采用模数转换技术，通过采集线路三相电流、电压，计算出有功/无功功率、有功/无功电能和需量等数据，满足营销线损专业使用。该监测仪具备数据远传能力，采集数据可以通过 GPRS 通信通道实时传送到主站，可在主站上结合计量表计的数据，分析某一监测点的用电情况。

监测仪由物联监测单元、4G 网关、互感器 3 部分组成，互感器穿刺取电采集电能信息，物联监测单元通过 4G 网关上传主站侧进行采集信息上传^[7-8]，监测仪设计原理如图 2 所示。

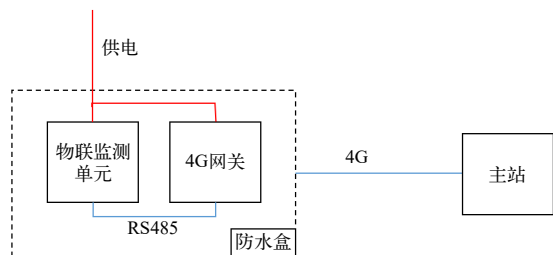


图2 监测仪设计原理图

应用场景 1：在台区任意两点（区间无用户）安装在线用电监测仪，通过一定的采集周期（可以实现 h 级采集），进行 2 个节点电量累加值的对比，

如存在较大偏差，即可定位两点间线路区段为异常区段，否则按同样模式进行下一个区段的排查，直到定位到线损异常区段。

应用场景 2：在电能表进线侧安装在线用电监测仪，按照出线侧用户用采系统电量冻结规则进行冻结电量采集^[9]，在主站（手机 App）上显示，由后台人员人工与用采电量进行比对，实现线损异常区段定位^[10-11]。

2 整体结构设计

2.1 在线用电监测仪介绍

低压在线用电监测终端主要由主站、TTU、监测单元等组成。其中，主站主要负责系统的信息采集，如：TTU 采集到的数据、监测单元（断路器）上报的故障信息和状态监测等，TTU 负责相关信息的采集与监控，控制策略管理与执行、数据传输、状态监测等；监测单元负责线路中的数据采集、断路器开关状态检测等。系统整体结构示意图如图 3 所示。

每套监测单元设备明细如表 1 所示。安装工具可实现运检人员非接触式安装互感器。物联监测单元与 4G 网关安装防水盒实现防水，互感器可选取市面上的防水互感器。App 侧主要显示入网设备采集电量等相关信息，进行累计冻结电量的展示，各单元支持功能如下。

物联监测单元。具备三相计量功能；具备 7 日

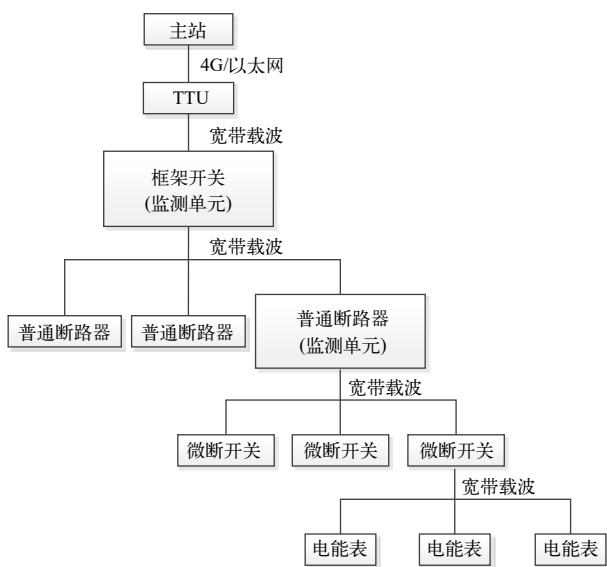


图3 系统整体结构图

表1 每套监测单元设备明细

序号	设备名称	数量	备注
1	分路监测单元	1套	含主模块及4个互感器
2	无线智能开关	1套	含主模块及1个天线
3	室外防水箱	1个	
4	抱箍	1个	

正反向有功电能冻结（日冻结）；具备15 min 3天的电能负荷曲线；具备RS485和载波通信功能；具备DLT645通信规约。

4G网关。具备TCP/IP, TCP Client；支持登录及网络维护；具备RS485和载波通信功能；与物联检测单元通信采用DLT645协议。

主站。按需采集物联监测单元记录；进行电能量偏差计算、结果展示；电能量偏差展示、15 min区间电能量展示等。

2.2 监测单元主要功能

监测单元采用变压器供电方式，使用全波整流方式提供主路（18 V）和辅路（12 V）电压输出，设计中集成了宽带载波通信模块，可通过电力线载波通信方式与上行数据交换，具备信息采集功能，可实时采集线路中的电压、电流、功率等计量信息，便于通过主站对线路进行监控。同时还具有故障监测功能，可对线路中出现的过压、欠压、断相、缺零、漏电（可选）等信息进行故障监测和上报。具有遥信功能，可配合断路器等开关类器件联合使用。

2.3 监测单元主要构成框图

本次设计中主要包含MCU电路、计量电路、载波通信模块、安全芯片、时钟芯片、485通信电路、电源电路、红外电路、数据存储电路、调试接口电路等。主要构成框图如图4所示。其中，MCU电路沿用V1版本设计方案；安全芯片、时钟芯片、485通信电路、红外电路和数据存储电路等延用电能表标准设计；载波通信电路在原有电路基础上，根据监测单元实际情况进行更改设计；计量电路部分根据需求进行重新设计；电源电路参考模块批量化电路进行更改。

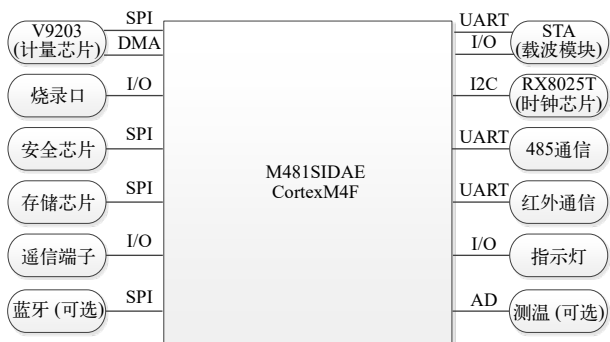


图4 监测单元主要构成框图

3 试点台区案例应用分析

3.1 台区基本情况

市变（台区编号：1290****4164）同期线损率常年处于（2%，3%）之间。进入2022年11月以来，该台区持续高损，且损失电量较大。工作人员采取档案核查、系统分析、户变关系核查以及综合变增容、更换互感器等措施，仍无法确定台区线损异常原因。

3.2 现场安装情况

因总表下口出线离10 kV线路间隔较小，为保证现场人身及设备安全，故仅在台区低压各分支线上安装线损监测仪。具体安装位置如下：出线端1—位于40#杆偏南分支线上（设备编号：XSJC002）；出线端2—位于9#杆偏北分支线上（设备编号：XSJC003）；出线端3—位于49#杆偏南分支线上（设备编号：XSJC005）。

各出线端用户负荷分布如下：台区下共49个用电户，出线端1下含用户14户，出线端2下含用户32户，出线端3下含用户17户（出线端1与出线端3之间含用户3户），如图5所示。



图5 台区走向及拓扑分布

3.3 主站 App 安装使用情况

在手机上安装线损监测仪 App，输入出线端监测设备，即可进行数据监测（含电量监测和电流曲线展示）。

3.4 在线分析及现场处理

在出线端 2。位于 9#杆偏北分支线上（设备编号：XSJC003）和出线端 3：位于 49#杆偏南分支线上（设备编号：XSJC005）分别装设监测仪，根据采集电量与用户用采电量累加值进行比对分析，发现出线端 2 监测点下损失电量较小，出线端 3 监测点下损失电量较大，基本排除出线端 2 下用户用电异常，初步锁定出线端 3 下用户用电异常。

出线端 1。位于 40#杆偏南分支线上（设备编号：XSJC002）装设监测仪，根据采集电量与用户用采电量累加值进行比对分析，发现出线端 1 监测点下损失电量较大，基本排除出线端 1 与出线端 3 之间 3 户用电异常，进一步锁定出线端 1 下用户用电异常。

公司集中人员立即对出线端 1 下 14 个用户逐户重点开展地毯式摸排，从进户线到计量装置，逐相进行电压、电流、功率等数据采集，终于锁定某一户用电异常。现场发现，该户进户线通过暗墙敷设，通过钳形电流表测量暗墙两端的电流偏差较大，基

本锁定该户存在窃电嫌疑。

面对现场的铁证及工作人员的政策宣讲，户主主动承认了窃电事实，并在用电检查结果通知书上签了字。工作人员立刻对现场实施停电，当即制止了窃电行为，并与该户协商并补交所窃电量电费和违约使用电费。同时公司组织人员对其进户线进行计量改造，改为明线敷设。

3.5 台区线损异常治理成效

现场整改后，工作人员继续对出线端 1 下 14 个用户实施用电监测，与整改前数据采集比对后，发现该出线端损失电量已恢复至正常状态，如表 2~3 所示。

表 2 整改后出线端 1 下用户电量统计 kW·h

用户编号	26日	27日	28日	29日	30日	1日	2日
560****710	1.96	1.17	2.09	2.32	2.14	2.04	2.06
560****645	12.31	16.48	18.78	13.02	13.18	14.93	16.49
560****397	6.12	24.08	5.66	7.50	6.68	31.90	31.70
560****411	1.23	1.22	1.39	1.35	1.35	1.27	1.31
560****824	3.37	3.50	3.30	3.30	3.49	3.44	3.51
560****378	6.18	6.39	6.18	5.43	5.78	5.85	5.25
560****081	2.16	2.22	2.23	2.92	2.18	2.10	3.01
560****086	0.01	0.02	0.06	0.01	0.18	0.12	0.25
560****085	12.64	5.18	8.47	4.59	6.83	11.32	10.43
560****011	19.75	19.16	21.92	25.32	51.41	56.66	48.59
560****084	1.73	1.56	1.57	1.88	1.78	1.54	2.10
560****866	4.13	2.49	3.64	4.24	3.55	6.61	5.43
560****787	0	0	0	0	0	0	0
560****786	7.30	6.99	10.48	8.92	9.26	10.24	9.89

表 3 整改后出线端 1 损失电量

kW·h

电量值	26日	27日	28日	29日	30日	1日	2日
监测点电量	111.00	122.00	119.40	104.50	108.40	148.60	140.50
用户电量	78.89	90.46	85.77	80.80	107.81	148.02	140.02
监测点和用户电量差值	32.11	31.54	33.63	23.70	0.59	0.58	0.48

(下转第 61 页)

配电网线损动态检测与处理方案研究

梁挺江

(广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528300)

摘要: 线损率是反映我国配电网经济运行的重要指标。研究从配电网线损计算公式出发, 设计基于SOA的同期线损动态检测系统, 通过Web服务器、数据库服务器以及后台工作站进行海量数据处理、实时监测评估, 以精准掌握线损异常或偷电漏电等潜在风险, 提出系统、科学、高效的处理方案。

关键词: 线损; 计算公式; 动态检测; 节能降耗

中图分类号: TM714

Research on Dynamic Detection and Processing of Line Loss in Distribution Networks

LIANG Tingjiang

(Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Foshan 528300, China)

Abstract: Line loss rate is an important indicator reflecting the economic operation of China's distribution network. Starting from the calculation formula of distribution network line loss, design a dynamic detection system for synchronous line loss based on SOA. Massive data processing is carried out through web servers, database servers, and backend workstations, with real-time monitoring and evaluation to accurately grasp potential risks such as abnormal line loss or power theft and leakage. Propose a systematic, scientific, and efficient solution.

Keywords: line loss; calculation formula; dynamic detection; energy saving and loss reduction

受环境因素、技术因素、人为操作等影响, 配电网运行过程中很容易发生过载、重载、超容情况, 造成线损率高。尤其是 10 kV 配电网, 其末端支线较为复杂, 用电量统计数据易缺失, 线损异常情况经常出现, 须解决和优化。

1 配电网线损计算公式

本次研究运用 4 分统计法进行配电网线损计算, 确定各点线损率。

分线线损。按照不同电压等级可将配电网划分为不同主线, 其线损率为对应等级线路中的售电量、供电量的差值占比。

分区线损。考虑用户用电情况划分出不同台区, 线损率为同一公用变压器下的售电量、供电量的差值占比。

分支线损。依照支线不同电压等级, 可对第 i 条线路线损率进行计算。

加权线损。依照分区内线路情况, 可对不同电压等级的线损率进行算数平均处理, 以确定台区内加权线损。

收稿日期: 2023-02-24; 修回日期: 2023-03-09

2 配电网线损动态检测方案

为保证配电网可靠、高效、经济运行, 在配电网线损管理过程中应依照安全、智能化需求构建智能监测系统, 形成集“现场终端”“5G网络”“集成服务器”于一体的配网线损动态检测平台^[1]。

2.1 系统设计

配电网线损动态检测系统设计时可利用 Web 服务器、数据库服务器以及后台工作站构成基础服务架构, 利用 SOA (service-oriented architecture) 和 ESB (enterprise service bus) 模型实现双向用电数据传输, 以进行用电量预测、线损率预测、对比研究等, 其系统架构如图 1 所示^[2-3]。

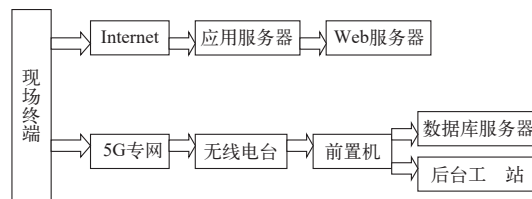


图 1 配电网线损动态检测系统架构

服务器。包括应用服务器、Web 服务器、数据库服务器等, 可快速存储、分析和处理配电网中的

海量用电数据,针对用电需求、线路运行情况等,计算4分统计法线损率并识别异常线损情况,为配电网运行管理提供有效参考依据。

局域网。为5G专网或GPRS专网,可实时双向交互,传输速度更快、准确率更高,满足配电网线损计算中的可靠性需求。尤其是在5G网络中,可在ms级内将大量数据同步上传到各个服务器、后台终端中,其并行传输灵活性、兼容性优势显著,值得深入研究和拓展。

工作站。由多功能模块主站构成,可将配电网线损率计算结果通过图表可视化展示。用户可直接通过后台工作站界面查阅、下载实时线损率,用于配电网运行可靠性评估和分析,以便于展开针对性降损管控。

2.2 功能设计^[4-5]

用户管理模块。一般包括客户档案管理模块和计量点管理模块2大部分。前者主要展示客户用电的基本信息、用户用电行为、用户用电特征等,后者主要展示4分统计法中的各部分线损率情况,涉及计量点线路编号信息、计量点线损率、计算时间等。在设计用户管理模块时应设计好权限,使人员能够依照权限等级获取区域内的实时用电信息、线损率数据等。

数据采集模块。现场终端主要负责采集配电网中的电压电流、频率波形等,一般包括各线的电能表和传感器。在获取配电网中的电信号、频率波形等数据后,可通过电能表上端集中器汇总至现场终端,作为配电网线损监测的参考数据。

为保证数据传输的安全性、可靠性和高效性,在配电网线损数据采集过程中还可构建区块链,以点对点分布式存储方式,提升线损信息采集效果。上述过程中可通过工作站设置数据格式,如JSON格式、Excel格式,各项数据均识别后,系统会逐一打包,达到预设值后向IPFS系统发送。此时,工作站可根据hash地址直接访问所需数据文件,或利用hash地址进行区块链验证,检验数据文件的可靠性和有效性,确定数据无问题后方可应用到配电网线损动态检测过程中。

数据传输模块。Internet网络和5G专网负责向上级服务器提供运行状态数据,传输到系统工作站中。同时下连现场终端,传输控制指令,实现双向

通信;服务器中接收各关键数据,并进行线损评估。上述通信接口设置过程中主要为模拟数字接口,将现场总线网络中的电信号、波形信号等数据转换成主处理器可识别的数字量,以便于进行初步数据筛选和处理。在线损评估过程中先进行数据归类,将同一设备的关键数据打包,再传输到线损检验模型中,用于动态检测和风险评估,确定是否存在异常线损情况。

线损分析模块。本次设计的配电网线损动态检测系统中线损分析主要利用服务组件、总线拓扑展开,包括线损计算功能和线损对比功能,可及时发现异常线损情况,查找异常用电行为。其中,服务组件适配器包括线损计算结果显示、经济运行结果分析、三相负荷不平衡分析、配变调串分析、母线不平衡分析、线损综合分析、线损对比分析、线损率指标月报等内容。数据总线包括内部数据挖掘、数据采集内容,如营销基础数据、营销发行数据、营销业务数据等。

可根据4分统计算法直接计算分线、分区、分压、加权线损,将其导入到动态检测系统中,与理论线损率进行对比,确定其实际相对值是否在标准阈值内。若在安全阈值内,则直接输出结果,确定配网运行正常;若超出阈值,则可确定存在线损异常情况。此时,线损分析模块配合关键用电信息和辅助决策系统,快速识别异常用电行为,查找配电网运维管理中的薄弱环节,对症下药,从根本上改善配电网的安全效益和经济效益。其功能逻辑如图2所示。

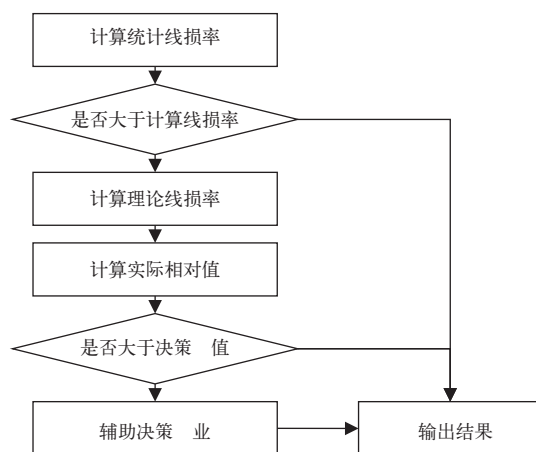


图2 配电网线损动态检测逻辑设计

(下转第92页)

面向电力端对端控制类业务的无线通信单向时延测量方法研究与验证

刘志仁, 俞力珉

(国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司, 江苏 无锡 214062)

摘要: 文章基于当前缺少无线端到端延时精确测试方法的现状, 提出了面向发送端或者接收端的无线通信单向时延测试方案。针对内部时钟授时这一影响时延测试结果的关键因素, 提出了时钟线性补偿策略, 实现秒内线性补偿以及多源高频时钟校正策略, 实现CPU高频时钟替代。按照测试方案基于四层结构开发了测试终端, 在示范区完成了无线网络单向时延和抖动值的测试验证。

关键词: 无线通信; 电网; 保护控制; 性能测试

中图分类号: TM734

Research and Verification of One-way Delay Measurement Method for Wireless Communication for Power End-to-end Control Services

LIU Zhiren, YU Limin

(State Grid Wuxi Power Supply Company, Jiangsu Wuxi 214062, China)

Abstract: Based on the current lack of accurate test methods for wireless end-to-end delay, this paper proposes a wireless communication one-way delay test scheme for the sender or receiver. Aiming at the internal clock timing, a key factor affecting the delay test results, a clock linear compensation strategy is proposed to achieve linear compensation within seconds and a multi-source high-frequency clock correction strategy to achieve CPU high-frequency clock replacement. According to the test scheme, the test terminal is developed based on the four-layer structure, and the test verification of one-way delay and jitter value of wireless network is completed in the demonstration area.

Keywords: wireless communication; grid; protection control; performance measurement

电网是一个实时控制的运行系统, 其中如继电保护等控制类业务功能依赖端到端的单向通信, 其实时性要求非常高, 需要低时延、高可靠的通信技术作为支撑。

传统电网端到端保护控制业务依赖于光纤通信, 但光纤需要路径, 敷设困难, 运维难度大, 特别对于当前快速发展的配电网, 实现光纤点对点业务的大规模全覆盖困难重重。随着无线通信技术的发展, 特别是5G通信技术的出现, 其时延、抖动等指标有了很大改善, 在做好相关网络配置与优化的基础上, 可满足配电网端到端保护控制业务要求。

无线通信质量受信号覆盖、通信配置等因素影响, 须经过一系列优化才能满足应用要求。考虑到配电网端到端保护控制业务为点对点单向通信模式, 因此, 须在承载配电网端到端控制业务前先行开展

收稿日期: 2023-03-28

无线通信单向时延测试, 并根据测试结果进行网络优化, 确保满足业务承载要求。当前, 针对无线通信时延的测试主要针对某客户端与网络通信的往返时延^[1-3]或客户端与服务器主站通信时延^[4], 缺乏客户端到客户端时延的精确测试方法。

本文提出一种面向电力端对端控制类业务的无线通信单向时延测量方法, 可以测试端到端无线通信的单向时延和抖动值, 解决了当前缺少精确测量无线通信单向时延方法的难题, 为通信侧优化及承载业务提供数据支撑。基于此方法形成了应用方案, 开发了测试终端。现场实测情况表明, 测试结果准确, 应用便捷, 可满足电力端对端控制类业务无线通信时延指标的测试需求。

1 电力控制类业务单向时延测试方案设计

电力控制类业务单向时延测试方案按照业务技

术模式构建,由测试终端和无线终端构成。根据现场应用及测试情景的不同,无线通信单向时延可以分为在发送端测试和在接收端测试2种方法。

1.1 无线通信单向时延测试方案

端对端控制业务无线通信单向时延测试方案如图1所示,2个测试点各提供1台测试终端及1台无线终端接入设备,无线终端接入设备完成相应软硬件配置实现与无线网络的通信。测试终端通过有线通信方式与无线终端接入设备相连,同时接收外部的秒脉冲定时信号。

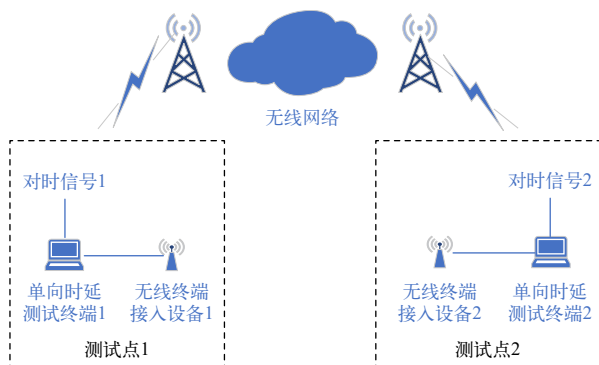


图1 端对端控制业务无线通信单向时延测试方案

1.2 发送端无线通信单向时延测试方法

在发送端测量无线通信单向时延的方法两侧相同,以测量测试点1至测试点2无线通信单向时延为例,测试方法如图2所示。

测试终端1设置有报文发送时间监听程序,在各项软硬件及通信参数配置完毕后,启动测试报文发送,每一帧报文设置有发送序号*i*,发送给对侧(测试点2)无线终端接入设备,从测试终端1发出时由监听程序记录发送时间 T_{1i} 。随后,将监听程序记录的发送时间组成为发送时间记录报文发送给对侧终端(测试终端2),报文内容包括测试数据包、发送序号*i*与时间戳 T_{1i} 。对侧(测试点2)无线终端接入设备收到报文后,转发给测试终端2。测试终端2接收到测试报文和时间记录报文,记录接收测试报文的时间戳,并从时间记录报文中解析出发送时间戳。对于第*i*帧,测试终端2记录报文接收时间 T_{2i} ,并从报文中解析出发送时间戳 T_{1i} 。测试终端2计算从测试点1至测试点2的单向时延,并储存在测试终端2的内存中。对于第*i*帧,可以计算得测试点1至测试点2的单向时延:

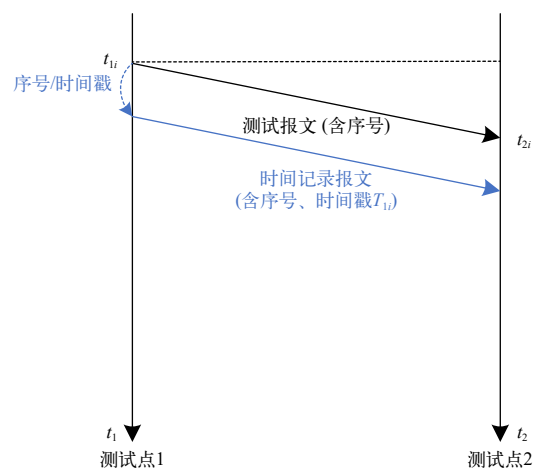


图2 发送端无线通信单向时延测试方法

$$\Delta T_i = T_{2i} - T_{1i} - T_s - T_r \quad (1)$$

式中: T_{2i} 为测试终端2报文接收时间; T_{1i} 为测试终端1报文发送时间; T_s 为测试终端发出报文至无线终端接入设备无线侧发出报文的时间; T_r 为无线终端接入设备收到报文至测试终端收到报文的时间, T_s 、 T_r 均为固定时间。

