

助力共建“一带一路” 书写互利共赢新篇章

本刊编辑部

第三届“一带一路”国际合作高峰论坛于2023年10月17—18日在北京隆重举行，151个国家、41个国际组织的代表踊跃与会，世界的目光再次聚焦北京，聚焦中国。

2023年是共建“一带一路”重大倡议提出10周年。10年间，一条沿线国家携手并进的阳光大道，为能源电力合作开辟了新天地，提供了新机遇。

国家电网有限公司积极服务高质量共建“一带一路”，充分发挥自身电网建设、管理和技术优势，逐步实现技术、装备、标准、服务全产业链“走出去”。建成了全球电压等级最高、能源资源配置能力最强的电网，领先的特高压输电、大电网运行控制等技术，为推进电网互联互通、服务高质量共建“一带一路”提供了坚实基础和保障，为世界能源可持续发展提供了中国的创新实践，推动了项目所在国家和地区的能源电力保供和绿色转型。例如在南美广袤的亚马逊平原，美丽山特高压输电线路把美丽山水电站的丰沛电力输送至2000 km外的巴西东南部负荷中心，满足2200万余人的用电需求。

国家电网有限公司从2013年的3个国家3个投资运营项目，经过10年开拓和发展，先后在菲律宾、巴西、葡萄牙、澳大利亚、意大利等10个国家和地区投资运营13个能源网项目，印发《参与“一带一路”建设规划》《服务共建“一带一路”高质量发展的指导意见》等。近年来，国家电网有限公司推动与俄罗斯、蒙古国等周边国家电网互联互通，建成10条跨国输电线路，累计交易电量超过440亿kW·h。

国家电网有限公司目前已实现三大国际标准组织标准全覆盖，累计牵头立项国际标准203项，牵头发布国际标准95项，推动606项中国标准实现海外应用。依托在特高压、智能电网等领域的技术优势和创新实践，主导制定国际标准195项，并在国际上率先建立完整的特高压交直流、智能电网技术标准体系，发起创立8个国际电工委员会（IEC）技术委员会。主导制定了中国的新能源汽车充换电标准体系，使其与美国、德国、日本相关标准体系并列为世界4大新能源汽车充换电标准体系。

10年来，南方电网公司坚持共商共建共享的原则，在“一带一路”中留下了不俗的成绩。2004年，南方电网公司首条跨国线路顺利联通，拉开了澜湄国家电力互联互通的序幕，如今，南方电网公司通过10余回110 kV及以上电压等级输电线路与澜湄国家电网相连。截至2023年9月底，累计完成跨境双向电力贸易超过700亿kW·h，其中90%以上为清洁能源。

10年来，南方电网公司与共建国家加强规则标准对接互认与应用，从越南小中河水电站、智利首个高压直流输电项目，到澜湄区域电力技术标准促进会成立，中国标准、中国技术、中国装备一步步在海外落地应用。2023年1月，南方电网公司、柬埔寨电力公司、老挝国家电力公司共同发起成立澜湄区域电力技术标准促进会，各成员单位共同研究、编制、使用促进会标准，携手提升澜湄区域电力技术和装备的标准化水平，以标准引领区域内电力装备、工程建设、电网运行、供电服务水平的全面提升，持续推进能源电力贸易与合作，为共建国家和地区发展注入新动力，书写互利共赢的新篇章。

农村电气化

NONGCUN DIANQIHUA

2023年第11期 总第438期 1979年创刊

2023年11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 926531638/649/586/647
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 架空输电线路工程的质量控制要点问题与对策分析
王润琪, 张心语, 高 超, 于立叁, 蓝 骞, 郎野村
- 3 特高压输电线路在线监测技术应用 李 程

运行维护

- 6 一种不停电修复 10 kV 架空裸导线的方法
朱小莹, 徐 勇, 汤春俊, 梁加凯
- 8 基于标准化的高压开关柜电气二次设计
毛志恒, 黄成东, 胡顺健, 李健德, 龙书生
- 10 高原风电场架空线路冰雪灾害治理研究 文 兴
- 14 高压及超高压电缆户外充油终端受力分析及计算
贾 超, 潘海平, 方 菊, 易亚琳
- 18 激光清除输电线路异物的技术分析
王海涛, 赵 蔚, 崔建勇, 段赛飞
- 21 变压器套管安全隐患与防范措施的分析 洪艳君
- 23 66 kV 干式空心电抗器短路故障整体参数试验研究 陈 颂
- 26 几种对出口压板投退状态进行检测的方法 李靖文, 谢煜堃