1.3 接收端无线通信单向时延测试方法

在接收端测量无线通信单向时延的方法两侧相同,以测量测试点1至测试点2无线通信单向时延为例,测试方法如图3所示。

2 提高无线通信单向时延测试定时精度策略

按照无线通信单向时延测试方案,无线通信单向时延测试的准确性依赖于两侧测试终端的时钟,需要两端测试终端时间完全一致,因此须完成两侧终端的内部时钟同步。时钟同步方式通常为测试终端从外部获取秒脉冲信号(包含UTC时间信息),据此调整自身内部晶振时钟,可以采用配置时间同步装置、无线网络精确授时(如5G网络授时)或接入包含授时服务器的网络等对时方式完成同步。

采用外部时钟授时,当测试终端内部晶振准确度较高时,可以测量获得较精确的无线通信单向时延结果。当测试终端内部晶振准确度不高时,1s内也会产生一定的累计误差,影响单向时延测试准确度,须进一步优化。

2.1 时钟线性补偿策略

将测试终端的内部晶振时钟与同步时钟进行比较,如果每秒偏差超过设定值时,进行整秒同步以及对内部晶振时钟进行补偿。

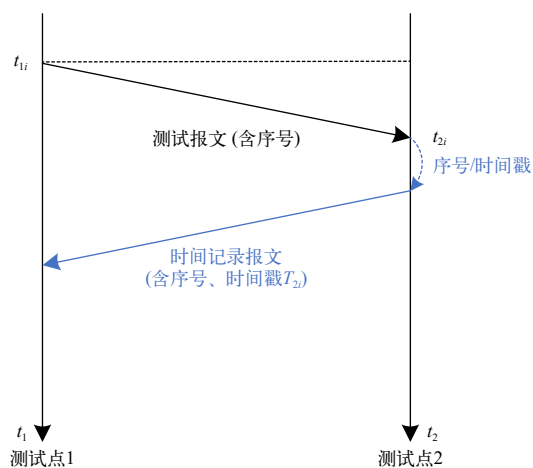


图3 接收端无线通信单向时延测试方法

补偿采用秒内线性补偿方法，即在整秒内通过对内部晶振时钟进行线性化补偿。首先进行补偿系数初始化，先逐秒计算补偿系数：

$$a_j = \frac{t_{bj} - t_{b(j-1)}}{(N_j - N_{j-1}) / f_{co}} = \frac{1}{(N_j - N_{j-1}) / f_{co}} \quad (2)$$

式中： a_j 为第 j 秒的补偿系数； f_{co} 为内部晶振时间频率； N_{j-1} 为 $j-1$ 秒的外部同步时间秒脉冲触发时刻的晶振累计值； N_j 为 j 秒的外部同步时间秒脉冲触发时刻的晶振累计值； t_{bj} 为第 j 秒的外部同步时间秒脉冲触发时刻的时间； $t_{b(j-1)}$ 为第 $j-1$ 秒的外部同步时间秒脉冲触发时刻的时间。

对补偿系数 a 进行初始化，初始化可以设定一定时间，可以获得初始化的补偿系数 a ：

$$a = \sum_{j=1}^p a_j / p \quad (3)$$

式中： p 为用于初始化的这一段时间的秒数。

在此基础上，进行内部晶振时间秒内线性补偿，则当前时刻的测试终端时间 T_{uks} 为：

$$T_{uks} = a \times (N_{ks} - N_k) / f_{co} + T_{uk0} \quad (4)$$

式中： N_k 为当前第 k 秒外部同步时间秒脉冲触发时刻的晶振累计值； N_{ks} 为第 k 秒至第 $k+1$ 秒间当前时刻的晶振累计值； T_{uk} 为第 k 秒外部同步时间秒脉冲触发时刻的时间。

2.2 多源高频时钟校正策略

测试终端的 CPU 按照固定频率运算，也可以将其作为一个时钟。当终端内部晶振准确度不足时，可利用 CPU 构建高频时钟进行替代，从而实现对于内部时钟的校正。

当采用 CPU 作为时钟时，基于 CPU 的工作频率 f 、上一个整秒的 CPU 计数值 Q_k 和本秒内当前时刻的 CPU 计数值 Q_{ks} ，则当前时刻的测试终端时间 T_{ks} 为：

$$T_{ks} = \frac{Q_{ks} - Q_k}{f} + T_{uk0} \quad (5)$$

3 无线通信单向时延测试终端研制与验证

3.1 无线通信单向时延测试终端

按照无线通信单向时延测试方案开发测试终端，其系统结构分为 4 层，如图 4 所示，其中在应用层提供双向时延测试和单向时延测试功能，并提供网络发送、网络监听和对时等服务接口。

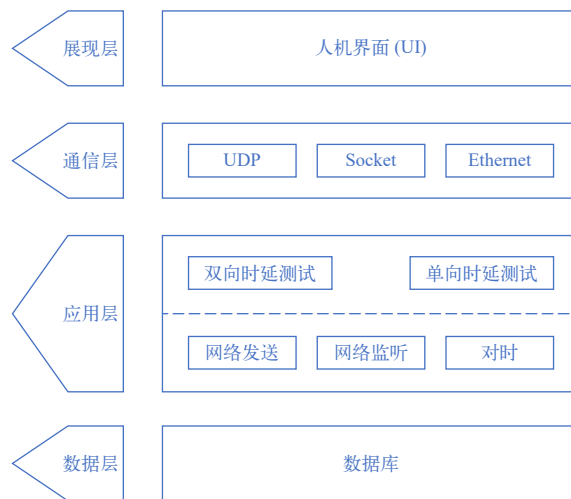


图4 无线通信单向时延测试终端分层结构示意图

在 2 个点间放置无线时延测试终端，通过发送一组测试包，可以分别测得 2 个点间的 2 个方向的一组单向时延，再通过求取数据的平均值得到平均时延，通过求取数据的标准差得到通信抖动值。

3.2 无线通信单向时延测试验证

江苏无锡建有配电网 5G 保护自愈应用示范区，该区域通过在运营商网络中应用网络切片、能力开放、边缘计算等技术，在接入、承载、核心网等环节构建面向电力行业的虚拟专用网络。

在示范区开展测试验证，选取 2 个测试点，按照图 1 所示搭建单向时延测试系统，应用测试终端开展单向时延测试。从测试点 1 至测试点 2 测试单向时延，共发送 20 个测试包，未发生丢包现象，发送包最大时延 36.64 ms，最小时延 13.28 ms，平均时延 23.68 ms，标准差 7.95 ms，具体如图 5 所示。

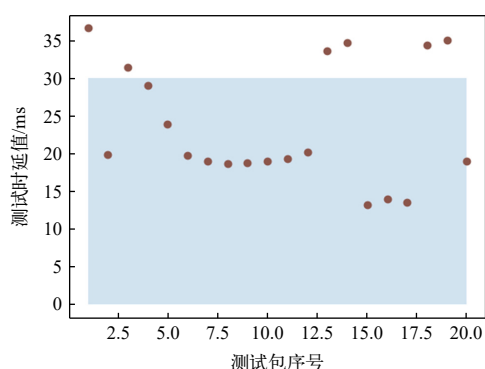


图5 测试点1至2单相时延测试结果分布图

从测试点2至测试点1测试单向时延,共发送20个测试包,未发生丢包现象,发送包最大时延36.33 ms,最小时延11.57 ms,平均时延22.27 ms,标准差8.48 ms,具体如图6所示。

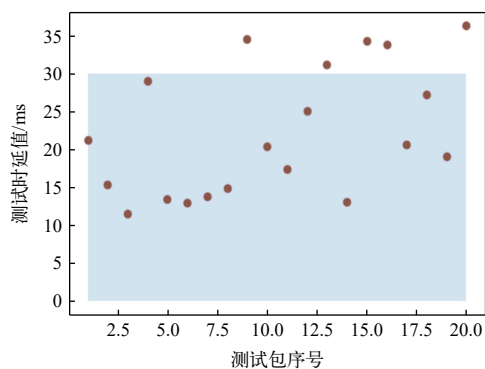


图6 测试点2至1单相时延测试结果分布图

4 结论

电网控制类业务具有端到端单向通信的业务特征,并需要满足低时延、高可靠的技术要求。无线网络单向时延、抖动等关键通信质量指标关系到其是否满足承载电网控制类业务要求。本文提出的无线通信单向时延测试方案和研发的测试终端可以进行相关指标的高精度测试与分析,实现对无线通信承载电网控制类业务网络现状的全面评估,可为无线通信在电网保护控制领域的大规模应用提供技术支撑。

参考文献

- [1] 王再见,杨凌云,汤萍萍,等. 5G网络感知质量关键技术研究[J]. 无线电通信技术, 2016,42(6): 28-32+90.
- [2] 宋海涛,申建华. 无线链路时延测试与标定[J]. 河北省科学院学报, 2016,33(02): 39-42.
- [3] 赵鑫彦. 面向5G的无线网络评估及测试方法研究[J]. 电信快报. 2019(11): 38-39.
- [4] 李根韬,袁卫国,宋伟. 电力无线专网建设与测试[J]. 沿海企业与科技., 2014,(05): 20-23.

作者简介

刘志仁(1984—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统保护与控制技术。

俞力珉(1981—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网二次技术。

(责任编辑:袁航)

(上接第13页)

- [9] 江知瀚,马迎新,高旭,等. 断路器三相不一致保护可靠性分析及二次回路改进[J]. 电力系统自动化, 2017,41(11): 169-172+180.
- [10] 李海燕,王旭红. 断路器三相不一致保护应用研究[J]. 电力学报, 2013,28(4): 290-293.
- [11] 钱敏. 高压断路器三相不一致保护改进及应用研究[D]. 广州:华南理工大学, 2018.
- [12] 于晓军,刘志远,于小艳,等. 基于双位置继电器构成的断路器非全相保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 138-142.
- [13] 陈昊,徐鹏,谭风雷,等. 变电站设备检修调试工作优化决策[J]. 湖北电力, 2021,45(2): 1-6.
- [14] 夏小飞,芦宇峰,苏毅,等. 基于相空间重构与改进GSA-SVM的高压断路器机械故障诊断[J]. 中国电力, 2021,54(10): 169-176.
- [15] 王硕君,麦荣焱,何兴华,等. 基于高压断路器在线状态监测系统研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2017,(10): 202-204.
- [16] 李洪兵,唐建军,张电,等. 高压断路器状态在线监测系统:北京,CN203705604U[P]. 2014-07-09.
- [17] 花国祥,魏晓光,高阳. 混合式高压直流断路器数据监测

平台的研制[J]. 中国电力, 2015,48(10): 84-89.

- [18] 李毅,蒋浩,龚付高,等. 智能断路器在线监测系统研究[J]. 高压电器, 2017,53(10): 19-23+35.
- [19] 陈昊,张海华,朱立国,等. 新冠疫情背景下变电检修工作的安全管控[J]. 电力安全技术, 2021,23(9): 72-75.
- [20] 孙曙光,于晗,杜太行,等. 基于振动信号样本熵和相关向量机的万能式断路器分合闸故障诊断[J]. 电工技术学报, 2017,32(7): 20-30.
- [21] 田书,康智慧. 基于改进变分模态分解和SVM的断路器机械故障振动分析[J]. 振动与冲击, 2019,38(23): 90-95.
- [22] 潘徽,宋政湘,牛博. 基于振动的断路器状态检测系统的设计与开发[J]. 高压电器, 2014,50(12): 83-88.

作者简介

陈昊(1980—),男,博士,研究员级高级工程师,高级技师,从事超高压电网变电运检工作。

徐伟伦(1996—),男,硕士研究生,从事电力机器人电力系统智能装置研究。

(责任编辑:刘艳玲)

新型变压器试验短路接地装置的研制

王 佼

(国网河北省电力有限公司保定供电分公司, 河北 保定 071000)

摘要: 针对检修试验现场变压器类设备传统的短路接地方法存在的不足, 提出了一种新型变压器试验短路接地方法。QC 小组研发的新型装置, 可利用转换开关实现短路和短路接地两种状态的切换, 有效规避了试验封线掉落的风险, 显著提高了试验效率, 具有一定的推广应用价值^[1]。

关键词: 变压器; 短路; 短路接地; 转换盒

中图分类号: TM862

Development of A New Short-circuit Grounding Device for Transformer Test

WANG Jiao

(State Grid Baoding Power Supply Company, Hebei Baoding 071000, China)

Abstract: In view of the shortcomings of the traditional short-circuit grounding method for transformer equipment in maintenance test site, a new short-circuit grounding method for transformer test is proposed in this paper. The new device developed by QC team can realize the switch between short circuit and short-circuit grounding by using the transfer switch, which effectively avoids the risk of test closure line falling, significantly improves the test efficiency, and has certain popularization and application value^[1].

Keywords: transformer; short circuit; short-circuit grounding; converter device

1 选择课题

随着社会发展, 用户对供电服务质量要求越来越高, 这就要求电网检修人员在保证工作质量的前提下, 尽可能减少设备停电时间。在变电站进行的常规检修工作中, 变压器试验耗时较长。通常须要用短路接地线将套管的导电杆进行短接或者短接接地。在工程实际中, 传统的短路接地线为镀锌扁铜线, 毛刺多易扎手, 拆接过程复杂, 费时费力, 只能采用缠绕方式连接且容易松动。同时, 可能发生短路接地线虚接的状况, 既影响试验数据准确性, 又降低了检修效率, 而且存在一定安全隐患。而且, 短路接地线在狭小空间存在遗失、掉落的风险。

针对上述问题, 行业内并无特别有效的解决办法。从市场调研可知, 市场上尚无专门的变压器试验短路接地装置, 故 QC 小组将课题设定为“新型变压器试验短路接地装置的研制”。

2 目标确认

小组对 30 个检修试验现场进行统计, 发现采用传统接线方法平均用时为 20 min。小组决定优化接

收稿日期: 2023-01-17

线方式, 设计专用装置来缩短接线时间, 将活动目标设为: 检修试验现场变压器短路接地时间由 20 min 缩短到 8 min。

3 提出方案

课题研究难点为: 如何简化短路接地线拆接过程; 如何保证接地线使用过程中接触牢固, 且能减少遗失掉落风险。

为解决上述难题, 小组召开“头脑风暴法”会议, 提出“新型变压器试验短路接地装置的研制”总体方案, 如图 1 所示。并提出分体型、集成型 2 种具体实施方案。

分体型装置体积较大, 变压器高、低压侧须分别使用两套装置, 便携性差。集成型装置须专门设计电路部分, 且固定性较差。因此, 小组结合两种方案的优点, 弥补单一方案的不足, 提出了第 3 种实施方案即集成升级型。

3.1 集成升级型方案总体要求

安全可靠, 完成操作后能保证电源接触良好。便携, 总体质量小于 1.5 kg。固定性能好, 具有防误触、防水和阻燃功能。可靠性高, 使用寿命长, 接线简单。

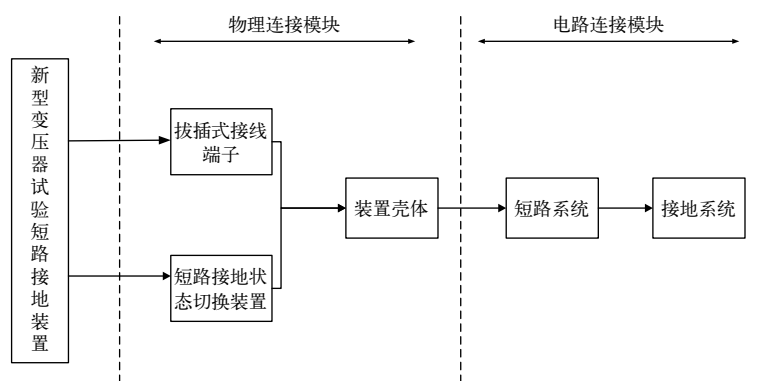


图1 装置研制作总体方案

3.2 集成升级型方案功能描述

变压器的高压侧和低压侧可同时进行连接，操作便捷。

将接地模块、短路接地模块和状态切换开关组装成一体式结构。

壳体背部安装强磁磁铁，增强可固定性。

3.3 集成升级型方案分析

优点：集成方案1和方案2的优点，拥有独立的电气保护回路，安全性、可靠性最高。

缺点：综合了2种实施方案，增加了研发工作量。

方案3可满足需求分析及相关功能要求，且技术优点全面。因此，小组确定课题实施方案为集成升级型方案。

4 方案实施

从功能实现角度考虑，集成升级型方案的组成系统由设备连接单元、接地单元和短路单元转换台2个模块组成，如图2所示。

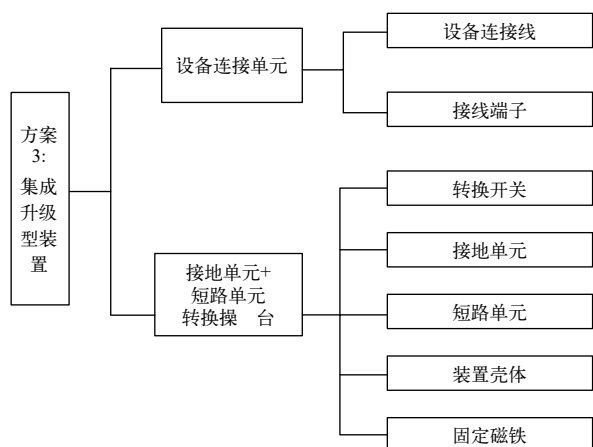


图2 集成升级型装置的组成部分

4.1 模块的选择

小组对集成升级型装置的组成模块进行逐一选择，如下：

(1) 设备连接线选定为自带透明护套接地线夹。使用该线夹进行连接，不易脱落，不易变形、起毛刺，而且导电性好，不易发热。

(2) 接线端子选定为包胶六棱带色标接线端子。采用螺纹口固定连接，连接性能好，不易脱落识别度高，方便操作。

(3) 转换开关选定为船型开关。该开关通断指示明显，安全性更高，尺寸小巧，便于面板布局，且铜件使用寿命长。

(4) 接地单元选定为纯铜接地排。其机械强度高、导电性好、使用寿命长。

(5) 短路单元选定为纯铜短路排。其牢固耐用且尺寸小巧，抗振能力好。

(6) 装置外壳采用电气仪表防水盒。该壳体防水、抗冲击，尺寸小巧便于携带，而且内含塑料防脱落螺丝，不易生锈。

(7) 固定磁铁选定为钕铁硼磁铁贴片。可以方便固定，磁性强，体积小且使用寿命长。

确定选择方案后，对集成升级型装置的连接单元、接地单元和短路单元转换台分别进行设计、制作，最后整合相关功能部件，进行整体组装、调试。

4.2 模块的设计及制作

4.2.1 设备连接线

小组采购带透明护套的无氧铜丝导线，在导线上加装4mm香蕉插头和鳄鱼线夹，制作完成了8根设备连接线。

4.2.2 接线端子

小组根据新型变压器试验短路接地装置原理图，

经过不断尝试，选定了合适的接线端子。端子性能参数如表 1 所示。

表 1 端子性能参数表

端子名称	带色标六棱接线端子
端子金属材质	铜镀镍
端子尺寸	端子总长 45 mm, 尾部 4 mm 插孔, 蕉头使用
开孔尺寸	11 mm+R ₁ .6×2(腰孔)
产品颜色	黄绿红黑
端子特点	可拆解设计, 采用整体镀镍, 能够有效防止氧化

4.2.3 转换开关

转换开关是新型变压器试验短路接地装置的重要组成部分, 其电气寿命、切换可靠性直接影响着装置的性能。小组最终采购了 2 脚 2 档船型开关, 开关参数如表 2 所示。

表 2 转换开关性能参数

参数	数值
额定电压	10 A
额定电流	125 V
绝缘电阻	≥ 100 MΩ
接触电阻	≤ 50 mΩ
接电强度 (极间)	1500 VAC/5S
电器寿命	≥ 10 000 Cycles
使用温度	T85

4.2.4 接地单元

接地单元直接关系到试验人员在操作新型变压器试验短路接地装置时的人身安全, 为保证其安全性, 小组选用优质 H62 黄铜板, 按照装置设计图进行打孔切割, 完成制作。

4.2.5 短路单元的设计制作

在制作短路单元时, 小组按照对策表, 为每个端子采用独立接线, 在保证连接可靠性的同时尽可能减小其尺寸, 以减轻装置总体重量。

4.2.6 装置外壳的设计制作

装置外壳是短路接地单元的载体, 小组经过多次试组装, 最终选定装置外壳为尺寸 200 mm × 120 mm × 75 mm。外壳由面板、底座、密封螺丝组成, 保护等级为 IP65。在壳体基础上, 可对装置的接线端子、短路系统、接地系统和转换开关分别进

行接线组装。

4.2.7 固定磁铁单元的设计制作

在固定磁铁的选择上, 小组选用钕铁硼磁铁贴片, 该贴片具有磁力强、不生锈和不退磁的特点, 其直径为 25 mm, 厚度为 2.07 mm, 表面电镀锌镍, 硬度高, 抗腐蚀能力强。小组在装置底部安装 4 枚磁铁贴片, 使得装置能够吸附在被试设备表面, 避免因人员误碰导致装置接头脱落的风险, 进而保证了检修、试验人员的安全。

装置整体外观如图 3 所示。小组对集成升级型装置的可靠性进行了测试。分别对安装固定、连接稳定性、操作可靠性进行调试, 其性能、参数均符合安全技术要求, 满足现场使用条件。



图 3 装置整体图

5 取得效果

新型变压器试验短路接地装置应用于检修现场, 解决了传统接线方法存在的不足。该装置采用转换开关实现短路和短路接地 2 种状态的切换, 可有效规避试验封线掉落的风险, 保证试验人员的人身安全。装置投入使用后, 绝缘特性试验平均用时由每次 20 min 缩短到 5 min, 显著提高了检修试验的效率。

此次 QC 活动, 超额完成了既定目标, 变压器短路接地时间由设定的 8 min 缩短至 5 min。下一步, 小组将进一步优化装置的智能化配置, 如加入通断指示灯、面板透明化等, 使得装置操作更加便捷, 更好地服务于检修试验现场。

参考文献

- [1] 舒建华. 电气设备高压试验安全防护系统设计与研制[D]. 华北电力大学, 2017.

作者简介

王佼 (1987—), 男, 高级工程师, 主要从事电气试验工作。
(责任编辑: 刘艳玲)

基于程序化的调度智能操作票系统开发

孔宪佐, 苏普春, 王晓红, 张伟, 王茂泽, 王一鸣

(内蒙古电力(集团)有限责任公司巴彦淖尔供电分公司, 内蒙古 巴彦淖尔 015000)

摘要: 在电网结构日益强大, 管辖设备日益增多, 调度员工作繁重的背景下, 操作票系统的编写和审核环节势必会增加调度员的工作负担, 稍有不慎, 可能造成带电合接地刀闸或带接地刀闸送电等严重误调度事故, 影响电网的安全稳定运行。因此, 课题建立了一款基于程序化的调度智能操作票系统, 缩短调度操作票编写时长, 减少调度操作票出错率, 对提升调度员的工作效率、做好安全生产工作、加快智能化调度的发展、确保电力系统安全稳定运行有一定的推动作用。

关键词: 操作票; 调度员; 智能操作票系统; 电力系统

中图分类号: TM734

Develop a Scheduling Intelligent Operation Ticket System Based on Programming

KONG Xianzuo, SU Puchun, WANG Xiaohong, ZHANG Wei, WANG Maoze, WANG Yiming

(Bayannaer Power Supply Branch of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd., Inner Mongolia Autonomous Region Bayannaer 015000, China)

Abstract: In the context of the increasingly powerful power grid structure, the increasing number of jurisdictional equipment, and the increasingly heavy workload of dispatch personnel, the writing and review process of the operation ticket system is bound to increase the workload of dispatchers. A slight carelessness may cause serious misoperation accidents such as electrified grounding switch or power transmission with grounding switch, affecting the safe and stable operation of the power grid. Therefore, this article establishes a programmable scheduling intelligent operation ticket system to shorten the writing time of scheduling operation tickets, reduce the error rate of scheduling operation tickets, improve the work efficiency of dispatchers, do a good job in safety production, accelerate the development of intelligent scheduling, and ensure the safe and stable operation of the power system.

Keywords: operation ticket; dispatcher; intelligent operation ticket system; power system

1 选择课题

调度操作票是电力系统中进行电气操作的书面依据, 须经过拟票、审票、执行、归档 4 个环节, 其中拟票环节耗费时间最长。调度操作票编写分为 5 步, 其编写和审核环节由调度员逐一把关, 同时书写内容和格式有严格的标准, 对书写标准严格要求外, 还不允许有错别字, 更不允许有涂改, 手工填写操作票时如有错必须重新打印填写, 延长操作时间, 使回令的及时性大打折扣, 造成电网运行调度员和监控员在编写操作票时常常背负很大的心理压力 and 负担。伴随着综合自动化技术在电网建设中应用的不断深入, 传统的手工拟写操作票已无法满足电网快速发展的要求, 手动编制操作票的传统也

收稿日期: 2022-10-29, 修回日期: 2023-03-06

逐步被各种自动操作票系统所替代, 因此, 开发一款调度智能操作票系统势在必行, 以实现经济效益和电网安全最大化。

2 目标确认

课题根据需求借鉴相关创新思路和技术手段, 提出创新构想, 将此次 QC 活动的课题定为调度智能操作票系统的开发, 通过程序化算法实现调度操作任务快速拟定, 利用 Excel 应用程序构建的调度操作步骤模块, 根据调度操作任务实现对调度操作票操作步骤的规范化编写, 实现调度操作票智能生成, 以取代原手工电子出票方法, 达到缩短调度操作票编写时长的目的, 图 1 为调度智能操作票系统图。课题将目标设定为将调度操作票的编写时长降低至 1 min/张。

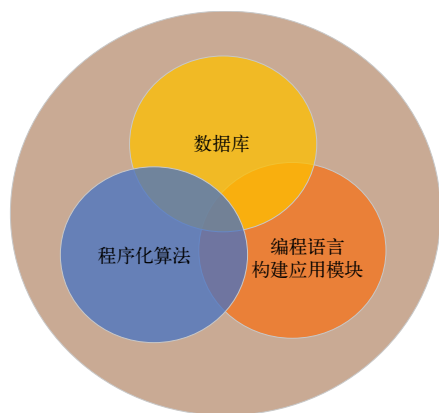


图1 调度智能操作票系统图

3 制定对策与实施

通过借鉴文献 [1] 《一种基于决策支持系统的智能化电网调度操作票系统的研究》中“程序化决策算法”创新思路以及文献 [2] 《基于 Excel 应用的电网调度操作指令自动拟写方案》中“采用编程语言构建调度操作票智能模块”的设计原理，提出了“基于程序化的调度智能操作票系统的开发”的总体方案^[1]。总体方案由系统开发方案和系统功能方案组成，其中系统开发方案包括：架构的选择、数据库的选择、编程语言的选择、开发工具选择、程序化算法选择 5 个模块。系统功能方案包括：调度程序票识别功能、调度操作票生成方式、校验方式 3 个模块，如图 2 所示。小组围绕课题目标和总体方案提出了可行的分级方案，其归纳整理如图 3 所示。



图2 基于程序化的调度智能操作票系统开发的总体方案

根据确定的最佳方案及质量控制中软件系统开发及编制的要求，调控中心结合目前的硬件配置及工作现状，对系统的运行环境做了目标设定，QC 小组对任务进行分工、互相协作，制定对策计划表，如表 1 所示。



图3 总体方案分解图

QC 小组按照对策表计划，对各条对策逐条实施。每条对策实施后，QC 小组根据相应目标检查实施效果及其有效性，并对用 VB 编程实现的调度监控操作票系统进行验证。

3.1 实施 1：C/S 构架

QC 小组对 C/S 构架加固成本进行检查，检查平均每次加固成本是否超过 500 元，能否达到目标。2021 年 5 月 1—30 日，总共进行 3 次系统加固，小组将 C/S 构架加固成本进行统计，经试验分析 C/S 构架加固成本均未超过 500 元，目标值达到。小组还对该调度智能操作票系统安装后网络安全情况进行试验，根据巴彦淖尔供电公司网络安全要求，利用亚信杀毒软件在 2021 年 5 月，对调度智能操作票系统进行检测，从检测结果可以看出，利用 C/S 构架实现的调度智能操作票 10 次试验均未检测到威胁，系统网络安全情况良好，符合巴彦淖尔供电公司网络安全要求。

3.2 实施 2：MySQL 数据库

QC 小组对 MySQL 数据库运行内存、所占硬盘、储存容量进行试验检查，检验是否符合设计要求，能否达到预期目标。2021 年 6 月 15—25 日进行试

表1 制定对策计划表

序号	对策	目标	措施
1	C/S架构	满足专用网络要求。平均加固成本 ≤ 500 元	确定防火墙级别；确定病毒识别系统对内部、外部输入的适用性
2	MySQL数据库	目前调控中心电脑为2012年采购，设备较为陈旧，设定1运行内存 ≤ 2 GB、所占硬盘 ≤ 500 MB；储存容量 ≤ 4 GB	建立数据表格；导入地区电网相关数据数据
3	VB编程语言	人员学习培训时长 ≥ 20 学时	确认系统功能；采用VB语言对操作票系统进行设计、处理、实现；实现数据库的连接
4	Microsoft Visual Basic开发环境	功能开发行数 ≤ 25 行	对开发环境进行测试使其具备编程条件；实现模糊查询功能的程序设计
5	程序化算法	调度任务生成速度 ≤ 2 s/张	对调度任务生成速度进行测试；实现调度任务生成算法
6	智能识别功能	对停电、送电程序票的操作顺序识别正确率均不低于99%	设计文本挖掘方法；实现对输入时间的智能化排序；校验停送电程序票识别排序成功率
7	联动生成功能	调度操作票编写时长 ≤ 1 min/张	设计调度操作票、监控操作票的UI界面；采用VB语言编写监控单项操作票程序代码；分别统计编写若干份调度操作票时长
8	专家校验功能	校验成功率 $\geq 99\%$ ；校验时长 ≤ 5 s/张	设计系统校验UI界面；采用VB语言对功能进行编程设计
9	总体设计、调试和论证	操作票生成成功率 $\geq 99\%$	对各功能模块进行组装、调试；功能校验

验统计，经试验分析，MySQL数据库数据更新基本完成，对MySQL数据库容量进行检查统计，统计结果均符合要求，目标达到。

3.3 实施3：VB编程语言

QC小组根据预想功能运用VB编程语言对调度监控操作票系统进行软件开发，将VB编程语言学习时长进行统计，检查是否符合设定目标。2021年1月1日—7月14日，统计了系统研发前VB编程学习时长和系统研发时VB编程语言学习时长，其结果为：其中系统研发前人均VB编程学习时长为22.2 h，系统研发时人均VB编程学习时长达到了41.8 h，经试验分析运用VB编程语言，人员培训时长为64学时，编程语言选择VB编程目标达成。

3.4 实施4：Microsoft Visual Basic开发工具

小组对实现模糊查询功能运用Microsoft Visual Basic开发工具所需要的行数进行检查，与目标值15行进行比对。2021年7月25日，小组对开发工具选择Microsoft Visual Basic实现的模糊查询功能代码，代码总行数12行，小于目标值15行，目标达成。小组统计了2021年7月15—19日Microsoft Visual Basic开发工具实现的调度智能操作票系统各

功能使用后是否存在衍生代码情况，并进行验证，试验结果显示，停送电程序票功能、联动生成调度操作票功能、校验功能均未有衍生代码出现^[3]。

3.5 实施5：任务调度算法

对实现的任务调度算法进行试验检查，检查调度任务生成速度是否小于或等于2 s/张。2021年7月对利用任务调度算法生成的调度任务进行统计，从试验结果看，任务调度算法生成调度任务平均用时1.82 s/张，快于目标值的2 s/张，对策目标实现。

3.6 实施6：停送电程序票智能识别功能

停电程序票和送电程序票生成顺序不一样，须要智能识别是停电程序票还是送电程序票，停电程序票须要按照时间顺序来生成，送电程序票按照停电程序票逆顺序来生成^[4]。（1）为调度员使用方便，停电程序票须按照时间顺序生成，同一时间的任务，根据任务重要性进行排序；（2）送电程序票需要按照停电程序票逆序生成，逆顺序生成的送电程序票，只有少数任务须修改，加快送电程序票编写效率。2021年7月对智能生成的停送电程序票成功率进行统计，从试验结果看，智能生成程序票正确率为99.35%，高于目标值的99%，对策目标实现。

3.7 实施7：联动生成调度操作票

2021年8月1—30日，QC小组根据预想设计的要求，成功实现依据程序票联动生成调度操作票的功能。QC小组将30天由程序生成的调度操作票编写时间进行了统计，统计分析得到调度操作票编写时间为0.91 min/张，小于目标值。调度智能操作票系统不仅可以顺利实现程序生成停送电程序票，而且缩短了每张调度监控操作票编写时间。

3.8 实施8：专家校验功能

2021年9月1—15日，QC小组实现调度监控操作票系统识别校验功能，实现由人工校验到程序校验的飞速转变。利用专家校验方法对150张程序票进行试验，检查专家校验程序票的成功率和时长，经过试验，专家校验停送电程序票准确率为99.3%，平均检验时长2.59 s/张，符合要求，目标实现。小组还对专家校验的质量进行试验，与人工校验结果条数进行比对，经过试验，专家校验结果条数大于人工校验结果条数，证明专家校验方式在校验过程中考虑问题更加周密，结果更具参考性，专家校验质量高于原始的手工校验方式。

4 总体设计、调试和论证

小组对调度智能操作票系统各项功能的实施过程进行了总体设计组装^[5]。首先，输入计划停电检修申请内容，通过程序化算法生成调度操作任务，从而快速拟写调度操作票，经过智能识别后，采用联动生成的方式生成调度操作票，后经专家校验模块对操作票进行审核无误后，即可打印执行。小组对人机交互界面进行设计，设计效果如图4所示。



图4 调度操作票系统人机交互界面

其主要设计思路如下：

数据库的建立。（1）地区变电站数据维护，其

涵盖了地区电网内全部变电站及风光电站中的所有设备间隔数据以及历史备份数据；（2）间隔数据维护，所有变电站所有间隔都须进行数据录入，包括220 kV、110 kV、35 kV、10 kV线路间隔，将所有间隔数据库录入目的是方便后期调取和使用；（3）历史备份数据维护，历史备份数据库建立的目的是将编写的历史数据进行保存和留档，方便有类似停电任务时直接调取任务。

任务模块调度的构建。将停电程序票编辑区的停电目的调入到任务处理区，调入的处理任务优先级排序通常采用停电时间，然后采用调度算法处理调度任务。当检修申请票比较多时，合理地选择调度任务可以提高效率，并确保处理数据的可靠性。

文本挖掘。程序票生成之后，要根据生成的程序票运用自然语言处理停电程序票内的文字信息，进行文本挖掘。生成调度操作票和监控单项操作票。调度生成倒闸操作票信息包括站名（运维主站+变电站名称）或直调用户站名：编号（八位数令号）、任务名称、指令形式（综合令或具体令）、操作顺序或要求。

人机交互界面设计。人机交互界面设计包括调度停送电程序票、监控停送电操作票、调度停送电操作票等交互界面，方便后期维护和调试，还须为调试人员做调试界面，方便调试。

最后，小组邀请生产技术部、安全监察部参与了调试环节，小组对2021年9月20—29日的调度智能操作票系统操作票生成成功率进行跟踪统计，统计结果显示生成成功率均满足要求，目标达成。

5 效果检查

目标检查。2021年10—12月，QC小组跟踪统计了采用智能系统拟票方式的调度操作票编写时长，时长对比结果显示采用智能系统编写调度操作票的时长为0.93 min，小于1 min，目标实现。经济效益。该软件是由一线员工设计架构，代码编写，软件测试，完全满足实际工作要求，很大程度节约了开发成本。时间效益。采用智能程序化防误倒闸操作票系统后，调度、监控倒闸操作票将根据程序票联动生成，写票时间占比缩短一半以上，效果明显。社会效益。提高写票效率不仅可以缓解调度员

工作压力，还为调度员和监控员进行电网安全监视、电网安全检查争取时间，为及时寻找电网隐患和不稳定因素提供有利条件，将事故扼杀在萌芽状态，保障电网安全稳定运行，减少对外停电时间，保障居民、生产稳定用电。同时，写票时间缩短，由于调度员写票慢而导致的延迟送电现象将不会发生，更能保证送电及时性，为居民用电和企业用电保驾护航。

6 结论

本次 QC 活动在电网结构日益强大，管辖设备日益增多，调度员工作繁重的背景下，采用一种智能操作票编写系统，实现快速、准确出票，可满足局域网使用和传输的要求，提高了写票效率，缓解了写票压力，总结创新点如下：（1）采用智能出票系统，取代原始的人工出票方式，缩短出票时间，提高出票准确率；（2）该调度智能操作票系统，不同于调控一体化系统，更符合地区电网需求，且不受限于调控一体化系统更新换代的发展；（3）该智能操作票系统，无须连网运行，更能保证网络安全要求，且可实现区域网传输，满足使用要求；（4）针对缩短调度操作票编写时间，利用程序化算法和

VB 语言编程技术，研制了调度智能操作票系统，解决了出票慢、出票错误率高的难题，缩短了写票时间；（5）调度智能操作票系统缩短写票时间，减少调度人员写票压力，调度智能操作票系统利用程序化算法实现程序出票快速拟写，采用联动生成方式快速编写调度操作票，最后利用专家校验功能使得出票成功率高于 99%。

参考文献

- [1] 王冠, 王胜男. 一种基于决策支持系统的智能化电网调度操作票系统研究[J]. 东北电力技术, 2020, 41(04): 19-22.
- [2] 陈素芳, 王凯. 基于多智能体的电网操作票自动生成系统[J]. 电力系统自动化, 2008, (397): 49-53.
- [3] 孙哲锋. 基于Excel应用的电网调度操作指令自动拟写方案[J]. 科学技术创新, 2018, (28): 59-60.
- [4] 徐伟, 徐泰山, 胡昊明, 等. 适用于调度计划滚动更新的安全校核计算策略研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(02): 10-14.
- [5] 陆增洁, 汪诗怡, 柴俊, 等. 基于人工智能识别电系操作指令票系统的应用研究[J]. 电气应用, 2022, 41(03): 49-55.

作者简介

孔宪佐 (1989—), 男, 工程师, 从事电力调度、输电线路方面的工作。

苏普春 (1993—), 男, 工程师, 从事电力调度方面的工作。

(责任编辑: 刘艳玲)

(上接第 47 页)

4 结论

利用分段线损在线用电监测仪, 可以实现对低压台区线损进行实时监测, 有效支撑线损治理、窃电核查等电力营销工作的开展, 全方位降低管理线损, 靶向性降低技术线损, 对高损台区治理提供溯源分析。同时, 可以指导合理规划配电变压器布点降损, 配电变压器的分布情况进行合理规划, 尽量安排在负荷中心, 以缩短低压供电半径。辅助选择适当的配电线路导线截面, 使电流以经济电流密度运行, 对于低压系统的导线截面, 尝试进行线路改造, 改善用户侧电压质量, 减少低压电线路损耗。

参考文献

- [1] 李旭, 周有庆, 张晶. 基于通用分组无线业务的配电网线损监测装置[J]. 供用电, 2007, 118(1): 68-71.
- [2] 侯文东. 基于电力物联网的台区精益管控模式应用[J]. 中国高科技, 2022, 123(15): 133-134+145.
- [3] 江若嘉, 张立颖, 何健宁, 等. 基于关口表节点数据监测

的电量线损监测系统研究[J]. 东北电力技术, 2018, 39(07): 9-12.

- [4] 陈惠强, 钦伟勋. 基于海迅实时数据库的配电线路实时线损监测工具[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(51): 32-36.
- [5] 孟超. 基于物联网的线路线损精细化管理与快速定位技术研究与应用[J]. 物联网技术, 2016, 6(07): 104-105.
- [6] 高九千方. 利用移动用电监测仪有效降低低压台区线损率[J]. 农村电气化, 2020, 395(04): 64-67.
- [7] 张自强, 姚长征, 延亮. 配网公变台区运行效率效益监测工具研究与实现[J]. 电工技术, 2019, 488(02): 66-68.
- [8] 李海铎, 杨建万, 李坤, 等. 数据校核与校正算法实现电网线损监测研究[J]. 信息技术, 2020, 44(08): 55-59+64.
- [9] 赵庆峰. 拓展用电信息采集系统高级应用[J]. 农村电气化, 2014, 326(07): 47-48.
- [10] 赵建保. 利用电力负荷管理系统进行线损分析[J]. 电力需求侧管理, 2008, 53(03): 66-67.
- [11] 张见超. 基于大数据下的配网同期线损监测分析[J]. 大众用电, 2016, 31(12): 20-21.

作者简介

蔡潇 (1991—), 女, 技师, 从事电力营销技术研究工作。

(责任编辑: 袁航)

光伏发电可变端点最优轨迹法的最大功率点跟踪新策略研究

王映斐

(国家电网公司上海市南电力(集团)有限公司, 上海 青浦 201799)

摘要: 光伏发电系统极易受外界条件的影响而出现电压波动及谐波, 并且由于其时变、非线性、多变量的特性, 传统最大功率点跟踪(MPPT)算法无法兼顾追踪速度和稳态振荡的问题, 文章提出了可变端点最优轨迹法, 构造电能泛函以及光伏数学模型下的电压靶线函数, 利用取极值的基本条件找出能达到最大功率的电压最优轨迹, 然后利用模型参考自适应理论将最优轨迹的电压作为参考模型, 实际输出电压作为可调模型, 最终使对象输出电压完全跟踪最优轨迹电压, 改进了传统电导增量法中的稳态振荡问题, 通过青浦区金山荣美光伏发电项目的各项参数作为仿真参数, 证明了系统控制效果理想, 动态响应速度更快, 稳态误差更小, 被控对象具备良好的动、静态性能, 提高了光伏发电的效率。

关键词: 光伏系统; MPPT 算法; 可变端点; 最优轨迹

中图分类号: TM727

Research on the Application of Variable Endpoint Optimal Trajectory Method to Track Maximum Power Point of Three-phase Photovoltaic Grid Connected System

WANG Yingfei

(State Grid Corporation of China Shanghai Shinan Electric Power (Group) Co., Ltd., Shanghai Qingpu 201799, China)

Abstract: The photovoltaic power generation system would generate the voltage fluctuation and the harmonic since it can be easily affected by external conditions and traditional maximum power point tracking can not balance the problems of tracking velocity and steady state oscillation. In this paper, variable endpoint optimal trajectory is used to track Maximum power point of Three-phase Photovoltaic Grid Connected System by constructing electric power function and voltage target line function. And then extremum condition is used to optimal trajectory of the voltage. At last, the output voltage must track the optimal trajectory voltage by Model Reference Adaptive System. In Model Reference Adaptive System, the optimal trajectory voltage is the output of the reference model. Finally, the output voltage of the object can fully track the optimal trajectory voltage. At last the simulation shows that the ideal effect, the faster dynamic response speed, the smaller steady-state error and the good dynamic, static performance of the object.

Keywords: photovoltaic grid-connected system; MPPT; variable endpoint; optimal trajectory method

当今社会对能源的需求量逐渐增大, 不可再生资源被不断发掘和利用, 能源危机也日益紧迫。人们发现最有前景的仍然是可持续、清洁的可再生能源。光伏电池具有非线性特征, 且易受到外界环境的影响使得光伏电池无法稳定运行在最大功率点处, 需要研究最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)技术, 以减少功率损耗。

在缺乏 MPPT 算法的控制下, 光伏系统输送能量的效率会降低, 如果它处在阴影遮盖的环境当中, 选用了不适当的 MPPT 算法, 同样会使得算法的收敛速度降低、追踪精度下降, 使光伏系统无法实时

收稿日期: 2023-03-01

地追踪到最大功率点, 使得整个系统的发电效率难以保障。

目前常用的 MPPT 控制算法有基于参数选择的恒定电压法、基于采样数据的扰动观察法(P&O)^[1]和电导增量法(INC)^[2], 以及传统变步长扰动观察法和电导增量法等^[3-5]。恒定电压法的控制方法易于实现, 但忽略了温度和光照的影响^[6]。短路电流比例系数法与恒定电压法原理相似, 但是此时的光伏电池部件并没有真正工作在最大功率点^[7-9]。同时为了测试短路电流, 须将光伏电池短路。因此, 可知此类方法的追踪精确度比较低, 并且没有真正跟踪到最大功率点。传统的跟踪方法如电导增量法、爬

山法、扰动观察法等^[10-12]，这些方法简单容易实现，在理想光照条件下跟踪精度尚可，但在实际环境中出现阴影遮挡时，光伏阵列的 $P-U$ 曲线呈现多峰现象，传统的 MPPT 算法容易陷入局部极值点，而非真正的最大值点^[13-14]。电导增量法稳态精度高，但追踪速度和稳态精度依旧难以兼顾，变步长电导增量法在一定程度上改善了这个问题，但系统在最大值附近会反复波动^[15-18]。不少学者基于电导增量法做出改进，在变步长的基础上增加了对跟踪比例系数的控制，但是这个方法对跟踪比例系数的选择有要求，追踪速度和稳态精度也并未达到最优。

也有不少学者采取人工智能算法进行跟踪控制，文献 [18] 通过在粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 基础上加入自适应变异粒子，提高了算法控制精度，但算法的跟踪时间较长导致损耗较大。文献 [21] 将粒子群算法与电导增量法相结合进行协调控制，提高了算法控制效率并降低了硬件成本，但在复杂环境下跟踪效果不太理想。随着更多新颖算法的发展，许多学者也将智能算法应用到光伏 MPPT 控制算法中。文献 [22] 利用 BP 神经网络预测最大功率点，但是 BP 神经网络需要大量数据计算，导致运行效率低，增加工业成本。文献 [23] 利用改进粒子群算法实现阴影情况下的最大功率点跟踪，但是该方法很容易陷入局部峰值。这些智能算法控制策略复杂，不易于工业上的实现。

1 光伏电池模型及阵列特性

1.1 光伏电池电路模型及数学

当有光照出现时，根据光伏特效应光生电流 I_{ph} 出现并分为 3 部分，分别是经过二极管 VD 的暗电流 I_D 、流入旁路电阻 R_{sh} 的旁路电流 I_{sh} 以及输出电流 I ，如图 1 所示。

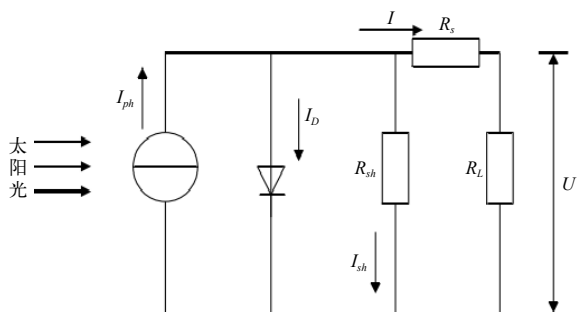


图 1 光伏电池等效电路模型

光伏电池的等效电路由恒流源、二极管和 3 个电阻构成，对等效电路模型利用基尔霍夫定律可得^[19-20]：

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(U + R_s I)}{AKT}\right) - 1 \right] - \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中： I 为光伏电池的输出电流； I_{ph} 为光伏电池的光生电流； I_s 为光伏电池二极管反向导通时的一个饱和电流； q 为电子的电荷量； U 为光伏电池的输出电压； R_s 为光伏电池数学模型中的串联阻值（该数值很小，可以近似取值为 0）； R_{sh} 为光伏电池模型中的并联电阻值； K 为一个固定不变的常数，在计算时使用的是玻尔兹曼常数，一般取 $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； A 为 $P-N$ 结的曲线常数； T 为光伏电池温度。

1.2 光伏阵列特性

温度固定于标准常温下 ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)，系统设定光伏电池所受的光照强度 S 分别为 1000、750、500、250 W/m^2 时，得到光伏电池的 $U-I$ 输出特性曲线如图 2 所示，其 $P-U$ 输出特性曲线如图 3 所示。