安全生产

- 30 开关柜绝缘放电信号缺陷定位典型案例
王思萌, 陈东巍, 李晓阳, 雷劲跃, 刘 辰, 李 震
- 34 500 kV 线路耐张线夹断裂原因分析及治理防范建议 张贵军
- 39 两起继电保护误整定导致误跳闸事故分析 张 祥, 李慧勇

智能电网

- 41 一种变电站智能联合巡检系统 吴俊杰
- 45 智能电能表的应用与维护探讨 马 野
- 48 变电站一键顺控改造技术的研究与应用 胡 杨
- 51 配置馈线自动化的配网故障监控方案研究 晓宇
- 54 谈智能电力调度自动化系统 黄泗兴

信息系统

- 58 基于深度学习的线损异常诊断系统研究 张恒超, 沈秋英,
沈 杰, 李苏芙, 范 彪, 王 琨, 蔡嘉辉, 吕自贵



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

QC 小组

- 65 电网主备调备份装置的研制 程站立, 廖兵, 代飞
68 缩短变配电倒闸操作接地线装设时间 张舒怡
72 一种真空度检测装置及抽气系统 赵国航, 齐泽力
74 适用不停电检修的支柱绝缘子固定导线金具研制
王庆泽, 艾茂民, 张硕, 王佳, 卢国波

清洁能源

- 77 农村地区“煤改电”增量负荷计算及户均配变容量配置方法研究 孙钦斐, 王瀚秋, 李干, 马凯, 李香龙
83 高供低计分布式光伏用户功率因数调节电费分析研究
廖涛, 张欲晓, 张书仓, 罗辉勇, 曾信义, 张卿瑜
87 含高比例分布式电源的自治型配电单元构建方法研究
施天成, 杨欣, 李志伟, 种亚林, 王蕊, 王磊

器具设备

- 92 基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置研发
冯忠奎, 李阳, 车俊儒, 张哲, 赵彦龙
95 输电铁塔防误登智能脚钉研究与应用 王磊, 许建清, 金桂如

经验点滴

- 98 台区线损治理典型经验 杜颖
100 变电工程中变压器安装调试的注意事项 麻强磊
103 220 kV 双母线带旁路接线变电站代路操作比较
王婷, 申俊龙, 武志松
105 备用电源自投装置在县级电网中的应用 王留长

资讯

- 前插页 助力共建“一带一路”书写互利共赢新篇章 本刊编辑部
67 山东淄博公司: 建成投运全市首个“零碳”电力彩虹驿站
76 浙江舟山公司: 新能源汽车应急救援充电服务正式启用
94 山东威海公司: 深挖数据价值 推动一码办电
107 浙江衢州公司: 零距离服务特色农业电气化生产
封3 建湖公司: 志愿者特巡护航候鸟生命线 陶涛, 肖兵
封3 泗洪县梅花供电所: 开展低压台区巡视 确保安全稳定供电
陶其海

广告

- 封面 北京三优新能源科技有限公司
封2 宝胜科技创新股份有限公司
108 《农村电气化》《农电管理》订阅单
封底 风华线缆有限公司

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 Analysis of Key Issues and Countermeasures for Quality Control of Overhead Transmission Lines Engineering/WANG Runqi, ZHANG Xinyu, GAO Chao, YU Lisan, LAN Qian, LANG Yecun
- 3 Application of Online Monitoring Technology for Ultra-high Voltage Transmission Lines/LI Cheng