根据图 2 特性曲线可以了解到，在标准温度条件下，尽管光照强度差异较大，但是开路电压 U_{oc}

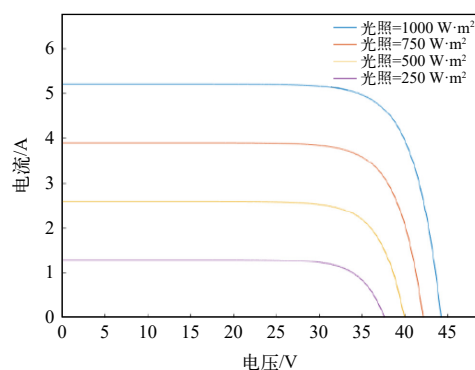


图 2 不同光照强度下光伏电池 $I-U$ 特性曲线

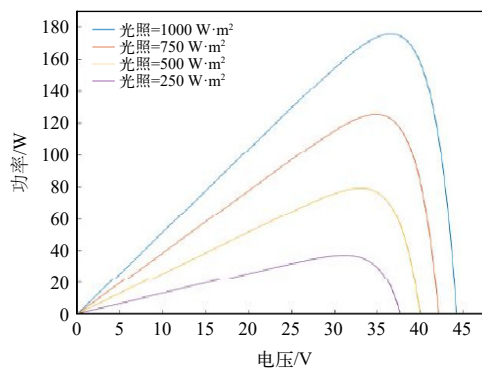


图 3 不同光照强度下光伏电池 $P-U$ 特性曲线

数值的不同却比较小，但是只局限在一定范围之内，电压随着光照强度的改变，发生的变化较小，光伏电池短路电流 I_{sc} 数值随着光照强度的上升明显增长。

根据图3，光伏电池 $P-U$ 特性曲线可以了解到，光照强度改变会给光伏电池的最高功率点的功率数值造成较为显著的影响。随着光照强度的增加，光伏电池最大输出功率显著增长。

从图4中可以看出，虽然随着光照强度的增大，其最大功率也在发生变化，但是，最大功率点处的电压变化范围较小，基本上都处于图中红色虚线两侧，那么在光照强度发生突变时，可以先将其电压迅速固定于红色虚线，即大概的最大功率点处^[24-25]。

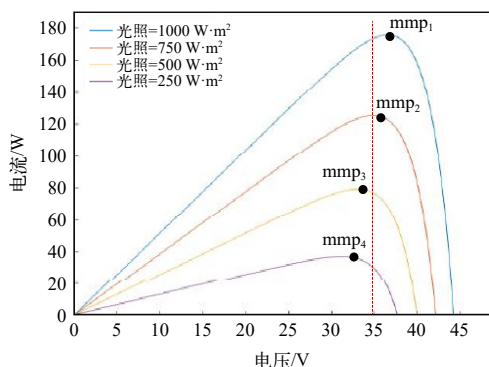


图4 不同光照强度下的光伏系统输出 $P-U$ 曲线图

2 升压式变换电路

Boost 升压变换器是一种开关直流升压电路，其工作原理为通过控制开关管的导通角，进而使输出电压高于输入电压。Boost 电路拓扑图如图5所示。

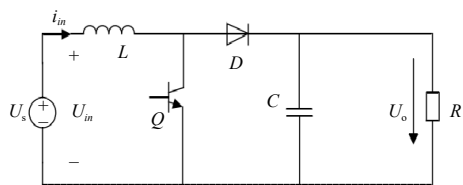


图5 光伏发电系统 Boost 电路拓扑结构

Q 为功率开关管，其开关导通占空比为 d ，周期为 T 。当 Q 处于导通状态时，负载由电容 C 提供能量，电感 L 储存电能， L_i 呈线性增大。当 Q 处于截止状态时，整个电路由 U_s 进行充电，此时二极管 D 处于导通状态，负载由电感 L 和电源 U_s 共同供电，输出电压 U_o 数值大小与电感自感电动势与输入电压之和大小相等，变换电路起升压作用。

3 可变端点最优轨线法

因为传统的电导增量法的平衡条件 $\frac{I}{U} + \frac{dI}{dU} = 0$ 较难达到，因此在系统运行至距离最大功率点较近的位置，就会出现持续振荡的现象，能量损失较大，经济性较低。其问题还有步长难以确定，步长选取的过大或过小都会使系统造成一定的功率损失。当步长选取过大时，可能会造成光伏系统工作点在最大功率点处振荡的现象；当步长选取过小时，光伏系统追踪到最大功率点处的速度就会降低，所以步长的选取就成为一个比较困难的问题。并且无法防止外界环境如光照强度或温度突变后产生的大幅振荡的问题，极易造成能量损失，稳定性较低。光伏系统电导增量法振荡示意图如图6所示^[26-30]。

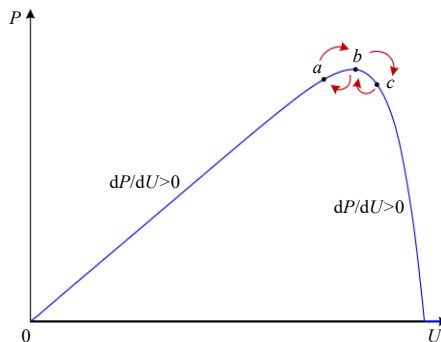


图6 光伏系统电导增量法振荡示意图

本文将最大功率点跟踪问题转化为求取性能泛函极值的可变端点最优电压轨线，将上一个时刻的输出电压值设立未始端状态 $U_0(t_0)$ ，寻找一条连续可微的极值轨线，由给定始端 $U_0(t_0)$ ，到达给定终端约束曲线 $U_0(t_f) = C(t_f)$ 上时，使电能性能泛函 $W(U_0) = \int_{t_0}^{t_f} P[\dot{U}_0, U_0, U_0] dt$ 取极值，即沿最优极值轨线，快速直接地到达最大功率点。避免了在系统运行至距离最大功率点较近的位置，出现的持续振荡的现象，并且在更短的时间内具有更好的动态性能，如图7所示。

4 模型参考自适应电压跟踪法

模型参考自适应系统 (model reference adaptive system, MRAS) 构造两个不同的参考模型和可调模型，模型输出为同一变量。本文将终端横截条件 U_0^* 作为参考模型，实际输出电压 U_0 最终实时跟踪

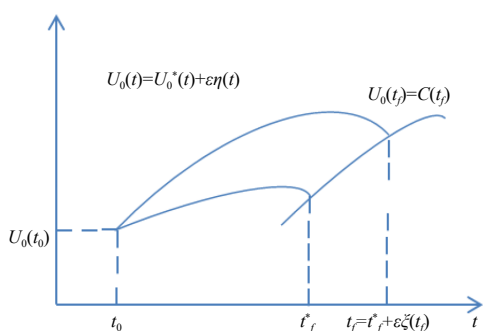


图7 可变端点最优电压轨线法示意图

U_0^* ，如果两个量不一致，将两个模型输出量的差值 ΔU_0 用一个自适应 PI 机制来修正占空比 d ，负载输出电压跟踪参考模型的系统示意图如图 8 所示。

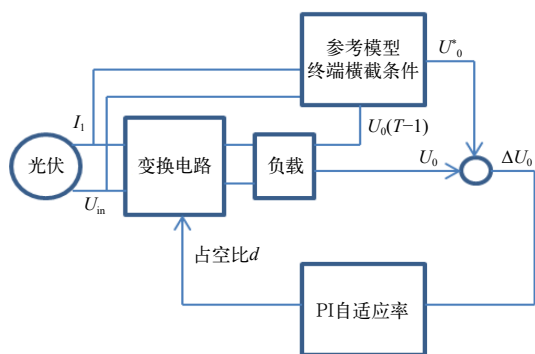


图8 模型参考自适应系统示意图

5 案例仿真分析

本文使用青浦区金山荣美光伏发电项目作为仿

真案例。其中，系统设置 Boost 升压电路的输入滤波电容 $C_1 = 100 \mu\text{F}$ ，输出滤波电容 $C_2 = 300 \mu\text{F}$ ，电感 $L = 1 \text{ mH}$ ，负载电阻 $R = 30 \Omega$ ，MRAS 自适应机构 PI 调节器参数为 $K_p = 1.98$ 、 $K_i = 4500$ ，为基于 Simulink 软件平台搭建的可变端点最优轨迹的最大功率点跟踪法仿真模型图如图 9 所示。

为了观察本文最大功率点跟踪算法的动静态性能，设置光伏系统的温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，初始光照强度为 600 W/m^2 ，在 0.2 s 时光照强度升至 800 W/m^2 ，在 0.4 s 时光照强度从 800 W/m^2 升至 1000 W/m^2 ，在光照强度突变的情况下用传统的电导增量法的最大功率跟踪结果与本文提出的可变端点最优轨迹法对比，得到其仿真输出波形图如图 10、图 11 所示。

本文在光照强度与温度同时突变的情况下对比两种算法的跟踪效果，初始温度设为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ，在 0.2 s 时温度降至 $37 \text{ }^\circ\text{C}$ ，在 0.4 s 时温度降至 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，初始光照强度为 600 W/m^2 ，在 0.2 s 时光照强度升至 800 W/m^2 ，在 0.4 s 时光照强度从 800 W/m^2 升至 1000 W/m^2 ，得到其仿真输出波形图如图 12 所示。

从仿真图 13、14 可以看出，在初始时刻时，使用传统变步长电导增量法的光伏电池，其跟踪到 MPP 的时间为 0.02 s ，而使用改进后的算法下的光伏电池，其跟踪时间只需要 0.01 s ，跟踪速度提升了 50% 。当外界光照强度发生变化时，传统电导增量法振荡比较明显，振幅较大，振荡时间持续了

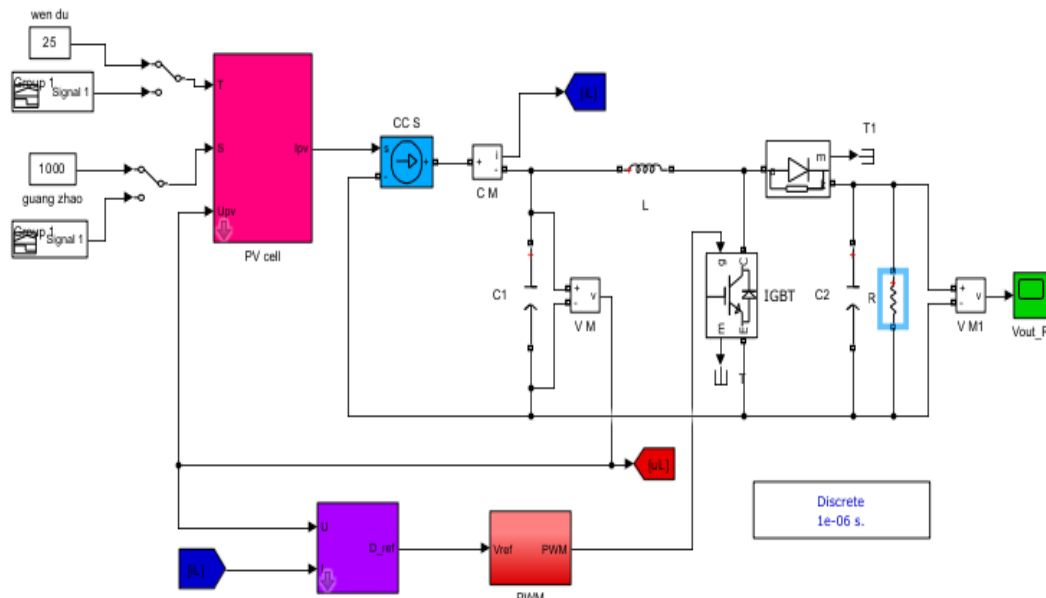


图9 可变端点最优轨迹法仿真模型

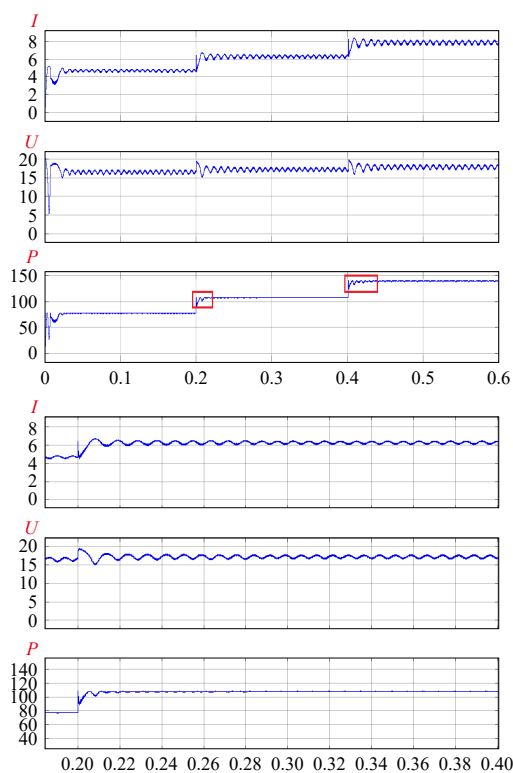


图 10 传统的变步长电导增量法

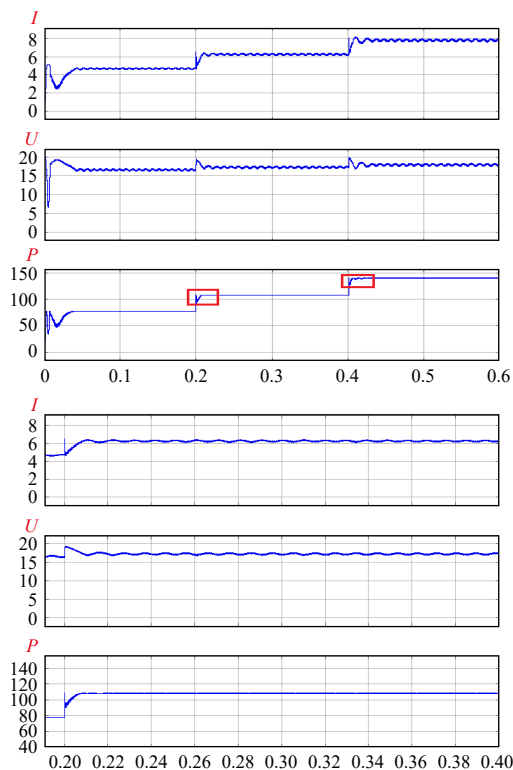


图 11 可变端点最优轨迹法

0.022 s, 改进后的算法振荡幅度更小, 振荡时间为 0.012 s, 相比之下振荡时间减少了 40%, 从而减少

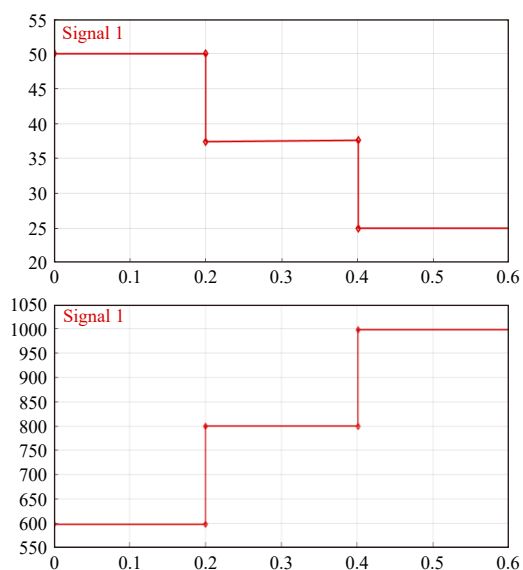


图 12 温度以及光照强度变化输入信号

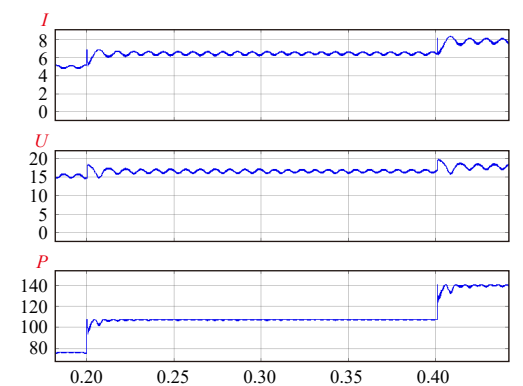


图 13 传统的变步长电导增量法

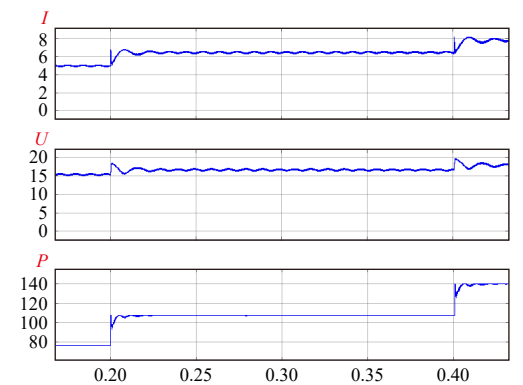


图 14 本文可变端点最优轨迹法

了能量的损耗。

6 结束语

本文提出的可变端点最优轨迹的最大功率点跟踪法, 通过青浦区金山荣美光伏发电项目作为仿真

案例,从仿真结果可以看出,本文提出的新算法相比于传统的变步长电导增量法,改进后的算法虽然仍存在一定的振荡,但是跟踪速度加快,缩短了振荡的时间。当光照强度或者外界温度发生突变,使光伏系统受到扰动时,其工作点能够更加平稳,振荡更小地跟踪到新的最大功率点,其抗干扰能力更强,电能的损耗也更小,光能的利用率更高,系统控制效果理想,动态响应速度更快,稳态误差更小,经济性更高,跟踪性能更好,被控对象具备良好的、静态性能,提高了光伏发电的效率。

参考文献

- [1] 华陈君. 电气节能中光伏新能源的应用[J]. 电工技术, 2019,(24): 130-131.
- [2] Pala Y. An Analytical Method for Solving General Riccati Equation[J]. Universal Journal of Applied Mathematics, 2017,52(2): 11-16.
- [3] Toledo F J, Blanes J M, Galiano V. Two-step linear least-squares method for photovoltaic single-diode model parameters extraction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018,65(8): 6301-6308.
- [4] 江波, 李振家. MPPT算法在光伏发电系统中的应用研究[J]. 能源与环保, 2017,39(12): 95-99.
- [5] Mahmoudinezhad S, Qing S, Rezaniakolaei A, et al. Transient Model of Hybrid Concentrated Photovoltaic with Thermoelectric Generator[J]. Energy Procedia, 2017,142: 564-569.
- [6] Park Jeong Eon, Lee Byoung Hee. Design on Algorithm of Power Control Unit for Charging Satellite Battery[J]. Journal of Satellite, Information and Communications, 2017,12(4): 95-99.
- [7] Moma C, Ppbb C, App B, et al. Design of experiments using artificial neural network ensemble for photovoltaic generation forecasting - Science Direct[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135.
- [8] Zenghui D, Guangbu Li, University SL. Design of maximum power point tracking controller applied to photovoltaic power generation system[J]. Modern Electronics Technique, 2019.
- [9] Lijun, ZHANG, Samson. An online maximum power point capturing technique for highefficiency power generation of solar photovoltaic systems[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2019.
- [10] 赵靖. 基于变步长增量电导法的光伏发电系统MPPT控制[D]. 重庆大学, 2014.
- [11] Ai Yongle, Liu Qunfeng, Han Chaoyang, et al. Photovoltaic MPPT strategy based on improved perturbation and observation method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020,53(4): 339-344.
- [12] 邱草非, 张春刚, 仲泽坤, 等. 基于扰动观察法和电导增量法的光伏发电系统MPPT算法研究综述[J]. 中国电力, 2017,50(3): 154-160.
- [13] Azeem I, Baig M, Uddin M H. A Strategy to evaluate MPPT techniques[C]//2018 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification(ACEPT), 2018.
- [14] Liu Zhiqiang, Wang Tao. Real-time safety assessment method of driving behavior based on improved TOPSIS[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021,35(11): 58-66.
- [15] 李明. 基于电导—扰动观察双模式的 MPPT 研究[J]. 电气传动, 2018,48(8): 60-64.
- [16] 冷明全, 程为彬, 刘峰, 等. 光伏发电系统前级宽输入 DC/DC Boost变换器[J]. 电气传动, 2020,50(3): 37-39.
- [17] 郭航辰. 基于电导增量法的光伏 MPPT控制策略研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.
- [18] Xu Yitao, Jiang Jishun, Zhang Zongchao, et al. Photovoltaic maximum power tracking based on improved particle swarm optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2019,19(34): 180-185.
- [19] 闫志威, 王志和, 李靖. 基于双指数函数变步长电导增量法改进的光伏最大功率跟踪控制策略[J]. 科学技术与工程, 2020,20(24): 9904-9910.
- [20] 韦雪菲, 卢泉, 龙军, 等. 相同参数不同形状局部阴影对光伏阵列输出特性的影响[J]. 太阳能学报, 2021,42(2): 438-444.
- [21] Bollipo R B, Mikkili S, Bonthagorla P K. Hybrid, optimal, intelligent and classical PV MPPT techniques: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021,7(1): 9-33.
- [22] Li Zhijun, Zhang Yinan, Wang Lijun, et al. Photovoltaic multipeak MPPT research based on improved quantum particle group algorithms[J]. Journal of Solar Energy, 2021,42(5): 221-229.
- [23] Danandeh M A, Sm M G. Comparative and comprehensive review of maximum power point tracking methods for PV cells[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,82(Pt.3): 2743-2767.
- [24] Anurag A. A review of maximum power-point tracking techniques for photovoltaic systems[J]. International Journal of Sustainable Energy, 2016,35(5): 478-501.
- [25] P. Acquistapace and F. Gozzi. Minimum energy for linear systems with finite horizon: a non-standard Riccati equation[J]. Mathematics of Control Signals and Systems, 2017,29(4).
- [26] 刘晓博, 郭中华. 光伏最大功率点跟踪变步长电导增量法的算法优化[J]. 科学技术与工程, 2018,18(13): 61-67.
- [27] Zhang P. Research on Photovoltaic Cell Model Characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(23): 6907-6909.
- [28] 王森, 杨超, 蒲阳, 等. 分段式自适应变步长爬山法在光伏系统MPPT中的应用[J]. 电力科学与工程, 2020,36(3): 38-44.
- [29] Pervez I, Antoniadis C, Massoud Y. A reduced search space exploration metaheuristic algorithm for MPPT[J]. IEEE Access, 2022,(2): 2169-3536.
- [30] Fan Yi, Lu Fan, Wang Wenxuan, et al. The improved time-sharing control strategy with maximum power point tracking algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(2): 607-614.

作者简介

王映斐(1987—),男,副高级工程师,研究方向为电力系统自动化、新能源发电并网控制、综合能源系统最优经济调度、综合能源系统运行优化配置策略等。

(责任编辑:张峰亮)

分布式综合能源系统装机配置研究

董淑梅, 张爱平, 李伟, 马兰芳, 刘静

(中国华电科工集团有限公司, 北京 丰台 100070)

摘要: 分布式能源作为综合能源系统的重要组成部分, 对“双碳”目标的有序推进起着十分积极的作用。文章以某大型商业综合体分布式能源系统为例, 通过对用户的冷负荷、热负荷和电负荷的分析, 以及对燃气发电设备、余热利用设备和调峰设备的比选, 最终制定出适合该分布式综合能源系统的装机配置方案, 在实现源网侧供能匹配的同时, 也进一步减少了企业的碳排放量, 帮助企业完成节能减排的目标。

关键词: 分布式综合能源系统; 热负荷分析; 冷负荷分析; 电负荷分析; 装机配置

中图分类号: TM764

Research on Installation Configuration of Distributed Integrated Energy System

DONG Shumei, ZHANG Aiping, LI Wei, MA Lanfang, LIU Jing

(China Huadian Engineering Company Limited, Beijing Fengtai 100070, China)

Abstract: As an important part of the integrated energy system, distributed energy plays a very positive role in the orderly promotion of the "Carbon peak and Carbon neutrality" goal. In this paper, a large commercial complex distributed energy system is taken as an example, through the analysis of cooling load, heating load and electricity load of users, as well as the comparison and selection of gas-fired power generation equipment, waste heat utilization equipment and peak shaving equipment, the installation configuration scheme suitable for the distributed energy system is finally formulated, which not only realizes the matching of energy supply on the source side, but also further reduces the carbon emissions of enterprises. Help enterprises to achieve the goal of energy saving and emission reduction.

Keywords: distributed integrated energy system; heat load analysis; cooling load analysis; electrical load analysis; installed configuration

北京大学能源研究院、中国城市燃气协会分布式能源专业委员会与社会科学文献出版社联合发布的《燃气分布式能源产业报告(2022)》中指出, 在“双碳”背景下, 燃气分布式能源贴近消费端, 布局灵活、运营高效, 在提高能源利用效率、改变用能方式、节能减排方面具有重要作用, 有望与煤电、储能形成优势互补的格局, 助力构建新型电力系统^[1]。

可以看出, 以燃气为主的分布式综合能源系统, 在提高能源利用效率和节能减排等方面已得到了广泛的认可。

分布式综合能源系统立足于多能互补、能源梯级利用理论, 将2种或多种供能形式耦合起来, 就近向供能网络中集中供应电能、空调冷水、采暖热水等, 能有效地降低能源消耗。该系统因其能源综合利用效率高、清洁环保、经济节能等特点^[2], 在产业园区、商办楼宇、数据中心、酒店等不同场景中得到了广泛应用。

收稿日期: 2023-03-15

本文以某大型商业综合体能源站为例, 研究分析了基于能源综合利用的分布式综合能源系统的装机配置问题。

1 项目概况

该商业综合体涵盖了住宅、商业、写字楼、公寓、酒店等多元业态。分布式能源站主要满足该综合体一区、二区、三区的冷热电负荷需求。

2 项目负荷需求情况

冷热电负荷指标表如表1所示。

2.1 热负荷分析

该能源站承担了一区、二区、三区的全部热负荷。根据《燃气冷热电分布式能源技术应用手册》中逐时热负荷系数, 各区域的典型日负荷变化如图1所示。

由图1可以看出, 热负荷峰值出现在9:00—10:00。

表1 冷热电负荷指标表

建筑	面积/ m ²	冷指标/ (W·m ⁻²)	热指标/ (W·m ⁻²)	电指标/ (W·m ⁻²)
一区办公楼	111 174	80	50	30
二区商业	184 460	130	60	60
二区#1办公楼	26 137	80	50	30
二区酒店	62 714	90	60	40
二区#2办公楼	45 494	0	50	30
二区公寓楼	39 455	0	45	30
三区#1办公楼	197 334	80	50	30
三区#2办公楼	7 751	0	50	30
合计	674 519			

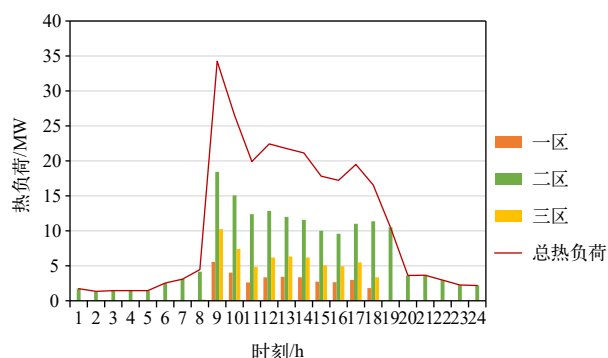


图1 典型日热负荷变化图

全年逐时热负荷、延时热负荷变化如图2及图3所示。

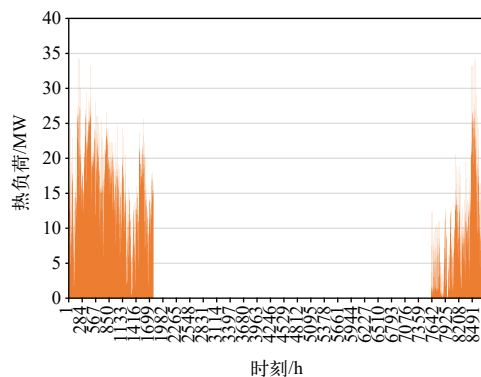


图2 逐时热负荷变化图

从图2和图3中可以看出，最大热负荷出现在每年12月和1月，最大热负荷为33.7 MW，全年平均热负荷为15.9 MW。

2.2 冷负荷分析

该能源站承担了一区、二区、三区的办公、商

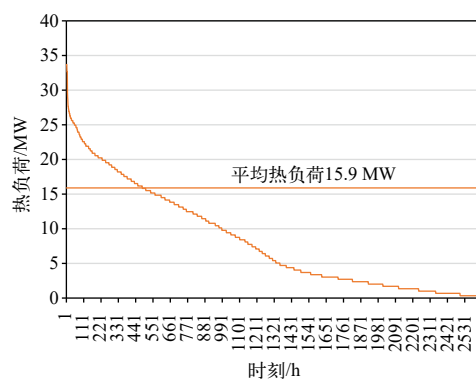


图3 延时热负荷变化图

业及酒店冷负荷。根据《燃气冷热电分布式能源技术应用手册》中逐时冷负荷系数，各区域典型日负荷变化如图4所示。

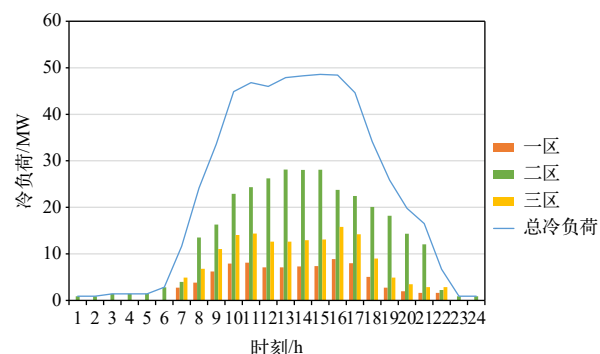


图4 典型日冷负荷变化图

由图4可以看出，冷负荷峰值出现在11:00—16:00。

全年逐时冷负荷、延时冷负荷变化如图5和图6所示。

从图5和图6中可以看出，全年最大冷负荷出现在7月，最大冷负荷为47 MW，平均冷负荷为14.6 MW。

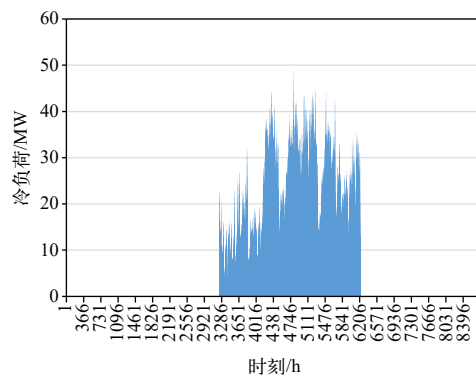


图5 逐时冷负荷变化图

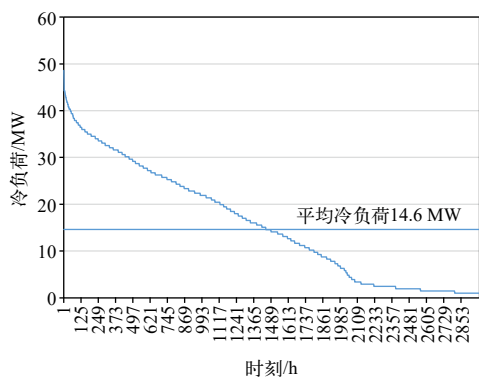


图6 延时冷负荷变化图

2.3 电负荷分析

根据《燃气冷热电分布式能源技术应用手册》中不同建筑功能的逐时电负荷系数，各区域不同季的电负荷变化如图7~9所示。

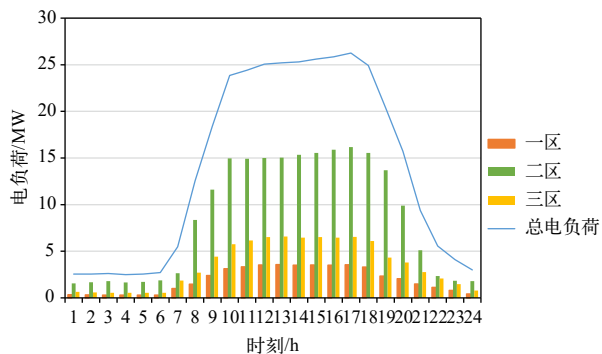


图7 制冷季典型日电负荷变化图

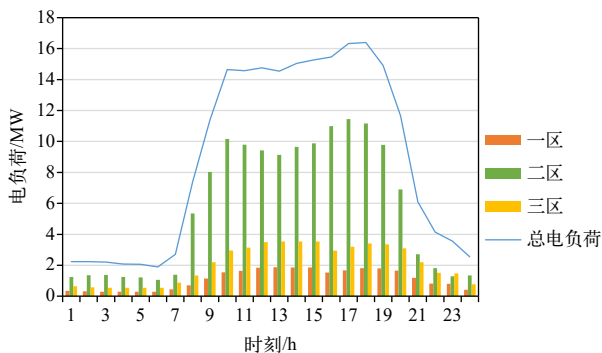


图8 过渡季典型日电负荷变化图

由图7可以看出，各区域制冷季电负荷需求主要集中在8:00—21:00，其中，一区制冷季最大电负荷约为3.3 MW，二区制冷季最大电负荷约为16.0 MW，三区制冷季最大电负荷约为6.2 MW，制冷季总最大电负荷约为25.8 MW。

由图8可以看出，各区域过渡季电负荷需求主要集中在8:00—21:00，其中，一区过渡季最大电负

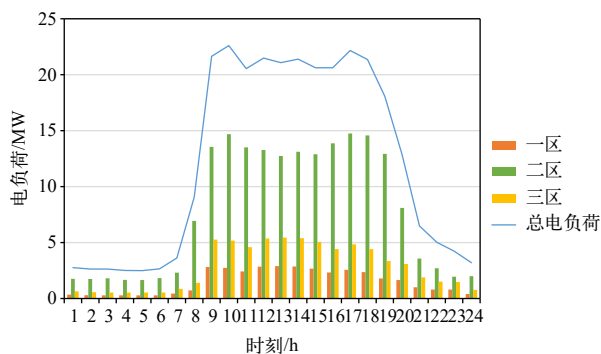


图9 采暖季典型日电负荷变化图

荷约为1.8 MW，二区过渡季最大电负荷约11.4 MW，三区过渡季最大电负荷约为3.5 MW，过渡季最大电负荷约为16.4 MW。

由图9可以看出，各区域采暖季电负荷需求主要集中在8:00—21:00，其中，一区采暖季最大电负荷约为2.9 MW，二区采暖季最大电负荷约为14.8 MW，三区采暖季最大电负荷约为5.4 MW，采暖季最大电负荷约为22.6 MW。

通过以上分析可知，该项目用电负荷主要集中在8:00—21:00；最大电负荷约为25.8 MW，能源站发电仅满足一、二、三区部分电力负荷需求，全部就近消纳，不足部分尚须从电网补充。

3 分布式综合能源系统装机配置

3.1 系统配置原则

遵循“并网不上网”和“欠匹配”的基本原则，机组满足设计稳定负荷，通过调峰设备满足最大负荷需求，保证整个系统始终处于高效状态，降低运行成本。

能源站附近有热电大网接入条件，采暖季采用附近热电大网热进行调峰。

3.2 主要设备选择

分布式综合能源系统主要由燃气发电设备、余热利用设备、冷热调峰设备及相关辅助设备构成。常涉及的发电设备有燃气轮机、燃气内燃机、微型燃气轮机、燃气外燃机以及燃料电池，其中燃料电池、燃气外燃机由于成本较高还未得到广泛应用，目前分布式综合能源系统中应用较多的发电机形式以燃气轮机、燃气内燃机和微型燃气轮机为主；余热利用设备主要有余热锅炉、余热吸收式溴化锂机组等设备；调峰设备主要有热水锅炉、电空调、直

燃机等形式。

3.2.1 燃气发电设备的选择

目前几种较为常用的燃气发电设备主要特点如表2所示。

表2 各燃气发电设备主要特点^[3]

指标	燃气轮机	燃气内燃机	微型燃气轮机
发电效率/%	27.0~39.0 (小型、微型)	30.0~45	20~28
综合效率/%	50~80	70~90	50~70
排热量/ 发电能力/ ($10^6\text{J} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$)	7.5~8.2	5.8~6.3	约8.4
单机容量/kW	1000~500 000	20~18 000	30~350
燃料供应压力	中高压	低压	中压
噪声	中	高(中)	中
排烟温度/℃	450~550	400~450	275~300

通过上表可以看出,燃气轮机单机容量较大,余热集中程度高,这种发电设备较适合用于以蒸汽为主的场合,本文分布式综合能源系统主要以空调冷热供能为主,输送距离短,在能源需求、系统装机及燃气供应方面均不适合采用燃气轮机。

微型燃气轮机是一种小型热力发动机^[4],其单机容量小,也不适合应用于本文分布式综合能源系统。

燃气内燃机发电容量适中,单机发电效率高,运行灵活且设备技术成熟,适用于本文分布式综合能源系统。

3.2.2 余热利用设备的选择

能源站的余热利用须综合考虑发电机组的种类、热效率、余热品质等参数。常见的工艺流程有发电机与余热机的直接连接和经过余热锅炉的间接连接。

间接连接的系统较为复杂,工艺也较适用于有一定蒸汽和热水需求的场合。直接连接的系统相对简化,占地较小,且由于减少了换热环节,热效率更高,更适用于直接供应空调冷热水的场合。

充分考虑余热利用的工艺和建筑冷、热负荷等因素,本文分布式综合能源系统余热利用设备最终采用直接对接的烟气热水型溴化锂机组,以确保达到较高的余热利用率。

3.2.3 调峰设备的选择

调峰设备主要用于在机组发电后,余热不能完全满足能源站制冷、采暖负荷需求的情况。

冷热调峰设备主要有锅炉热+电空调、直燃机等形式。

锅炉热+电空调系统最常规,系统投资少、运行稳定可靠,本文分布式综合能源系统由于有热电大网热,可替代锅炉热。

直燃机系统初投资较大,维护费用较高,制热工况效率与锅炉相差不大,制冷工况效率低于电空调,相比较而言,热电大网热+电空调系统综合效率更高、系统初投资及运行维护少,具有更明显优势,所以本文分布式综合能源系统调峰设备最终选择采用热电大网热+电空调的系统。

3.3 装机方案

根据以上分析和比选,本文分布式综合能源系统最终装机为:2台4.4 MW级内燃机+2台烟气热水型余热溴化锂机组(冷4310 kW/热4152 kW)+4台大离心式电制冷机组(9100 kW)+1台小离心式电制冷机组(4000 kW)+2台热网调峰换热器(17000 kW)。

4 效果分析

系统投运后,年平均天然气耗量为 $8.71 \times 10^6 \text{ Nm}^3$,年平均售电量为 $1.923 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h}$,年平均供冷量为 $1.5 \times 10^5 \text{ GJ}$,年平均供热量为 $1.7 \times 10^5 \text{ GJ}$,年平均能源综合利用率为79%,年平均 CO_2 减排量为15000 t。

由此可见,以燃气内燃机组、溴化锂机组、调峰换热机组和电制冷机组为主,构建的本分布式综合能源系统,因其靠近负荷侧、能源高效梯级利用等特点,与常规的集中式能源相比,在清洁高效方面更具优势,也更能助力国家节能减排事业的发展。

参考文献

- [1] 高志民. 燃气分布式能源:助力构建新型电力系统[N]. 人民政协报, 2023-02-23 (007).
- [2] 罗正意, 邵雪奎. 综合能源系统运行策略研究[J]. 资源信息与工程, 2021, 36(6): 122-128.
- [3] 林世平, 李先瑞, 陈斌. 燃气冷热电分布式能源技术应用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [4] 袁彦霞. 燃气发电设备的比选[J]. 能源与节能, 2012, 12: 65-71.

作者简介

董淑梅 (1985—), 女, 高级工程师, 从事综合能源系统设计工作。

(责任编辑:张峰亮)

基于智能巡检机器人的输电线路运维管理工作研究

黎文俊

(广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523120)

摘要: 输电线路人工巡检工作量大、风险较高、效益低, 严重影响了电网运行的安全效益和经济效益。研究从智能巡检需求出发, 设计一款适用于输电线路的全自主机器人, 配合驻留巢穴、越障桥及防震锤, 保障顺利跨障巡线。经现场检验, 全自主机器人巡线仅需十几 min, 故障识别可靠率达到96.4%, 实用效益显著。

关键词: 输电线路; 巡检机器人; 路径; 监测; 运维管理

中图分类号: TM726

Research on the Operation and Maintenance Management of Transmission Lines Based on Intelligent Inspection Robots

LI Wenjun

(Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Dongguan 523120, China)

Abstract: The manual inspection of transmission lines involves a large workload, high risks, and low efficiency, which seriously affects the safety and economic benefits of power grid operation. According to the requirements of intelligent inspection, design a fully autonomous robot suitable for transmission lines, combined with a resident nest, obstacle bridge, and shock hammer, to ensure smooth obstacle crossing inspection. After on-site inspection, the fully autonomous robot line inspection only takes more than ten minutes, and the reliability rate of fault identification reaches 96.4%, with significant practical benefits.

Keywords: transmission line; inspection robot; route; monitor; operation management

近年来, 我国已经加大了对输电线路运维管理工作的重视力度, 开始将直升机、无人机等应用到巡检工作中, 在一定程度上缓解了人工巡检压力。但受环境因素和技术因素限制, 直升机飞行路径单一, 巡检精度不够; 无人机续航时间相对较短, 手动操作时易损坏, 输电线路智能巡检效果并不理想^[1]。研究基于上述问题设计一款可自主巡检、智能跨障、动态监测的机器人系统, 支持 GPRS 定位、状态环境感知、图像数据采集、在线诊断评估及可视化展示, 为输电线路运维管理提供了有效参考。

1 需求分析

输电线路电压等级较高, 装置元件较为复杂, 机器人巡检难度较大。基于智能巡检机器人的输电线路运维管理工作开展时, 应严格把握安全性、可靠性、实用性及经济性指标, 如表 1 所示, 做好全自主巡检机器人的结构设计和功能优化, 使其快速、高效、优质地完成自主巡检及在线监测任务^[2]。

收稿日期: 2023-03-15

表 1 设计要求

设计要求	性能指标
安全性	符合高压智能巡检安全标准, 不可对线路、结构等安全等级产生影响
可靠性	硬件选型合理、软件功能完备, 基础层、通信层、站控层协同效果良好, 整机系统具有稳定的性能
实用性	根据任务需求配备传感器设备、图像采集装置等, 设备须便于安装、更换, 同时留有空间和接口; 人机界面友好, 易于运维人员操作
经济性	要在稳定性、实用性前提下合理调配, 减少成本投入

2 系统设计

2.1 系统架构

本次设计的全自主巡检系统主要运用在输电线路运行状态诊断工作中, 包括机器人本体、控制终端和辅助装置 3 部分, 如图 1 所示。

2.2 本体结构

全自主机器人为箱体搭载云台结构, 箱体中包

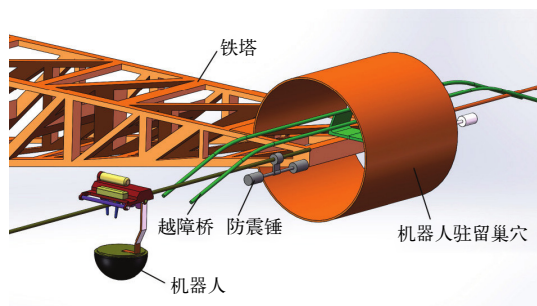


图1 全自主巡检系统

括步进电机、伺服控制器、PLC控制单元等；云台上可安装继电器、传感器、摄像头等^[3]。

控制箱。箱体下侧安装1组导向轮，用于在输电线路滚动行走；外侧设置一对机械爪，用于跨越障碍物；内部安装步进电机、伺服控制器、PLC控制单元等，可接收控制终端指令，按照要求定点启/停、前进/后退等。

载物云台。云台上设置360°高清摄像头、温度传感器、湿度传感器等，以便于进行现场检测。

本次设计过程中选用高速球摄像头，能够配合机器人旋转进行现场直接排查。操作人员可在管理平台基础上控制摄像头的旋转角度、步进进程等，以保证能够清楚观察到输电线路现场情况；选用高精度探测主机，用于监测输电线路状态数据，通过智能采集、传感测控等快速确定现场情况。一般包括环境参数、机械参数、电气参数等；选用5G通信模块，支持双向高速传输，可靠度高、稳定性强。

2.3 控制终端

全自主巡检控制终端主要由驻留巢穴和远程终端2部分组成。驻留巢穴不仅可以监测输电线路运行情况，还可支持机器人驻留充电，是输电线路巡检的“中继站”；远程终端主要将机器人采集到的数据、图像可视化显示，并在智能诊断模型基础上进行风险评估。

驻留巢穴。安装在杆塔上，设置集中器和监测单元，可将机器人采集到的各项数据集中到在线监测单元中，便于打包传输；内部配置太阳能充电板，可通过无线模块使机器人蓄电池连接充电，保障了全自主机器人巡检续航效果。

远程终端。可将全自主巡检机器人中采集到的运行状态信息、环境监测信息、线路参数信息等进行可视化处理，通过站内数据总线分别显示到视频界面和监控端口，形成动态监测图像及可视化状态

数据图表，确保管理人员能够依照上述信息快速、高效地开展现场管理，为输电线路运维管理提供有效参考^[4]。

2.4 辅助装置

为保证自主巡检效果，本次全自动巡检系统中增设越障桥，用于辅助机器人跨越杆塔、绝缘子等障碍物；设置防震锤，保障机器人沿线行走过程中始终处于稳定状态。

3 功能设计

3.1 基本功能

为保障定期线路检查、常态化监测效果，本次设计应满足自主巡检和在线监测2大需求，利用自适应模型及风险评估模型实现“一站式”巡检，如表2所示。

表2 全自主巡检机器人的基本功能

检测项目	基本功能	关键技术
自主巡检	自动定位	利用GPRS定位技术采集传感器、杆塔、地线等地理位置信息，确定机器人坐标并将其展示在云台中
	自主越障	搭建状态环境感知模型，通过对比障碍物的特征数据精准识别，在反复训练优化后，形成最佳行动规划，达到自适应越障效果
	自发巡检	应设置手动巡检和自动巡检2种方案。自动巡检中按要求设置坐标点，指定路径，一站式自发巡检
在线监测	数据采集	通过传感器技术、可视化技术等，实时采集环境参数、线路图像、电力数据等
	通信传输	搭建5G通信基站，利用5G技术进行无线传输；服务层间以局域网传输，保障数据传输的安全性、可靠性和有效性
	诊断评估	以智能诊断技术为核心进行数据分析和处理，搭建风险评估模型，快速识别缺陷故障
	终端显示	以分布式技术搭建集成化显示平台，将视频图像、定位数据、环境参数、电力数据等综合展示

3.2 功能优化

3.2.1 巡检模式的优化

自动巡检设计时应注意做好运动规划，明确线路参数、障碍物情况、运动状态等。如线路参数设置时须明确起始杆塔、终止杆塔和返回杆塔，形成完整的自主巡检线路图，使全自动巡检机器人能够按照既定路线作业^[5]；障碍物情况分析时须参照地理位置空间对应的障碍物数据库信息，确定障碍物

类型、配置等特征，生成障碍物列表和越障计划，包括行动方向、行走距离、越障步骤等，从而保证全自动巡检机器人能够自主过障^[6]；运动状态评估时可将现行状态数据和历史状态数据对比，确定是否存在异常情况、违规问题等，并进行相应参数调整，生成巡检日志^[7]。

3.2.2 业务流程的优化

在线监测过程中应做好目标采集、综合反馈及健康评价。一般地先由巡检人员制定作业计划，下发巡检任务清单；然后经远程终端分解任务项，对照作业计划形成编程指令；再将编程指令下载到机器人主体中，完成目标数据采集，并将其传输到指定类型服务器中，存储到终端服务器（采集内容如采集线路参数、工作模式、故障图像等）；最后，由数据服务器和主站服务器配合完成风险评估，识别巡检数据是否真实有效、确定输电线路安全风险系数^[8]。上述环节一旦发现异常，驻留巢穴进行自主分析并预警，记录设备现阶段运行参数、状态数据等，生成故障报表。同时，远程终端中通过历史数据对比和风险评估模型，确定本次风险概况及风险等级并执行声光报警。

3.2.3 图像信息的优化

图像信息采集时受照度的影响，很容易出现图形畸变、图像模糊问题。尤其是在全自动巡检机器人使用过程中，周围林木形态复杂、光照强度差异明显，输电线路故障缺陷信息提取难度较大。

针对以上问题，本次设计过程中对图像处理模型进行优化，包括灰度化、二值化、滤波去噪、锐化等。故障诊断环节，远程终端须将全自动巡检机器人拍摄的正射影像，通过其附带坐标信息进行解算，去除重叠部分拼接成完整图片。一般可采用U-net网络提取方法，对目标稠密区域、线路存在精度偏低、边缘粘连等干扰项进行剔除，在加深网络中形成清晰的输电线路运行图像。若背景环境特别复杂，还可在直接向深层网络输入大量原始图像数据，对图像数据进行复杂处理，得到准确的输电线路故障缺陷特征。

4 效益评估

经多项模拟环境测试后，确认全自动巡检机器人可完成自动定位、自主越障及自发巡检任务；控

制终端可有效进行数据分析和处理，并将其诊断结果可视化显示。其行走过程中运行正确、越障平稳、图像数据传输效果良好，达到了预期目标。2021年底将全自动巡检系统试点使用后，东莞供电局辖区内220 kV输电线路运维管理收效显著，故障巡检有效率达到96.4%，远远高于人工巡检效果。尤其是在图像识别过程中，通过技术处理有效剔除了环境干扰，使输电线路绝缘故障、过流过载等缺陷识别更加精准，减少了现场反复检验的时间，为输电线路运维管理工作的开展奠定了良好基础。

5 结束语

在基于智能巡检机器人的输电线路运维管理工作开展过程中，要做好全自动巡检系统的结构设计，按照线路情况设置好本体结构、控制终端和辅助装置，使其能够满足设计指标。同时，还要对自动巡检功能和在线监测功能进行优化，保证自主越障平稳、自发巡检高效、数据采集精准、通信传输可靠、诊断评估有效、终端显示便捷，从根本上改善输电线路巡检质量，为我国新时期输电线路安全、可靠、经济运行保驾护航。

参考文献

- [1] 陈文栋, 刘兴华, 牛丙震, 等. 浅谈输电线路巡检中智能机器人的应用[J]. 中国设备工程, 2023,(2): 33-35.
- [2] 王吉岱, 梁茂轩, 孙爱芹, 等. 基于有限状态机的输电线路巡检机器人自主越障运动控制方法[J]. 机床与液压, 2022, 50(5): 21-27.
- [3] 汤春俊, 梁加凯, 朱凯, 等. 基于DSP的输电线路四分裂间隔棒安装检修机器人自动巡检技术[J]. 制造业自动化, 2022, 44(8): 162-165.
- [4] 王舒平. 简析智能机器人在输电线路巡检中的应用[J]. 中国设备工程, 2022,(17): 43-45.
- [5] 王吉岱, 徐东晓, 孙爱芹, 等. 基于多传感器信息融合的输电线路巡检机器人自主越障方法研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(9): 24-28.
- [6] 苗俊, 尤志鹏, 袁齐坤, 等. 架空输电线路巡检机器人发展研究[J]. 中国设备工程, 2019,(20): 135-136.
- [7] 刘贞瑶, 高方玉, 姜海波, 等. 输电线路智能巡检机器人系统的研制及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(8): 57-62.
- [8] 黄智明. 输电线路带电作业巡检清障机器人的设计[J]. 机电信息, 2017,(27): 19-20.