◆ Operation & Maintenance ◆

- 6 A Method of Repairing 10 kV Overhead Bare Conductor without Power Failure/ZHU Xiaoying, XU Yong, TANG Chunjun, LIANG Jiakai
- 8 Electrical Secondary Design of High Voltage Switchgear Based on Standardization/MAO Zhiheng, HUANG Chengdong, HU Shunjian, LI Jiande, LONG Shusheng
- 10 Research on Ice and Snow Disaster Management of Overhead Lines in Gaoyuan Wind Farm/WEN Xing
- 14 Force Analysis and Calculation of Oil-filled Outdoor Termination of High Voltage and Ultra High Voltage Cable/JIA Chao, PAN Haiping, FANG Ju, YI Yalin
- 18 Technical Analysis of Laser Removal of Foreign Bodies in Transmission Lines/WANG Haitao, ZHAO Wei, CUI Jianyong, DUAN Saifei
- 21 Analysis of Potential Safety Hazards and Preventive Measures of Transformer Bushing/HONG Yanjun
- 23 Study on Overall Parameters of Short Circuit Fault of 66 kV Dry Hollow Reactor/CHEN Song
- 26 Several Kind of Method to Detach the Status of the Relaying Plate/LI Jingwen, XIE Yukun

◆ Safety ◆

- 30 Typical Case of Insulation Discharge Signal Defect Localization in Switchgear/WANG Simeng, CHEN Dongwei, LI Xiaoyang, LEI Jinyue, LIU Chen, LI Zhen
- 34 Analysis of Fracture Causes of 500 kV Transmission Line Tensioning Clamp and Suggestions for Treatment and Prevention/ZHANG Guijun
- 39 Analysis of Two Cases of Relay Protection Missetting Resulting in Mistrip Accidents/ZHANG Xiang, LI Huiyong

◆ Smart Grid ◆

- 41 A intelligent joint inspection system for substation/WU Junjie
- 45 Discussion on the Application and Maintenance of Intelligent Energy Meters/MA Ye
- 48 Research and Application of One Key Sequential Control Transformation Technology in Substation/HU Yang
- 51 Research on the Power System Monitoring Scheme for the Distribution Network Fault Applied with Feeder Automation/XIAO Yu
- 54 On Intelligent Power Dispatching Automation System/HUANG Sixing

◆ Information System ◆

- 58 Research on Line Loss Abnormal Diagnosis System Based on Deep Learning/ZHANG Hengchao, SHEN Qiuying, SHEN Jie, LI Sufu, FAN Biao, WANG Kun, CAI Jiahui, LYU Zigui

◆ QC Group ◆

- 65 Development of Power Grid Primary and Standby Backup Device/CHENG Zhanli, LIAO Bing, DAI Fei
- 68 Shorten the Installation Time of Grounding Wire for Switching Operation of Power Transformation and Distribution/ZHANG Shuyi
- 72 A Vacuum Degree Detection Device and Extraction System/ZHAO Guohang, QI Zeli
- 74 Development of Hardware of Wire Fixed in Insulator Suitable for Uninterrupted Maintenance/WANG Qingze, AI Maomin, ZHANG Shuo, WANG Jia, LU Guobo

◆ Clean Energy ◆

- 77 Research on the Calculation Method of Incremental 'Coal to Electricity' Load and Average Distribution Transformer Capacity/SUN Qinfei, WANG Hanqiu, LI Gan, MA Kai, LI Xianglong
- 83 Analysis and Research of Power Adjustment Charge for Distributed PV Users with High Voltage Power Supply and Low Voltage Metering/LIAO Tao, ZHANG Yuxiao, ZHANG Shucang, LUO Huiyong, ZENG Xinyi, ZHANG Qingyu
- 87 Construction of Self-consistent Power Distribution unit with High Ratio Distributed generation/SHI Tiancheng, YANG Xin, LI Zhiwei, CHONG Yalin, WANG Rui, WANG Lei

◆ Equipment ◆

- 92 Development of a Monitoring and Warning Device for External Damage Prevention of High-voltage Cables Based on Single Zone Vibration Optical Fiber/FENG Zhongkui, LI Yang, CHE Junru, ZHANG Zhe, ZHAO Yanlong
- 95 Research and Application of Intelligent Foot Pins for Preventing Mistaken Climbing of Transmission Towers/WANG Lei, XU Jianqing, JIN Guiru

◆ Experiences ◆

- 98 Typical Experience in Line Loss Management in Power Supply Station/DU Ying
- 100 Precautions for Transformer Installation and Debugging in Substation Engineering/MA Qianglei
- 103 Comparison of Substitution Operation for 220 kV Double Bus Substation with Bypass Connection/WANG Ting, SHEN Junlong, WU Zhisong
- 105 Backup Power Supply Automatic Switching Device in County-level Power Grid Application/WANG Liuchang

架空输电线路工程的质量控制要点与对策分析

王润琪*, 张心语, 高超, 于立叁, 蓝 睿, 郎野村

(国网北京市电力公司检修分公司, 北京 丰台 100073)

摘要: 随着城镇化步伐的加速, 社会对电力供应的要求日益提高。架空输电线路成为电力建设工程项目的重要组成部分, 施工环节中的质量管控直接决定设备投产后的安全稳定运行。架空输电线路施工管理存在着复杂性和系统性问题, 对工程技术人员的要求也很高, 因此, 必须做好对架空输电线路施工管理问题的研究, 强化对工程的质量过程管理, 严抓标准工艺应用率、三级质检完成率, 以提高工程建设管理的规范性。在工程项目前期阶段, 必须严格履行各级交底制度以及施工工期的排定工作, 在建设实施过程, 必须保证各分部分项工程质量管控, 严抓标准工艺卡的应用, 克服建设实施阶段中可能出现的各种困难, 从而整体提高了架空输电线路施工管理的效率。

关键词: 电力工程; 送电线路; 施工; 质量控制

中图分类号: TM727

Analysis of Key Issues and Countermeasures for Quality Control of Overhead Transmission Lines Engineering

WANG Runqi*, ZHANG Xinyu, GAO Chao, YU Lisan, LAN Qian, LANG Yecun

(State Grid Beijing Electric Power Company Maintenance Branch, Beijing Fengtai 100073, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization, the demand for electricity supply in society is increasing day by day. Overhead transmission lines have become an important component in power engineering construction projects. Quality control directly determines the safe and stable operation of equipment. There exist complex and systematic issues in the construction management, and the requirements for engineering and technical personnel are also high. Therefore, it is necessary to make research on construction management of overhead transmission lines so as to strengthen quality process administration of the project, strictly control application rate of standard processes as well as completion rate of three-level quality inspection, thus the standardization of engineering construction management can be improved. In the early stage, it is of necessity to strictly adhere to the disclosure system at all levels and schedule the construction period. During construction, quality control of each sub project must be ensured and application of standard process cards should be grasped. In this way, various difficulties can be overcome that may arise during the implementation stage and the overall efficiency of overhead transmission line construction management can be effectively enhanced.

Keywords: electric power engineering; power transmission line; construction; quality control

架空输电线路施工过程中质量管控是决定设备后期安全运行的重要环节, 也是项目管理的重要经济技术指标, 直接关系到施工成本控制、运行维护费用。

1 架空输电线路施工质量的重要性

科学合理地降低施工成本。通过强化对架空输电线路质量监管, 配齐各级质量管理人员, 利于科学控制施工成本。勘察设计单位健全设计质量回头看机制, 强化设备材料进场验收, 杜绝因质量问题造成的后期停工待料时间的发生; 强化施工项目部

收稿日期: 2023-08-07

的技术监管, 由项目总工负责编制施工质量策划文件, 定期开展工程项目质量管理自查, 落实线路工程标准工艺, 按时组织开展班组级、项目部级验收。以上管理措施的实施确保工程项目有序开展, 提升工程项目的经济性。

完善施工进度管控体系, 施工项目部统筹规划好三级质量验收环节, 即班组、项目部、公司级质量验收, 应用“线路工程质量验收统一表式”, 实时准确记录现场实测数据, 最终形成公司级验收报告, 并及时进行资料归档, 保证过程资料的准确性、及时性、完整性。

2 送电线路的工程质量控制要点问题与对策分析

2.1 做好送电线路的勘查工作

要确保架空输电线路施工的顺利进行，就必须提前预判各种问题，并采取相应的管控措施，以便于进一步提高架空输电线路的施工进度和工程质量水平。

工程的前期勘察工作是整个工程施工的重要基石，只有做好了前期勘察准备工作，才能为后期的施工打下良好的技术基础^[1]。所以，在施工前应认真仔细的勘察工程所在的地理、自然环境，使勘察成果与具体施工作业方法有效结合，如山区施工要充分调查各个施工点位地形能否满足物料运输以及堆放条件，结合地勘报告观测地质条件，明确施工工法，调查地上、地下障碍物的情况，以便考虑土石方开挖工作量及后期架线施工的导线防磨措施。