作者简介

黎文俊(1983—), 男, 工程师, 从事输电线路管理工作。
(责任编辑: 刘艳玲)

输电线路 DB 型调整板几何结构分析与 优化设计方法的研究

王昊, 芦凯旋, 李亚亮, 刘浩宇, 宰红斌, 菅瑞琴, 王晋强

(国网山西省电力公司晋城供电公司输电运检中心, 山西 晋城 048000)

摘要: 输电线路中最常用的弧垂调整方法为人工调节 DB 型调整板连接孔的位置, 其存在安全风险高、作业效率低的特点。通过研究 DB 型调整板连接孔尺寸和相对位置, 在满足孔边距和材料强度、厚度的条件下, 创建调整板象限几何设计方法, 设计出便于人工调节、节省金具用料、作业安全可靠的调整孔连接方式, 通过数学推导唯一确定调整板尺寸, 得出符合设计规范的最优解。同时, 为了实现安全、高效的目标, 依据调整板的特性反复试验, 创造性地提出一体化保护的设计理念, 发明调整弧垂自带后备保护调整板, 实现自带后备保护调整弧垂和快速高效调整线长, 并由电力工业电力线路器材质量检验检测中心检验, 符合行业使用标准。

关键词: 输电线路; 调整板; 孔边距; 几何作图; 自带后备保护; 调整线长

中图分类号: TM753

Research on Geometric Structure Analysis and Optimal Design Method of DB Type Adjusting Plate of Transmission Line

WANG Hao, LU Kaixuan, LI Yaliang, LIU Haoyu, ZAI Hongbin, JIAN Ruiqin, WANG Jinqiang

(Transmission Inspection Center of Jincheng Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Jincheng 048000, Shanxi)

Abstract: The most commonly used sag adjustment method in transmission lines is to manually adjust the position of the connection hole of the DB-type adjusting plate, which has the characteristics of high safety risk and low operation efficiency. In this paper, by studying the size and relative position of the connecting holes of the DB-type adjusting plate, under the conditions of satisfying the hole margin, material strength and thickness, a geometric design method of the adjusting plate quadrant is established, and the design is convenient for manual adjustment, saving hardware materials, and safe and reliable operation. The adjustment hole connection method is determined by mathematical derivation, and the size of the adjusting plate is uniquely determined, and the optimal solution in line with the design specification is obtained. At the same time, in order to achieve the goal of safety and efficiency, according to the characteristics of the adjusting plate, the design concept of integrated protection was creatively proposed, and the adjusting plate with its own backup protection was invented to realize the adjustment of the sag with its own backup protection and fast and efficient. The line length is adjusted and tested by the power industry power line equipment quality inspection and testing center to meet the industry use standards.

Keywords: transmission line; adjusting plate; hole margin; geometric drawing; self-contained backup protection; adjusting line length

DB 型调整板属于输电线路杆塔上的板-板系列连接金具, 位于耐张绝缘子串的连接金具和耐张线夹之间, 主要作用是调节导线弧垂和释放不平衡张力^[1]。

收稿日期: 2022-04-21

由于耐张杆塔倾斜后, 对杆塔和输电线路造成的破坏极大, 严重时可导致倒塔断线和耐张段杆塔绝缘子掉串等恶性事故。目前最有效的解决方法是调整输电线路弧垂与线长。调整弧垂和线长需多人配合操作完成, 高空作业人员还需二次进出导线安

装手扳葫芦和夹具等笨重工具布置后备保护措施, 操作时间长、安全效率低。针对上述问题, 本文从 DB 型调整板几何结构进行研究分析, 从设计规范中确定边界条件, 总结设计思路, 提炼设计规律, 优化设计方法, 得出 DB 型调整板设计图纸, 并进行试验证明, 论证其可行性。

1 DB 型调整板尺寸参数的确定

传统的 DB 型调整板的结构示意图如图 1 所示。

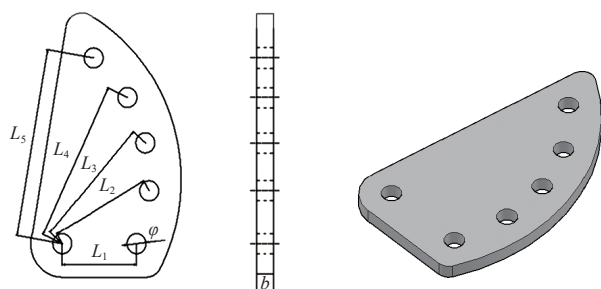


图 1 普通 DB 型调整板的结构示意图

其中, 左下侧孔为连接孔, 右侧 5 个孔为调整孔。连接孔和调整孔之间的距离分别用 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 表示, 孔径用 φ 来表示, b 为 DB 型调整板的厚度, 按型号可以分为 7、10、12、16、21、25、30 t 等。

当 DB 型调整板基本参数确定后, 根据现有结构尺寸, 对调整板的几何结构进行分析, 以 DB-7 型调整板为例, 板厚为 16 mm, 孔径为 18 mm, 左下角的连接孔和右侧 5 个调整孔的距离依次为 $R_1 = 70$ mm, $R_2 = 95$, $R_3 = 120$ mm, $R_4 = 145$ mm, $R_5 = 170$ mm。同时, 按照我国现行标准中规定钢件孔边距为孔径的 1.25 倍^[2], 在国外工程建设中, 载荷大于 160 kN, 孔边距选用 1.65~1.70 倍孔径^[3]。所以 DB-7、DB-10、DB-12、DB-16 型号的调整板采用孔径的 1.25 倍计算孔边距, DB-21、DB-25、DB-30、DB-21G、DB-25G 型号的调整板采用孔径的 1.65 倍计算孔边距, DB-32G 及以上型号的调整板采用孔径的 1.70 倍计算孔边距。且为了加工方便, 如计算值不为整数时, 尺寸取大于实际计算值的最小整数。

2 DB 型调整板几何结构分析

参照《电力金具手册》调整板的相关内容, 在

连接孔、调整孔和孔边距尺寸确定的条件下, 遵循尽可能减少调整板设计用料的原则, 将 5 个调整孔几何中心的连线放在同一圆弧上, 利用象限几何作图法, 如图 2 所示, 选取其中 3 个点确定对应的圆心和半径, 另外 2 个孔用来验证圆心和半径的准确性。确定圆心 O 在连接孔北偏西 45° 方向上, 且到调整孔的距离均为 2 倍的 L_1 。

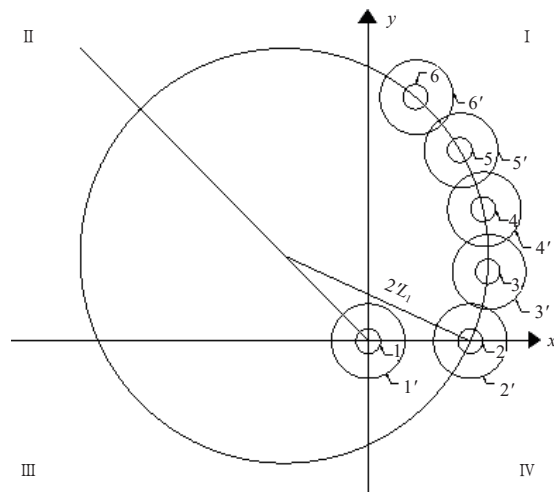


图 2 象限几何作图法

3 后备保护槽防护板的宽度确定

设调整板的厚度为 b , 后备保护槽防护板的宽度为 K_2 , 极限承载载荷为 N , 第一应力集中系数为 δ_1 , 第二应力集中系数为 δ_2 , 材料强度为 f , 连接孔与各调整孔的距离最小值为 L_{\min} , 连接孔的孔边距为 e , 各调整孔的直径为 φ , 后备保护槽的宽度为 K_1 , 与调整孔连接的螺栓的直径为 D , 不考虑集中荷载时, 其关系式可以如下表示^[4]:

$$b = \frac{N\delta_1\delta_2}{(K_2 + L_{\min} + e - \varphi)}, \quad (1)$$

$$\frac{N \left[\left(K_2 + \frac{K_1}{2} \right)^2 + \frac{1}{4} K_1^2 \right]}{Db \left[\left(K_2 + \frac{K_1}{2} \right)^2 - \frac{1}{4} K_1^2 \right]} = f. \quad (2)$$

联立上述公式 (1) 和公式 (2), 结合表 1 计算得到后备保护槽宽度 K_1 和防护板的宽度 K_2 。

4 DB 型调整板优化设计步骤

在确定圆心和半径之后, 找到调整板在符合设

表1 调整板主要尺寸表

型号	主要尺寸/mm							
	b	φ	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	e
HBDB-7	16	18	70	95	120	145	170	30
HBDB-10	16	20	80	110	140	170	200	33
HBDB-12	16	24	100	135	170	205	240	40
HBDB-16	18	26	110	125	140	155	170	47
HBDB-21	26	30	120	135	150	165	180	54
HBDB-25	30	33	120	135	150	165	180	59
HBDB-30	32	39	120	140	160	180	200	70
HBDB-21G	20	26	120	150	165	195	210	47
HBDB-25G	24	30	120	135	150	165	180	54
HBDB-32G	28	33	120	140	160	180	200	59
HBDB-42G	32	39	140	185	230	275	320	70

计规范条件下的最优设计方案,针对不同的调整板型号画出对应的调整板面积最小、最省料的设计图纸,同时为了实现安全高效的目标,创造性地提出一体化保护的设计理念,发明成套调整弧垂自带后备保护调整板及施工方法,实现自带后备保护调整弧垂和快速高效调整线长^[5],如图3所示。

5 DB型调整板优化设计与加工图

图4为DB型调整板优化设计2D与3D模型图,图5为DB型调整板优化设计与加工图。加工制造说明:材料选用Q390,表面热镀锌防腐;各部件加工完成后进行组装试验,确保各部件灵活运动;组装试验完成后,进行机械强度试验,机械试验合格后方可批量加工^[6]。

6 DB型调整板优化设计试验验证

经山西某公司加工生产,由电力工业电力线路器材质量检验检测中心检验,如图6所示,其结论如下:受检样品外观、尺寸检测结果符合要求;热镀锌层厚度试验结果符合DL/T 768.7—2012《电力金具制造质量钢铁件热镀锌层》5.4的要求;机械损伤载荷试验结果符合试验要求;破坏载荷试验结果

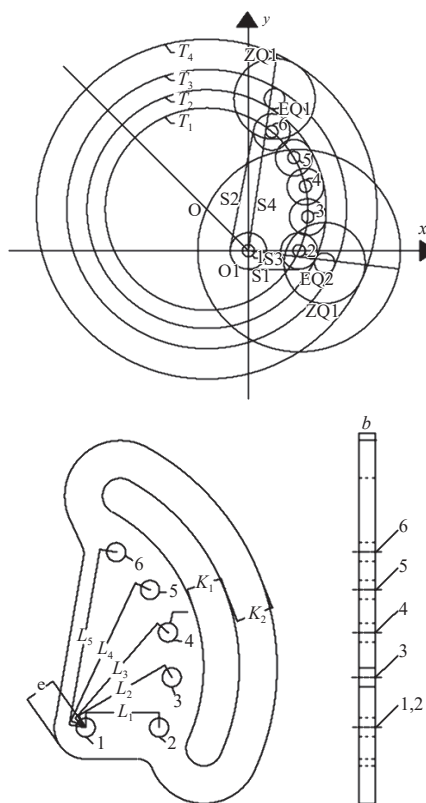


图3 自带后备保护调整板设计草图

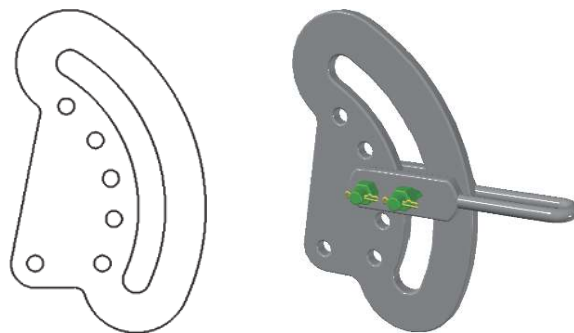


图4 DB型调整板优化设计2D与3D模型图

符合DL/T 759—2009《连接金具》4.2的要求,其现场应用图与3D效果图如图7所示。

7 结论

本文在不改变调整板孔距的情况下,对调整板结构进行优化,分2个部分:(1)调整孔布置在同一圆弧上,方便输电线路高空作业人员调整,且在调整平滑的基础上最大限度地减少用料;(2)在调整板外侧设计后备保护槽,起到自带后备保护的作用,节省布置一套后备保护措施,起到安全高效调

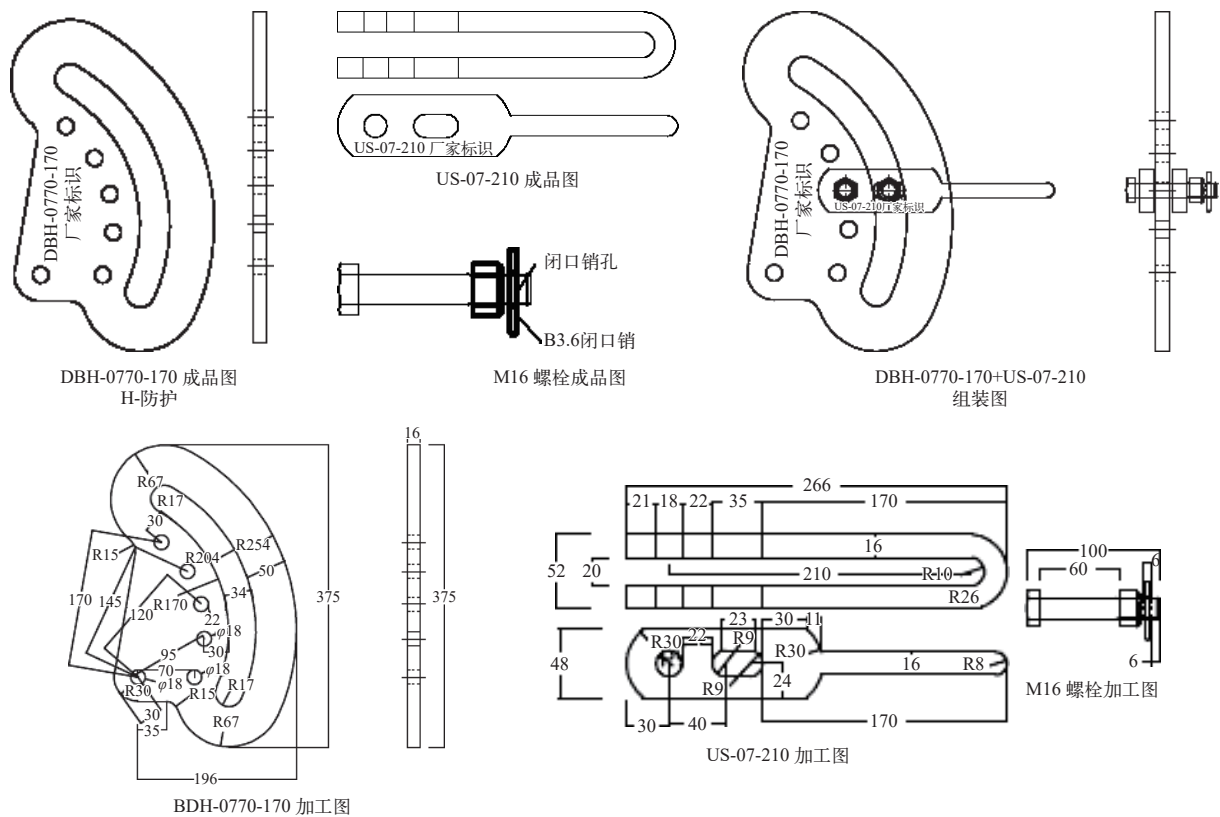


图 5 DB 型调整板优化设计与加工图



图 6 装置试验

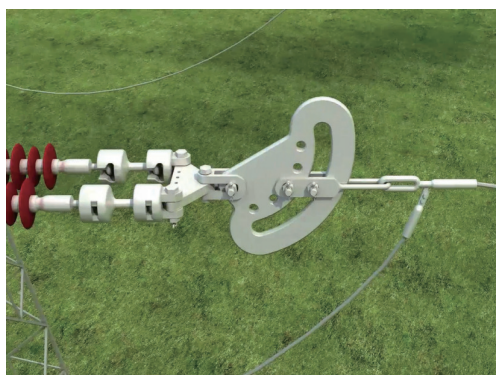


图 7 现场应用图与 3D 效果图

整线长。优化后的 DB 调整板可实现自带后备保护调整弧垂和快速高效调整线长，避免高空作业人员二次走线布置后备保护措施坠落风险，平均作业时间由 65 min/次缩短到 28 min/次。通过试验验证，统一调整板标准化设计，研究成果可直接应用于 35~220 kV 输电线路的建设，取得了一定的经济效益和社会效益。

参考文献

- [1] 董吉涛. 电力金具手册 (第3版) [M]. 中国电力出版社, 2018.
- [2] 中国电力企业联合会. 电力金具标称破坏荷载系列及连接型式尺寸: GB/T 2315—2017[S]. 北京: 2017, 12.
- [3] 孟遂民, 孔伟. 架空输电线路设计[M]. 中国电力出版社, 2007.
- [4] 宰红斌, 吴浩林, 董建军, 等. 一种弧垂调整一体化调整板的处理方法和装置[P]. CN111262203A, 2020-06-09.
- [5] 宰红斌, 秦志沁, 陈冬雪. 输电线路自带后备保护装置调整板的研制[J]. 科技创新与应用, 2017,(35), 2.
- [6] 黄双得. 110 kV线路连接金具断裂原因分析及防范措施[J]. 电工技术, 2021,(17): 125-127.

作者简介

王昊 (1992—), 男, 主要研究方向为输电线路运行与检修。

(责任编辑: 刘艳玲)

变电站门型构架防鸟筒的研制

刘之然

(国网宁夏电力有限公司吴忠供电公司, 宁夏 吴忠 751100)

摘要: 目前生态环境逐渐改善, 变电站鸟类活动均显著增多, 变电站门型构架成了鸟类筑巢的重灾区。变电站门型架构一旦发生鸟害故障, 极易造成整段母线停电, 对社会民生造成重大的经济损失及影响。该装置从鸟类筑巢空间的源头入手, 大幅降低鸟类在变电站门型构架上的筑巢空间占比, 为站内设备稳定运行提供了保障。

关键词: 变电站门型构架; 鸟害故障; 筑巢空间占比

中图分类号: TM645

Development of Bird Proof Tube for the Gate-type Frame of Substation Structure

LIU Zhiran

(Wuzhong Power Supply Company of State Grid Ningxia Electirc Power Co., Ltd., Wuzhong Ningxia 751100, China)

Abstract: At present, the ecological environment is improving day by day and the activity of birds in substations increased significantly, so the gate-type frame of substation structure has become the hardest hit area for birds to build their nests. If the gate-type frame of substation structure has a bird-related faults, it is very easy to cause a power outage in the entire busbar, causing major economic losses and impacts on the people's livelihood. The installation starts at the source of the nesting space for birds, significantly reduces the proportion of nesting space for birds on gate-type frame of substation structure, which provides a guarantee for the stable operation of the equipment in the station.

Keywords: gate-type frame of substation structure; bird-related faults; the proportion of nesting space

常规变电站内主变等大型设备的引流导线一般采用门型构架固定, 秋冬季节气温降低, 由于设备运行过程中电流的热效应导致主变上方的门型构架区域温度高于其他场所, 且门型构架多为三角形的框架结构十分利于鸟类筑巢、搭窝。鸟粪排泄物在主变绝缘套管表面, 在遇到大雾、小雨等潮湿天气会引起沿面闪络故障^[1-2]; 在大风等极端天气下鸟类筑巢用的铁丝、导体甚至鸟巢掉落会导致接线板与导体之间绝缘击穿放电造成短路事故^[3], 有可能会引起变电站全站失压等事故的发生, 因此变电站门型构架内鸟窝的防治尤为重要。结合现场实践研制了一种变电站门型构架防鸟筒, 以用来确保变电站内设备安全、稳定运行的目的。

1 变电站门型构架常见的防鸟害措施及现状

人工巡视, 停电处理存在以下缺点: 人工巡视发现鸟窝存在的不可控性较大, 无法及时有效地发现并清除鸟窝, 致使站内设备存在运行隐患。

其他驱鸟方式也存在不足之处。风动式驱鸟器

收稿日期: 2022-09-05

缺点: 随着时间推移鸟类会对风动式驱鸟器产生适应, 致使驱鸟效果变差, 损坏率高, 运维人员巡视过程中经常发现风动式驱鸟器转轴故障、镀铬不锈钢反光片脱落等缺陷; 超声波驱鸟是一种无害驱鸟方法, 但是超声波驱鸟设备单价较高, 须定期维护, 不便于大范围推广; 声音驱鸟是利用鸟类天敌的叫声、噪声等音频文件在变电站内循环播放, 声音驱鸟的不足之处在于产生噪声, 影响变电站工作人员的情绪并且鸟类容易适应等。风动式驱鸟器^[4]、超声波驱鸟、声音驱鸟均达不到理想效果。

通过对国网吴忠公司变电运维三班所辖 23 座变电站排查、统计发现 86% 的变电站门型构架未安装防鸟设施, 发现鸟窝后须要进行停电处理, 停电处理期间会使变电站处于风险时段, 可靠性明显降低。

2 方案研究及提出

2.1 方案研究

通过对吴忠供电公司运维三班所辖变电站的现场考证和资料查阅得知变电站内门型构架横梁多为槽钢, 内部中空正三棱柱(截面为等边三角形)^[5]。

因此可以利用一个两侧密封的圆柱筒填入门型构架横梁内部，迫使鸟类在门型构架内的筑巢空间大幅缩减，从而达到防止鸟类在门型构架筑巢的目的。

图1为门型构架放入防鸟筒后的侧视图，圆柱与三棱柱形之间的空间为3部分，上方空间底部为圆弧形，鸟类搭窝无法找到支撑点，因此无法搭窝。下方部分形状怪异、空间狭窄不利于鸟类搭窝，并且彼此间被圆柱格挡相互独立，因此单个一部分的占比即为鸟的筑巢空间占比。

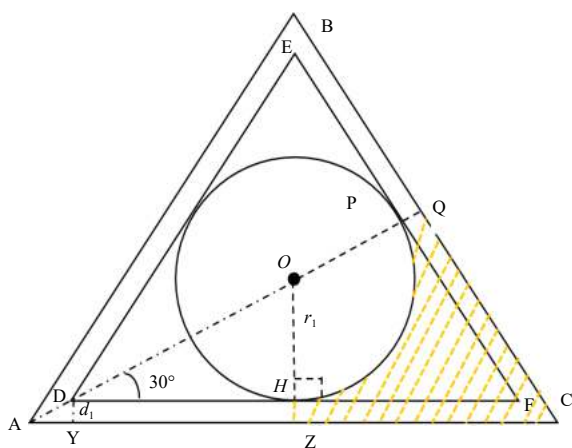


图1 门型构架放入防鸟筒后的侧视图

设圆柱的半径为 r_1 ，槽钢的宽度为 d_1 ，门型构架横梁的长度与防鸟筒的长度均为 h ，则鸟类筑巢的空间占比 γ 为

$$\gamma = \frac{1}{3} \times \frac{V_{\text{三棱柱}} - V_{\text{圆柱}}}{V_{\text{三棱柱}}} \quad (1)$$

推导后得：

$$\gamma = \frac{1}{3} \times \frac{S_{\Delta ABC} - S_O}{S_{\Delta ABC}} = \frac{1}{3} - \frac{\pi \cdot r_1^2}{9\sqrt{3}(r_1 + d_1)^2} \quad (2)$$

如图2所示，查阅五大台110 kV变电站变门型构架的设计图纸及资料可知：

$d_{\Delta ABC} = 800 \text{ mm}$ ， $r_1 = 231 \text{ mm}$ ， $d_1 = 40 \text{ mm}$ 并将门型构架数据带入公式(2)中可得：鸟类筑巢的空间占比为18.7%。

鸟类的筑巢空间占比是指鸟能够在门型构架中筑巢的空间与门型构架总空间的占比，18.7%是理想情况下计算出来的最大占比。由此可见，鸟类的筑巢空间从100%降低到18.7%，大幅下降，不能提供鸟类筑巢搭窝的舒适空间。理论上，防鸟筒能有效起到防止鸟害的目的。

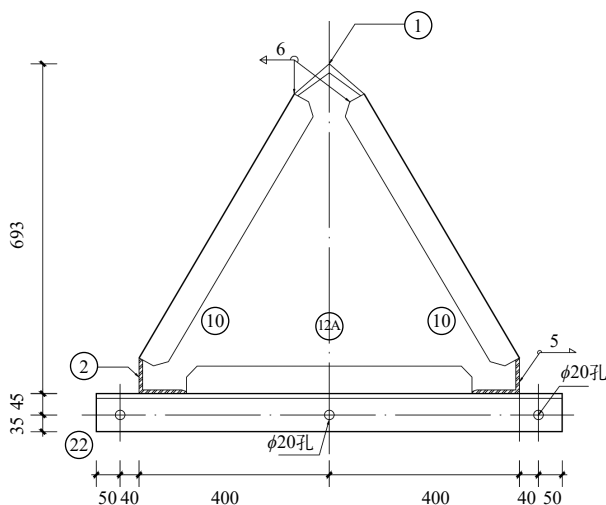


图2 五大台变主变高压侧门型构架横梁侧视图(单位: cm)

2.2 方案1-整段式门型构架防鸟筒

整段式门型构架防鸟筒由3部分组成：防鸟筒、密封盖、防鸟筒固定装置。此方案通过一整段防鸟筒安装在变电站门型构架三角横梁内，并在最左和最右端的防鸟筒开口处安装密封盖从而形成完整的门型构架防鸟装置。整段式门型构架防鸟筒制作过程非常简单，成本低廉，可靠性高。但整段式防鸟筒的长度等于门型构架横梁的长度，安装困难，需要多台吊车协同工作，施工风险较高。

2.3 方案2-可伸缩式防鸟筒

可伸缩式防鸟筒在制作防鸟筒时，按照门型构架横梁长度，制作成两端可向中间段伸缩的形式，将可伸缩式防鸟筒放入门型构架横梁后，通过调整两侧长度，与门型构架横梁长度匹配后固定即可。该方案针对不同长度的门型构架横梁都能使用，但是由于门型构架横梁离地面较高，且是一个狭长的柱体，可伸缩式防鸟筒较长不便于安装，密封性差，并且对工艺要求较高，造价高，在安装调整过程中容易出现卡涩等问题。

2.4 方案3-分段组装式门型构架防鸟筒

分段式门型构架防鸟筒由4部分组成：防鸟筒、防鸟筒连接装置、密封盖、防鸟筒固定装置。此方案通过将一段一段的防鸟筒安装在变电站门型构架三角横梁内，防鸟筒两两之间用防鸟筒连接装置将每一段防鸟筒连接成一个整体，并在最左和最右端的防鸟筒开口处安装密封盖从而形成完整的门型构架防鸟装置，占用门型构架内部空间达到鸟类无处

筑巢的目的。分段组装式防鸟筒制作过程简单、便于高空作业安装并且造价较低，可靠性较高。

从经济性、可靠性、安装过程的难以程度考虑决定采用方案3。

3 方案实施

3.1 防鸟筒材质选择

防鸟筒常年暴露在室外，风吹日晒，为了确保使用年限防鸟筒的材质应当耐高温，防紫外线老化。

防鸟筒还应当具备一定的耐冲击强度，防止异物碰撞造成损坏。

防鸟筒应使用绝缘材料并且通过 DL/T 1476—2015《电力安全工器具预防性试验规程》中的工频耐压试验^[6]。

因此选用防腐，耐磨，具有绝缘功能，经济实惠的 CPVC（氯化聚氯乙烯）。

3.2 制作过程

根据变电站门型构架参数（以五大台 110 kV 变电站为例），设计草图如图 3 所示，绘制 CAD 图纸如图 4 所示。



图 3 变电站门型构架防鸟筒草图

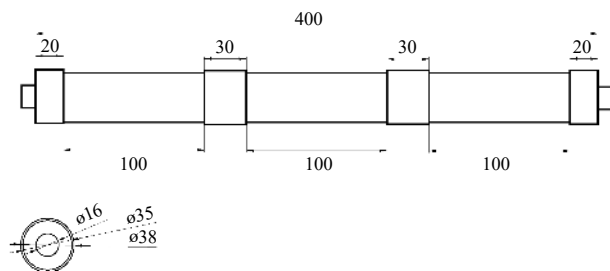


图 4 变电站门型构架防鸟筒 CAD 图纸（单位：cm）

按照变电站门型构架 CAD 图纸要求，向相关厂家采购一批尺寸外径为 350 mm，厚度为 10 mm；外径为 380 mm，厚度为 30 mm 的 CPVC 管材。外径 350 mm 的管材切割成长 2 根长 125 cm、1 根长 130 cm 的管材用来做分段式防鸟筒的主体部分。将外径为 380 mm 的管材加工成 2 根长 20cm 的管材用来加工密封装置和 2 根长 30 cm 的管材用来加工分段防鸟筒的连接装置，如图 5 所示。

如图 6 所示对加工好的管材进行预组装，对位于两侧的分段防鸟筒上预组装密封装置，对位于中

间位置的分段防鸟筒两侧预组装连接装置。通过在地面预组装起到降低门型构架防鸟筒高空作业安装工作的工作量，尽可能地减少停电时长。



图 5 预组装的防鸟筒及连接装置



图 6 预组装的防鸟筒及密封装置

3.3 安装过程

防鸟筒部件制作加工完成后，本单位对其组装方案展开分析、讨论，在制定好施工方案后提交主管部门审核。经主管部门同意后以吴忠市地区内五大台 110 kV 变电站 1 号主变高压侧门型构架为试点安排停电工作计划，进行变电站门型构架防鸟筒试点安装。如图 7 所示。



图 7 变电站门型构架防鸟筒现场安装

4 应用效果

五大台 110 kV 变电站门型构架安装防鸟筒后，变电运维中心通过利用变电运维智能监控系统远程统计出五大台变内所有门型构架 5 日内鸟类在站内

门型构架上筑巢、排粪率表，以验证其防鸟效果，统计结果如表 1 所示。

表 1 五大台变电站 5 日内鸟类在门型构架上筑巢、排粪率表

试验地点	是否安装防鸟筒	鸟类落下次数	鸟类停留筑巢、排便次数	筑巢、排便率/%
1号主变门型构架	是	31	2 (均为排便)	6.4
2号主变门型构架	否	169	91	53.8
110 kV I母门型构架	否	106	67	63.2
110 kV II母门型构架	否	117	81	69.2
35 kV I母门型构架	否	79	59	74.7
35 kV II母门型构架	否	81	49	60.4

从表 1 数据可知：安装了门型构架防鸟筒的 1 号主变门型构架上鸟类下落次数远小于其他未安装防鸟筒的门型构架。可以得知，防鸟筒对鸟类有一定的警示作用。

安装防鸟筒后鸟类落在 1 号主变门型构架上未产生筑巢想法，仅排便 2 次，其余 29 次仅为停留，休息。可以得知，防鸟筒充分发挥了占位原理，大幅降低了鸟类在门型构架上的筑巢空间，从而完全打消了鸟类在安装有防鸟筒的门型构架上筑巢的想法。

通过对筑巢、排便率的数据对比，可见安装防鸟筒的门型构架该数值明显低于未安装防鸟筒的门型构架。

随后对安装了门型构架防鸟筒的五大台 110 kV 变电站门型构架在春季展开为期 3 个月的追踪观测，以确保防鸟筒在鸟类筑巢季节的可靠性和耐用性。并结合五大台 110 kV 变电站 1 号主变停电计划进行防鸟筒检查，如图 8 所示。

检查发现 1 号主变高压侧门型构架横梁内无鸟窝，防鸟效果良好，门型构架防鸟筒效果良好，筒身无破损，持久稳定且寿命长。使用过程中运维人员反应，自从安装了门型构架防鸟筒五大台 1 号主变门型构架未发现一个鸟窝，非常有效地抑制了鸟类在门型构架上筑巢搭窝的情况，再次证明了门型构架防鸟筒的效果良好。随后在吴忠供电公司的支



图 8 变电站门型构架防鸟筒检查

持下将此装置申请专利“一种防鸟筑巢筒及变电站门型构架”[7]。

5 结束语

通过对现有变电站门型构架防鸟方法及设施的现状进行研究，研制出的变电站门型构架防鸟筒具有安装简便、经济实惠、安全可靠、效果明显等特点。变电站门型构架防鸟筒，大幅降低了鸟类在门型构架上的筑巢空间占比，从源头上解决鸟害事件的发生。并且避免了因门型构架上鸟窝而频繁停电带来的电网风险和安全隐患，为电网设备安全、稳定运行提供了保障。同时，也大幅减少了检修人员高空作业拆除鸟窝、运维人员巡视门型构架上异物的劳动强度，适合大面积推广使用。

参考文献

- [1] 杨继春. 鸟粪闪络的机理及预防措施[J]. 中国新技术新产品, 2009,(12): 111.
- [2] Chris Van Rooyen, Hein Vosloo, Richard Harness. Watch the birdie!: Eliminating bird streamers as a cause of faulting on transmission line[J]. IEEE industry applications magazine, 2003, 9(5).
- [3] 翟国柱, 张鹏, 唐友卫, 等. 变压器套管局部击穿的原因分析与对策措施[J]. 科技创新导报, 2010,(19): 123-125.
- [4] 张磊. 110 kV输电线路声光感应驱鸟器的研制[J]. 宁夏电力, 2018,(02): 21-23.
- [5] 徐国栋, 闫少波, 顾海明. 变电站鸟害分析与防治措施[J]. 电力与能源, 2022,43(01): 33-36.
- [6] 国家能源局. 电力安全工器具预防性试验规程: DL/T1476-2015[S]. 2015.7.
- [7] 刘之然, 周玮, 杨涛, 等. 一种防鸟筑巢筒及变电站门型构架[P]. 宁夏回族自治区: CN216363386U, 2022-04-26.

作者简介

刘之然(1994—), 男, 助理工程师, 从事变电站内一次设备运行维护与检修工作。

(责任编辑: 刘艳玲)

基于微信小程序的输电线路防外破安全教育平台

林添进¹, 陈亮¹, 洪海涛², 程志杰², 邹振平¹, 陈肇隆¹

(1. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000;
2. 福建电力职业技术学院, 福建 泉州 362000)

摘要: 随着社会经济的快速发展, 输电线路的防外破工作形势日趋严峻。目前, 防范输电线路外破的主要手段为“三防”措施, 但实际情况受人员主观意识影响存在许多不确定因素, 无法根本上堵住外破安全漏洞, 因此如何改变日常防外破工作重“堵”轻“疏”的模式变得迫在眉睫。研制一种基于微信小程序的输电线路防外破安全教育平台, 可以强化外破隐患区施工人员的安全风险辨别能力与预警意识, 从源头消除输电线路外破发生的可能性。

关键词: 微信小程序; 防外破; 安全教育平台

中图分类号: TM763

Transmission Line Anti External Burst Safety Education Platform Based on WeChat Mini Program

LIN Tianjin¹, CHEN Liang¹, HONG Haitao², CHENG Zhijie², ZOU Zhenping¹, CHEN Zhaolong¹

(1. Quanzhou Power Supply Company of State Grid Fujian Province Electric Power Company, Fujian Quanzhou 362000, China; 2. Fujian Electric Power Vocational and Technical College, Fujian Quanzhou 362000, China)

Abstract: With the rapid development of the social economy, the situation of preventing external damage to transmission lines is becoming increasingly severe. At present, the main means of preventing external damage to transmission lines are the "three prevention" measures. However, the actual situation is influenced by the subjective consciousness of personnel and there are many uncertain factors. Unable to fundamentally plug external security vulnerabilities. Therefore, it is urgent to change the mode of daily prevention of external damage, which emphasizes "blocking" rather than "dredging". The article proposes a safety education platform for preventing external damage to transmission lines based on WeChat mini programs, which can enhance the safety risk identification ability and early warning awareness of construction personnel in areas with external damage hazards. Eliminate the possibility of external damage to transmission lines from the source.

Keywords: WeChat mini program; anti external rupture; safety education platform

1 防外破工作现状

近年来, 城镇化进程不断加快, 原本相对偏僻的输电线路走廊与市政、园林、高速公路、高铁等施工建设的矛盾日益突出, 各类大型机械进入保护区内作业对线路安全带来威胁, 防外破工作已经成为一项长期、复杂的工作。为了有效管控外破隐患, 须采取更有效的防外破策略, 保证供电可靠性^[1-4]。

统计数据显示, 施工人员盲目冒险作业是发生线路外破的主要原因。个别人员不具备操作技能和专业知识, 作业人员的安全教育不全面, 人员流动频繁、被动式说教等都影响着防外破工作的成效。

收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-02-20

2 设计思路

2.1 架构设计

以日常使用度较高的微信小程序为载体, 通过图文、视频的方式, 提高学习者主动受教的意愿, 加深受教者知识学习印象, 让“我要安全”深植其心, 掐断外破隐患的苗头, 达到事半功倍的效果。

防外破安全教育平台框架由微信小程序和 Web 管理后台 2 部分组成, 微信小程序主要为学习界面, Web 管理后台的功能是数据维护, 为微信小程序提供后台支撑。

2.2 功能设计

在微信小程序中构建线路防外破安全教育平台,

设置邀请码登陆验证保护。在授权手机号、填写个人信息，且验证通过后，方可进入视频学习和答题界面。Web 管理平台有 5 大功能，分别为视频管理、用户管理、学习统计、奖励发放和领取记录、数据备份。如图 1 所示。



图 1 平台功能页面

3 功能介绍及应用

视频管理功能。使用管理员账号登录平台后，点击视频管理界面创建学习视频，视频内容可针对不同的外破类型自主选择，同时在视频中插入问答环节，设置题目供受教者答题，完成答题者（全部答对）享有微信抽红包的机会。上述操作中可直接生成二维码，通过扫码创建链接，使用户快速进入视频学习界面，打破了传统安全教育时间和空间上的壁垒。支持后台修改视频内容、题目答案等，确保输电线路防外破安全教育知识与时俱进。

用户管理。用户管理可以查询用户的信息和学习情况，方便后期对人员的学习效果进行分析。用户登陆微信小程序后，Web 数据库实时采集用户数据（用户昵称、手机号码、注册时间等）并记录用户学习情况（学习次数、完成情况）。若识别出异常行为，可在 Web 后台禁用或删除，如图 2 所示。

学习统计。显示平台上每个教育视频的学习人数、学习次数以及完成情况。为增强学习统计的有效性和科学性，在 Web 后台中设计分时段统计、分视频统计功能。前者可在学习统计界面设定“开始-结束”时间，选定时间段，即可确定本时段各视频的学习情况，导出具体名单；后者在学习界面直接显示，无须选定时段即可查看学习情况。



图 2 用户管理界面

学习奖励。统计奖励发放的人员、发放时间、发放次数和发放金额，便于奖励资金池的统筹管理。数据备份。保证数据安全，有迹可循。

4 操作流程

微信扫一扫视频二维码/小程序码→微信授权登录→输入邀请码登录→绑定手机号码→跳转到观看视频界面→观看视频/开始学习→观看视频，弹出问答环节→观看视频结束，全部答对→关闭平台，进入抽奖环节。防外破安全教育平台可以实现防外破综合性治理，降低因施工外破造成的线路跳闸，保障电网的安全和稳定供电。

参考文献

- [1] 刘向荣. 输电线路防外力破坏方法的探讨[J]. 中国新技术新产品, 2013,(22): 93-94.
- [2] 任广林. 35~220 kV输电线路外力破坏防控探讨[J]. 科技创新与应用, 2013,(33): 157.
- [3] 段健鹏. 防止电力线路设施外力破坏的措施[J]. 农村电工, 2006,(4): 32.
- [4] 武小林. 电力输电线路安全运行的探讨[J]. 应用能源技术, 2006,(10): 21-22.

作者简介

林添进（1987—），男，高级工程师，主要从事输电线路运维工作。

陈亮（1984—），男，工程师，主要从事输电线路运维工作。

洪海涛（1983—），男，高级工程师，主要从事输电线路培训

程志杰（1986—），男，工程师，主要从事输电线路培训

邹振平（1995—），男，助理工程师，主要从事输电线路运维

陈肇隆（1994—），男，助理工程师，主要从事输电线路运维

（责任编辑：袁航）

断路器状态量化评价研究

石佳, 丁俊, 苏俊霖, 奚路, 沈岩

(国网江苏苏州供电公司, 江苏苏州 215000)

摘要: 断路器作为电网分布广、数量多的关键设备, 其科学精益的运维检修是电网企业降本节支的重要支撑, 能够有效提升设备效益、管理效益。文章基于数字化转型思路, 强调对电力基础数据的利用, 提出一种断路器状态三维评级模型, 将设备属性分解为影响因素、概率等级、后果等级³类, 从历史数据、严重性、问题整改等方面对设备状态进行量化评估, 为断路器的科学管理提供数据支撑, 力求在降低设备安全风险的同时, 提升企业经营效益。

关键词: 断路器; 数字化; 设备状态; 量化评价

中图分类号: TM715

Study of the Quantitative Evaluation for Circuit Breaker's State

SHI Jia, DING Jun, SU Junlin, XI Lu, SHEN Yan

(State Grid Suzhou Power Supply Company, Jiangsu Suzhou 215000, China)

Abstract: With wide distribution and large quantity in grid, circuit breaker has great demand for lean maintenance and operation, while increasing revenue and reducing expenditure for enterprises. Based on the idea of digital transformation, this paper emphasizes the utilization of grid data and proposes an evaluation model for circuit breaker's state, establishing 3D properties for the device, as risk factor, probability and consequence. The model carries out quantitative assessment of the device's state from historical data, accident severity, problem rectification and other aspects. The study aims to provide data support for the scientific maintenance and operation of circuit breaker, reduce safety risks and improve management benefit for grid enterprises.

Keywords: circuit breaker; digitization; device state; quantitative evaluation

作为电网最重要的电气设备之一, 断路器在电网中数量多、运维工作量大, 盲目、有序开展设备维护、设备更换容易造成资源浪费, 影响企业效益。这对断路器状态评估提出了更高要求, 国内外对此进行了很多研究, 往往集中在设备本身或者某种故障模式, 对断路器之外的相关因素研究较少^[1-4]。

本文聚焦创新创效、精益管理, 基于数学概念的随机性、模糊性, 统筹考虑断路器状态因素, 提出一种基于数据分析的断路器状态评价方法, 将对设备运行、维护提供关键数据支撑, 有效提升电网企业的效益。

1 断路器状态影响因素

本文从断路器寿命的角度分析设备状态, 主要从机械寿命和电寿命 2 个方面进行。机械寿命是指设备的机械动作次数, 常规在 10 000 次以上, 与制造工艺、操作环境、操作过程等有关。电寿命是指设备的有载操作次数, 即额定短路电流或额定工作

收稿日期: 2022-08-19; 修回日期: 2023-02-21

电流的开断次数^[2]。由于电弧往往是由触头接触、电路开断而产生, 触头金属材料高温融化, 当触头厚度日渐磨损至规定值时, 电寿命随之结束^[2]。

影响断路器机械寿命、电寿命的因素较为复杂, 本文从简化计算、便于理解的角度, 将影响因素分为人为、环境、电网、设备 4 类。其中, 人为因素指因操作人员技能水平、身心状态、个人习惯等原因导致的设备故障; 环境因素指因受天气、气体腐蚀等原因导致的设备故障; 电网因素指因电网侧电流、电压、频率等指标异常导致的设备故障; 设备因素是指由于制造工艺、出厂检测、运行年限等原因导致的设备故障。

2 断路器状态评价方法

本文提出一种基于数据分析的断路器状态评价方法, 以断路器事故为对象, 在完整数据的基础上, 结合人为、环境、电网、设备 4 类事故因素, 从事故发生概率、事故等级开展实时定量分析。其中, 事故发生概率共有 3 个级别, 分别为小、中、大,

用1、2、3表示。事故后果共有4个级别，分别为无影响、轻微、偏严重、严重，用1、2、3、4表示。例如，断路器状态为(2, 3)，即发生概率中、事故后果偏严重。

以人为因素为例，具体评价步骤如下。

第一步，对5年内事故数据进行评估。建立近5年内人为事故清单，依托专家组对事故发生概率和事故等级进行评估。对所有事故等级进行累加、平均，即通过数字展现5年内人为事故的发生概率、事故等级，计算结果四舍五入取整。

以A公司断路器数据为例，计算发现，人为事故的发生概率平均值为2，事故等级平均值为2，即人为因素下的断路器状态为(2, 2)。

第二步，利用过去1年内事故后果最大值进行修正。统计过去1年内断路器人为引起的最高事故等级，并和第一步的平均值对比，取数值较大者作为人为事故等级。A公司在过去12个月中，人为引发的断路器事故共5起，其中最严重的事故等级为3。对比第一步计算结果，取两者较大值进行修正，即事故等级从2修正为3。此时，人为事故的发生概率仍为2，事故等级修正为3。

第三步，利用过去1年内事故后果严重性进行修正。统计过去12个月内发生的全部断路器事故的类别、等级，利用下述公式(1)计算事故严重指数。完成全部4类事故的事故严重指数后，若人为事故严重指数是4类事故中的最大值，则发生概率和事故等级均提升一级，否则维持不变。

$$S_p = \sum_{i=1}^4 \left[\left(\frac{N_{pi}}{N_i} \right) \times i^2 \right] \quad (1)$$

式中： S_p 为 p 类事故严重指数； p 为事故类别（分别是人为、环境、电网、设备4类）； N_{pi} 为 p 类 i 级事故数量； N_i 为全部4类 i 级事故数量； i 为事故等级（分别是1、2、3、4等级）。