由于送电运行线路的工程建设环节较多，施工设计工作较为烦琐，在开展建筑工程设计工作时，也必须从多角度综合考虑工程建设中可能发生各种施工问题。为此，各单位工程设计人员应做好与施工部门的协调合作，并针对实际施工状况适时改变不合理的设计要求，以便保障后续工程建设的顺利实施。

在勘察工作完成后，要妥善保存施工的现场勘察数据。这些数据不仅作为设计部门进行送电线路施工方案设计的重要依据，还必须依靠勘察数据选用正确的施工机具。同时勘察部门还必须与施工保持密切联系，以便确定整个工程施工的顺利开展。

2.2 提高人员综合素养

进一步提高工程项目管理人员的技能储备，提升业务素养，是进一步提高架空输电线路施工质量的关键。

工程管理必须以身作则，承担义务与职责，增强职责能力，发展思想，充分发挥作用^[2]。

施工项目部须强化项目部管理人员技术培训工作，尤其是要加强质量文件的宣贯培训，依据技术标准、制度及规程规范，通过月度例会、安全日等多种形式进行宣贯培训，对重点要求深入解读，系统讲解。确保满足现场质量验收需要，并结合架空输电线路施工的具体内容、主要工作过程、重

要环节的质量管理和运用行业的新技术、新工法等；工作人员可以通过参加业内科技交流会或在其他电力工程上开展交流学习的方法，开阔视野，掌握先进的输电施工技能，切实提升自己的综合素养。

2.3 强化架空输电线路设备材料管理

架空输电线路工程的设备材料管理是质量管控的重点环节。严格设备材料出厂验收把关，物资项目负责人负责组织出厂验收，严格检查试验检测报告和原材料检测报告，重点对标准工艺执行情况与质量通病治理情况进行检查。设备材料到场后，总监理工程师负责组织业主、监理、施工、厂家、物资等5方负责人开展联合验收，查验设备材料规格、型号、技术参数、质量技术文件等，组织验收问题并整改；施工项目部项目经理和项目总工程师负责建立设备、材料质量问题台账，跟踪处理情况。

2.4 严抓施工质量控制

送电线路工程验收须执行“三级验收”管理，即班组自检、项目部复检、公司级专检。对于班组自检，可以由各分包单位负责人组织所属班组自行实施。项目部派驻的现场管理人员进行监督，各分包班组长负责，验收结果及整改情况上报项目部专职质量管理人员；自检工作结束后，经现场管理人员签字确认，申请项目部复检。复检验收组按照具体实施技术方案、质量验收规范、工艺要求组织实施，验收合格后申请公司级专检。在工程验收过程中，应当重点关注发现的问题和消缺工作。通过制定班组限期整改计划，将问题清单和消缺清单比对，动态跟踪验收问题的整改情况，形成闭环管理体系，确保缺陷问题及时整改，相关措施落实到位。

严抓质量通病防治。施工项目部项目经理和项目总工程师结合“输变电工程质量通病防治手册”、创优否决项、优质工程金银奖现场督查问题、历次质量巡检检查的问题等，结合工程实际逐一研究制定质量通病防治措施。业主、监理、施工3个项目部质检员负责把负面清单控制要求纳入施工方案、作业票、监理日志、量化考核等管控范围，把质量控制措施落实到每道工序，并逐项检查，拍照记录。对于发现的质量问题，及时以整改反馈单的形式督促整改，整改完毕后进行复查。确保重点措施取得实效，从而建设全链条质量管理体系，推进工程高质量建设。

(下转第64页)

特高压输电线路在线监测技术应用

李程

(国网湖北咸宁市咸安区供电公司, 湖北 咸宁 437000)

摘要: 我国在特高压输电方面走在了世界前列, 但是受运行环境的影响, 特高压输电线路容易出现各类安全或故障问题。首先对特高压输电线路在线监测系统进行了简要概述, 主要分为数据采集层、数据传输层以及数据应用层。然后对系统中使用的主要在线监测技术进行了详细分析, 主要包括气候环境监测技术、杆塔倾斜监测技术、线路覆冰监测技术、视频图像检测技术等, 上述监测技术的应用能显著提升特高压输电线路的运行稳定性和可靠性, 为用户提供更加优质的服务。

关键词: 特高压; 输电线路; 在线监测; 运行可靠性

中图分类号: TM727

Application of Online Monitoring Technology for Ultra-high Voltage Transmission Lines