结合A公司数据，计算可知，人为、环境、电网、设备4类事故的严重指数分别为3.2643、5.3211、0.7143、3.6786。人为事故严重指数不是最大值，因此人为事故的发生概率、事故等级，维持不变，分别为2、3。

第四步，利用过去1年内事故整改情况进行修正。统计过去12个月中，可能导致断路器故障的人为问题整改情况。当问题整改比例小于90%时，发

生概率和事故等级均提升一级，否则维持不变。

结合A公司数据计算可知，人为、环境、电网、设备4类问题的整改比例分别为89%、88%、98%、65%。根据结果可知，人为问题整改比例小于90%，因此人为事故的发生概率、事故等级均提升一级，分别为3、4。此时，人为因素下断路器的状态已经达到最严重的情况。最终因人为事故的发生概率从2修正为3，即从“中”提升至“高”级别；事故等级从2修正为4，即从“无影响”提升至“严重”级别。运检人员根据该结果开展运维检修工作。

3 结论与展望

断路器作为重要的电网设备，其引发的故障停电往往会对用户造成严重损失，对营商环境形成负面影响。断路器本身受自身质量、环境变化、电网运行、人为操作等因素影响，这些因素往往是无规律的动态变化，使得设备状态也呈现不确定性。本文提出一种断路器状态评价模型，从事故类型、概率等级、后果等级对断路器开展状态量化评估，能够实时跟踪设备最新状态。评价结果以历史数据为参考，结合事故严重性、问题整改情况对评估结果进行实时修正，从而为设备的运行维护、检修管理提供可靠的数据支撑。模型中的参数可以根据工作实际进行调整。

下阶段，随着电力系统规模不断扩大、运行方式日渐复杂，不确定性凸显，我们将在现有方法的基础上，更精细地跟踪这些因素对设备状态的影响。

参考文献

- [1] 叶昱媛. 高压断路器的故障机理分析与寿命评估[D]. 江苏南京: 东南大学, 2019.
- [2] 晏卫江. 断路器电寿命影响因素的研究及其改进优化[D]. 江苏南京: 东南大学, 2014.
- [3] 伏磊. 高压电气设备状态检修研究[J]. 工程技术研究, 2018, 1: 105-106.
- [4] 黄凯. 高压断路器剩余寿命评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

作者简介

石佳(1991—)，女，工程师，主要从事电网规划、数据应用等工作。

丁俊(1987—)，男，工程师，主要从事电力系统、电力数据应用研究工作。

(责任编辑:袁航)

电力用户低压采集成功率影响因素研究

向奕同

(国网重庆市电力公司市北供电分公司, 重庆 渝北 401147)

摘要: 为了分析电力用户低压采集成功率的影响因素, 将电力用户用电数据传输分为上行通道和下行通道2个方面, 分析总结各项因素对通信信道的影响, 判断导致采集终端和计量装置采集异常的因素, 并提出提高采集成功率相关措施, 为计量装置运行维护、电费准确回收、线损管控提供支撑。

关键词: 电力用户; 终端; 采集成功率; 通信信道

中图分类号: TM733

Study on the Influencing Factors of Low-voltage Acquisition Success Rate for Power Consumers

Xiang Yitong

(Shibei Electric Power Supply Branch Company, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing Yubei 401147, China)

Abstract: The acquisition success rate of the acquisition metering device is the key to ensure that the electricity consumption data is truly "available and usable". In order to analyze the influencing factors of the low-voltage acquisition success rate of power consumers, this paper divides the electricity consumption data transmission of power consumers into two aspects: uplink channel and downlink channel, analyzes and summarizes the influence of various factors on the communication channel, judges the factors that lead to abnormal acquisition of acquisition terminals and metering devices, and puts forward relevant measures to improve the acquisition success rate, providing strong support for metering device maintenance, power charge recovery, and line loss management.

Keywords: power consumers; terminals; acquisition success rate; communication channels

1 概述

用电信息采集系统由主站、通信信道、采集终端以及智能费控电表构成^[1]。通过采集关口表和户表的用电数据, 可以实现对用户的用电状态监控、后端负荷管控、台区线损治理。目前国网重庆市北供电公司采集覆盖率已达到 100%。

计量装置的采集成功率是确保采集到的用电数据“可用、可靠”的前提。分析导致采集终端和计量装置采集异常的因素, 并采取有效措施提高采集成功率和完整性, 制定现场标准化作业卡, 为计量装置运行维护、电费准确回收、线损管控提供强有力支撑^[2-3]。

用电采集装置分为集中器、采集器、终端等, 上行通道采用以太网、光纤、GPRS 等通信方式, 下行通道的通信方式则为 RS485 通信、电力线载波

收稿日期: 2022-12-12, 修回日期: 2023-03-15

通信和微功率通信。不同采集装置在运行过程中的采集范围、能够覆盖低压用户的数量、抗高次谐波干扰的能力、不同通信模块和不同规约的兼容性不尽相同, 这些因素都会对采集成功率造成影响^[4]。

2 影响采集成功率因素分析

上行通道和下行通道构成了用电信息采集的通信信道。上行通道为后台主站与采集终端或集中器之间的信息通信, 下行通道为集中器与采集器、电能表之间的信息通信。下行通道的 3 种通信方式示意图如图 1 所示。

对 2022 年 9 月以来供电中心所辖 82 万用户采集数据统计分析, 共计出现 261 次采集失败事件, 将户表采集失败的原因进行对比总结, 如表 1 所示。

如果零星表计采集失败, 大概率是下行通道异常, 如果一个台区大面积采集失败, 上行通道异常的可能性较大。

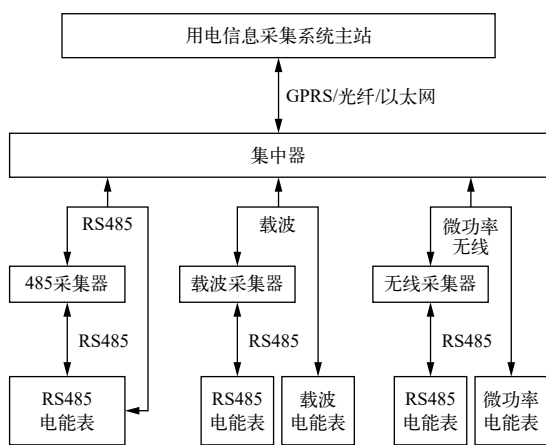


图1 本地通信（下行通道）方式

表1 采集失败原因

序号	原因	故障次数	百分比/%
1	户变关系	25	9.58
2	营销档案数据异常	126	48.28
3	载波模块损坏	26	9.96
4	载波信号衰减	31	11.88
5	集中器版本过低	6	2.30
6	欠费拆表	19	7.28
7	泵房变频干扰	3	1.15
8	接线错误	2	0.77
9	恶劣天气	23	8.81

2.1 下行通道异常

2.1.1 营销档案数据异常

工作人员现场换表或办理销户后未及时更新SG186系统档案，导致现场采集计量装置的参数（表地址、规约、波特率等）与系统不一致，进而致使采集失败。根据统计，在所有采集失败的表计中，拆迁区域及零散找不到表的数量共计占总体数量的80%，随着拆迁用户持续增加，若不加快启动此类用户的销户流程，因拆迁而找不到表的数量将会进一步增加，持续影响采集成功率。

2.1.2 户变关系错误

用电信息采集系统的户变关系与现场实际不符，导致采集失败。户变关系为台区和低压用户之间的电气隶属关系^[5]。当配电房多个变压器不使用同一根中性线接地时，那么跨台区将不能实现电力载波采集，即户变关系不对应，集中器就不能采集。工

作人员发现一部分新装表计集中器无法采集，去现场核查后发现用户台区档案错误，而配电房变压器之间未共用同一根中性线，无法实现跨采。A、B台区不共用中性线，电气关系隶属于A台区的用户，由于台区档案错误，使用B台区的集中器无法采集该用户，导致采集失败。如图2所示。

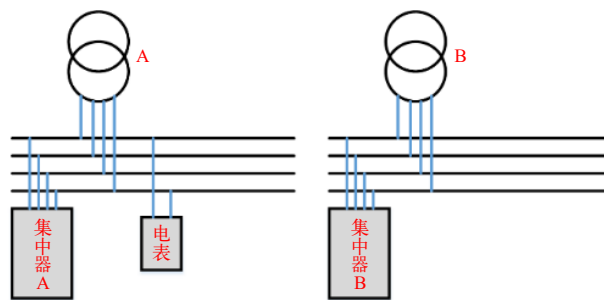


图2 户变关系错误示意图

2.1.3 集中器的安装位置

台区低压线路过长，表计位置安装分散，部分电能表与集中器的电气距离过大，使电力载波信号逐步衰减，导致集中器采集不稳定，最终影响采集成功率。通过仪器可测得集中器载波模块处的信号发射强度为142 dB μ V，而信号载波信号衰减达到28.3 dB μ V/100 m^[6]。假定噪声为60 dB μ V，载波信号有效传输的距离为290 m。因此，集中器抄表的有效电气距离达到290 m。但当低压线路达到290 m以上时，应可考虑加装集中器。

台区集中器和户表的电气分部类型主要有3种：T形、一字型、方框型。三种类型具体情况如下：

- (1) T形分布，低压线路存在较多分支，供电半径大，计量装置分布呈“T”型。可将“T”型2个中点进行延伸，在交叉点安装集中器，此时台区的抄表半径最小。
- (2) 一字形分布，低压线路供电半径大，电能表分布规则，呈直线型。此时可在低压供电线路中点的延伸线安装集中器，抄表半径最小。
- (3) 方框型分布，低压线路供电半径小，供电线路呈现方框型分布。此时安装集中器的位置选择低压线路的中心处，抄表半径最小。

2.2 上行通道异常

2.2.1 集中器信号强度过弱

安装于配电房中的集中器周围有墙壁阻隔，形成信号屏障，导致信号时常被屏蔽，集中器信号强度弱，常发生掉线现象。从表2可知，配电房和电

井的无线信号强度小于外部开放空间，GPRS 信号削弱明显，严重情况下会造成无法通信。

表 2 无线信号强度

位置	信号强度	信号衰减
配电房	-90~-130 dBm	20~35 dB
电井	-80~-120 dBm	15~20 dB
外部开放空间	-60~-100 dBm	5~10 dB

通过在集中器上加装高增益天线、低衰减馈线，改善通信环境^[4] 常见天线增益特性如表 3 所示。

表 3 常见天线的增益特性

类别	增益特性
胶棒天线	-3~0 dBi
吸盘天线	2~5 dBi
高增益天线	13~16 dBi

2.2.2 终端通信模块故障

当终端或集中器上行通道无法连接主站，可以判断为通信模块发生故障。此时须更换通信模块，并对参数进行更新。

3 提高采集成功率措施

3.1 管理措施

3.1.1 整治低压居民部分拆迁以及零散无表情况

对于现存拆迁区域，加快对确认已拆迁且无法联系的用户销户工作，严格把关拆迁销户核实流程，同时闭环管理拆迁用户的销户工作，每周制定拆迁表计数量的压降目标并通报目标达成情况。

对于零散无表情况，制定“一表一案”，实行抽查制度，管控人员抽查一定比例记录在案的无表用户，前往现场排查。

进一步推动连续采集失败表计数量的压降工作，重点攻克长期采集失败表计的排查问题，包括零散无表情况在内，以线路为基础，展开“蜘蛛网”式摸排，将长期采集失败表计区域内的线路走向及分布梳理清楚，解决找表“老大难”问题。

3.1.2 严格落实工程换表管控机制

严格规范工程换表流程归档时间考核，严格管控换表流程流转情况，要求负责换表流程的责任人严格遵守流程归档时间。

3.1.3 逐步增配台区配变终端

在无配变终端的台区，由于集中器须同时采集台区用户以及关口表数据，容易出现漏采情况，须对采用集中器直采台区逐步增配配变终端，改善低压配变采集指标。

3.1.4 加快更换老旧（低版本）表计

老旧版本采集故障率始终大于新版本，须将表计轮换作为日常重点工作持续开展，严格落实监控考核制度。

3.1.5 优先选用失败率低的终端品牌

目前使用最多的配变终端和集中器厂家采集失败率明显较大，在后续新装或更换终端、集中器的工作中尽量避免该类厂家，优先选用采集失败率低的品牌。

3.2 技术措施

下行通道可采用双通道采集模式，将微功率通信和电力线载波通信并行使用，可以提高采集的效率和可靠性，降低失败率。

对于新装用户采集失败或导致相邻台区线损异常的用户，使用台区识别仪逐个核实用户实际所在台区。

优化集中器的安装地点，尽可能使集中器处于计量装置的载波通信中心，保证表计均在有效抄表范围内。

配电房中相邻台区选装不同厂家的集中器，降低发生串扰的可能性。

参考文献

- [1] 马晓龙. 石家庄供电公司用电信息采集系统实用化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [2] 李靖波, 穆海龙. 影响用电信息采集成功率原因分析[J]. 电力需求侧管理, 2011,13(6): 60-62.
- [3] 向奕同, 黄宇翔, 段锴, 等. 低压台区线损原因分析及降损措施研究[J]. 电工技术, 2022,(13): 17-19.
- [4] 杨晓芳. 影响用电信息采集成功率原因分析[J]. 中国电力教育, 2014,(11): 196-197.
- [5] 李平, 吴伟将, 严永辉, 等. 基于数据驱动的台区户-变关系核查方法研究[J]. 电力需求侧管理, 2020,22(1): 64-68.
- [6] 吴冕. 用电信息采集系统建设方案及其采集成功率提升措施的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.

作者简介

向奕同(1993—), 男, 硕士, 研究方向为用电检查、电力营销、采集计量。

(责任编辑: 袁航)

通过台区线损率变化及时发现和消除 低压电网漏电隐患

汪岳荣

(国网浙江衢州供电公司, 浙江 衢州 324002)

摘要: 低压线路和设备漏电不仅造成供电企业直接经济损失, 更可能对电网运行和人身安全构成威胁, 通过系统监测低压台区线损率的变化, 根据不同的变化规律, 分析研判并快速排查治理不同类型的低压电网漏电隐患, 可以及时发现问题, 消除潜在安全风险, 此方法在近年的实践中取得明显成效。

关键词: 台区线损率; 低压电网; 漏电; 分析研判; 隐患排查

中图分类号: TM726.2

Timely Find and Eliminate the Potential Leakage of Low-voltage Power Grid Through the Change of Line Loss Rate in Substation Area

WANG Yuerong

(State Grid Zhejiang Quzhou power Supply Company, Zhejiang Quzhou 324002, China)

Abstract: The leakage of low-voltage lines and equipment not only causes direct economic losses to power supply enterprises, but also poses a threat to power grid operation and personal safety. By monitoring the change rule of the line loss rate in the low-voltage substation area, we can timely find and quickly treat the potential leakage hazards of different types of low-voltage power grid, and eliminate the potential safety risks. This method has achieved remarkable results in practice in recent years.

Keywords: line loss rate in substation area; Low voltage power grid; electric leakage; analysis, research and judgment; hidden troubleshooting

低压线路和设备漏电是较为常见的电网故障现象, 不仅会造成供电企业直接经济损失, 更可能引起较为严重的安全隐患。国网浙江衢州供电公司台区线损治理专班, 在近年的实践中通过低压台区线损率的变化, 分析研判并成功排查治理了许多漏电问题, 及时消除了安全隐患, 取得了明显成效。

1 漏电对台区线损率的影响

引起低压台区线损率异常升高的原因有很多, 其中一个重要因素是漏电。低压线路或设备漏电, 对台区线损率的影响程度取决于 2 个方面: (1) 漏电电流值的大小。在台区实际日用电量相对稳定的情况下, 漏电电流值越大, 影响台区日线损率升高的程度越明显; (2) 台区供电量的大小。台区日用电量越大, 相同漏电电流值所引起台区日线损率的影响越小, 反之, 台区日供电量越小, 相同漏电流

收稿日期: 2023-01-06

流值所引起的影响越大。但无论影响程度如何, 漏电均会对台区线损率产生不同程度的影响。

2 运用台区线损率变化研判漏电情况

在台户对应关系完全一致的前提下, 如果该台区用户数量未发生变化, 近期也无新增在途流程用户, 用户采集数据正常, 台区低压用户总用电量相对稳定, 但台区供电量明显增加, 则存在漏电可能性较大, 基本可以分为 2 种类型进行分析研判。

2.1 台区线损率大幅升高

2.1.1 台区线损率大幅升高案例

某低压台区日线损率一直保持较为稳定状态, 基本在 1.5% 左右, 2022 年 3 月 20 日开始, 日线损率突然升高至 7% 以上, 线损电量大幅度增加, 之后持续呈现高位运行。

该台区为城市住宅小区供电台区, 运行多年, 用户相对稳定, 选取线损率变化前后日期, 逐户比对核查用户用电量情况, 未发现明显变化, 核查在

途流程，未发现新装或增容用户流程，基本排除计量异常、采集数据缺失和窃电问题，总用电量基本稳定，但台区总供电量明显增加，且线损增加量较为稳定，分析研判可能存在漏电故障。随即组织现场排查，发现某低压出线柜一路电缆存在 20 A 左右的漏电电流，继续排查漏电点，发现某路表前电源相线绝缘破损，触碰分接箱金属外壳，导致持续漏电。现场处置完毕后，次日线损率即恢复正常。

2.1.2 漏电导致台区线损率大幅升高的特点

引起台区线损率大幅增加的原因包括计量装置故障、计量错误接线、采集数据缺失、窃电、漏电等，但漏电引起的线损率大幅突变具有 2 个不同特点：（1）漏电具有持续性，一旦出现漏电问题，则会持续出现高线损率，一天内不论高峰期还是低谷期持续出现电量损失，漏电的某相线路高峰期和低谷期电流值都会升高，而计量异常类、窃电或采集类等问题，一般一天内不同时段会呈现高低变化，或前后几天存在明显高低波动；（2）漏电具有相对稳定性，线损率大幅度升高后，在一定时期内漏电损失电量相对稳定，日线损率曲线稳定在一个高位，不同于其他原因引起的高线损会有一些幅度的波动，甚至锯齿形波动。

2.2 台区线损率渐进升高

2.2.1 台区线损率渐进升高案例

某台区 2022 年 9 月线损率偏高且超出合理目标区间，从全月看每日线损率相对稳定，变化波动幅度较小，从用电信息采集系统回看前期各月度的线

损率情况，发现近 3 个月以来，该台区线损率从 6 月的 3% 左右，逐渐升高至 9 月的 5% 以上，且日线损电量值 6—9 月呈现较为稳定的增加趋势。

该台区为农村架空线路供电台区，105 户低压用户，绝大部分为农村居民用电，用户数量近一年来均未发生变化，台区负载率不高，400 kV·A 变压器，日供电量在 2000 kW·h 左右，处于相对合理的运行状态。通过用电信息采集系统进行逐户数据分析，基本排除计量异常和窃电等可能性。初步研判可能存在漏电问题。随即组织现场核查，发现该台区其中一路低压出线存在 14 A 漏电电流，进一步查找漏电点，查明一处较为偏僻的居民用电杆上电源搭接点，相线绝缘层磨破后与低压电杆拉线线夹触碰，造成拉线带电引起漏电，如图 1 所示。

2.2.2 漏电导致台区线损率渐进升高的特点

漏电引起台区线损率升高的程度，主要取决于漏电点的金属介质电阻大小和有效接触面大小，以及台区总供电量的大小。漏电接触点电阻越小，接触面越大漏电电流越大，对台区线损率影响越大，同时台区总供电量越小，漏电对台区线损率的影响越明显。

台区线损率渐进升高与突发性大幅度升高具有不同的漏电特点：（1）初期漏电电流较小，日损失电量相对较少，不易察觉；（2）一般为架空导线绝缘磨损后触碰金属介质，接触面随着发热后绝缘层破损加大而不断增大，电量损失呈现递进式增加趋势；（3）受外力破坏，如路面挖掘、地面沉降等，



图 1 某拉线上现场测得漏电电流 13.5 A

引起地理电缆局部绝缘损坏，漏电发热后电量损失逐步加大。

3 引起低压漏电的主要原因及防范措施

3.1 主要原因

低压漏电产生的原因多种多样，根据近年台区线损分析研判和排查治理的大量实际案例，梳理总结如下：（1）地理电缆施工时绝缘受损，运行多年后绝缘击穿导致漏电；（2）地理电缆因土建施工受挖掘、碾压等外力破坏，导致绝缘层破损漏电；（3）落地式金属表箱、低压分接箱内导线触碰箱体孔洞边缘，割破绝缘层后导致漏电；（4）因过负荷造成导线绝缘层烧损后，触碰金属箱体导致漏电；（5）架空线路绝缘导线安装施工时不规范，与抱箍、线夹等金具直接接触，长时间运行后磨损造成绝缘层破损漏电；（6）架空线路因大风或超高车辆刮碰后断落至地面、水塘等引起漏电；（7）农村户联线穿过用户房屋外金属遮雨棚，导线绝缘层被割破，导致漏电；（8）集束电缆等导线与通信类钢绞线同杆近距离架设甚至缠绕，相互磨损后导致漏电；

（上接第49页）

辅助决策模块。在确定配电网线损率后，可通过专家决策系统和历史数据库，生成专项线损异常管理案例，为后续降损管控提供有效参考。历史数据库中的各项数据可从日常工作中导入，按照线损异常情况、成因分析、处理方案，形成完整有效的参考依据。专家决策系统在智能算法基础上将案例库样本与本次线损率异常情况匹配，找到同类型线损异常样本，使其能够为线损分析提供参考依据，从而改善现场检查和降损处理的工作效率。

如由偷窃电引起的异常线损处理时，可设置典型线损案例，对偷窃电时用户用电情况、异常线损情况、线损检测方案等进行详细记录，明确关键数据，保证系统在配网异常线损处理过程中能够快速将本次事故与历史数据库匹配。若存在违规窃电行为，应按照国家法律法规和国家电网公司的相关条例进行惩处，使其能够充分认识到规范用电的重要性，严格依照相关要求合理用电。

3 结束语

配电网运行过程中很容易出现由偷电漏电、过

（9）裸导线瓷绝缘子破损后导致漏电；（10）架空裸导线因竹木倒伏，引起漏电。

3.2 防范措施

防范低压线路和设备漏电，及时消除安全隐患，减少电量损失，主要从以下几方面入手：（1）规范施工行为，严格按照设计要求，规范文明组织现场施工，杜绝野蛮作业，防止新装环节损伤线路和设备，埋下漏电隐患；（2）强化施工质量把关，施工结束后的验收环节务必到岗到位，新设备投运前及时发现和整改工艺质量不良问题，确保不带隐患投运；（3）加强日常巡视，及时发现运行线路和设备因过负荷烧损、触碰磨损、用户户外设施包裹或挤压、外部施工、竹木等植物藤蔓倒伏、通信及广电弱电线路搭挂等遭受损害；（4）充分利用用电信息采集系统台区线损率变化数据信息，实施在线监控，及时发现异常，快速组织排查治理。

作者简介

汪岳荣（1967—），男，高级经济师，长期从事电力营销管理工作。

（责任编辑：袁航）

负荷运行、设计不当等引起的线损异常情况，严重影响了配网经济效益。在运维管理过程中应利用实时同步监测系统，展开配电网线损的动态检测，在4分统计计算中确定各计量点线损率情况，查找异常用电行为，提出加强用电管理、优化降损设计、展开综合防控等处理方案，从根本上解决和处理以上问题，保障配电网安全、可靠、高效、经济运行。

参考文献

- [1] 胡如乐. 配电网分线线损异常多通信信道实时监测方法[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(8): 133-136.
- [2] 劳永钊, 吴任博, 肖健, 等. 中压配电网线损实时同步监测系统设计方案研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(z1): 139-146.
- [3] 叶劲龙. 基于分层式节点的10 kV配电网同期线损自动监测方法[J]. 通信电源技术, 2022, 39(9): 72-74.
- [4] 李健, 黄俊铭, 朱健全, 等. 基于过程状态特征化的配电网线损计算[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 55-61.
- [5] 潘炜, 史琳, 张卓. 基于机器学习的配电网线损自动计算模型分析[J]. 通信电源技术, 2020, 37(17): 213-215.

作者简介

梁挺江（1977—），男，本科，工程师，技师，主要从事电力系统等相关工作。

（责任编辑：袁航）