LI Cheng

(State Grid Hubei Xianning Xian'an District Power Supply Company, Hubei Xianning 437000, China)

Abstract: China has led the world in the field of ultra-high voltage transmission, but due to the impact of operating environment, ultra-high voltage transmission lines are prone to various safety or fault problems. Firstly, a brief overview is given of the online monitoring system for ultra-high voltage transmission lines, which is mainly divided into data acquisition layer, data transmission layer, and data application layer. Then, a detailed analysis will be conducted on the main online monitoring technologies used in the system, including climate and environmental monitoring technology, tower tilt monitoring technology, line icing monitoring technology, video image detection technology, etc. The application of these monitoring technologies can significantly improve the stability and reliability of the operation of ultra-high voltage transmission lines, providing users with more high-quality services.

Keywords: ultra-high voltage; transmission lines; online monitoring; operational reliability

0 引言

随着社会工业的快速发展和人们生活水平的不断提升, 社会对电能的依赖程度越来越高, 且用电量越来越大。近年来我国在电力领域有了突飞猛进的发展, 特别是特高压输电领域走在了世界前列。由于特高压输电线路须要在野外运行, 容易受环境因素的影响, 易出现各类故障, 影响输电线路的运行稳定性和可靠性, 降低人们的用电体验。利用先进的在线监测技术对特高压输电线路运行过程中的状态信息参数进行采集, 基于采集结果开展深入分析研究, 进而发现线路中潜在的安全问题和故障隐患, 是提升输电线路运行稳定性、可靠性的重要措施和手段。本文以特高压输电线路为研究对象, 对在线监测系统进行了简要介绍, 重点研究了相关监测技术应用情况。

收稿日期: 2023-09-14

1 特高压输电线路在线监测系统概述

当前智能领域得到了快速发展, 在特高压输电线路监测系统中引入智能物联网技术, 能够提升系统的运行效率。如图 1 所示为基于智能物联网技术的监测系统的应用框架结构图。由图 1 可知系统分为 3 个层级, 分别为数据采集层、数据传输层和数据应用层。在采集层设置了多功能监测基站, 利用太阳能板进行供电, 在应用层设置了监控中心。采集层主要是利用各类传感器对特高压输电线路周围环境及自身运行状态信息进行采集, 多功能监测基站将所有传感器采集的数据信息进行收集。采集的数据信息通过数据传输层上传至数据服务器中心, 利用系统的算法程序对数据进行综合分析处理, 从而感知特高压输电线路的运行状态, 研判是否存在故障或者安全隐患^[1]。若存在问题系统会发出报警信号, 工作人员根据报警信号及时处理问题, 将隐

患扼杀在萌芽阶段，或者尽可能缩小故障的影响范围。

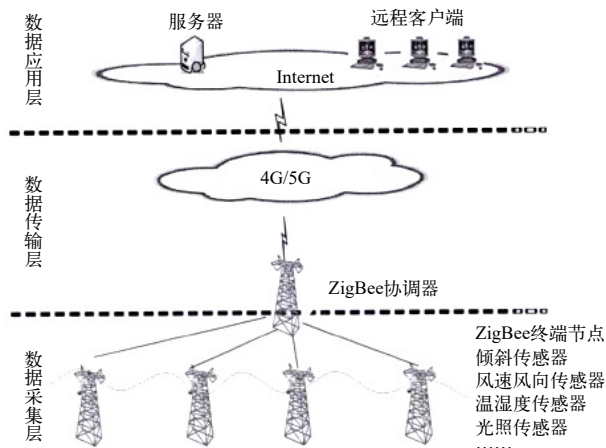


图1 特高压输电线路在线监测系统

系统通信方面，考虑到特高压输电线路全部分布在野外，不方便利用有线方式进行数据传输，因此数据传输大部分基于无线形式进行。数据采集层与多功能监测基站之间基于 ZigBee 无线网络进行数据传输，基站与监控中心之间 4G/5G 网络进行数据传输。

2 关键在线监测技术的应用

随着在线监测技术的不断发展，未来在特高压输电线路中使用的监测技术必然越来越多，会越来越成熟，本文主要对当前使用较多的在线监测技术进行介绍。

2.1 线路附近气象监测技术

我国社会对用电的需求量呈快速增加的趋势，对供电质量要求也是日益提升。很多特高压输电线路须要穿过地形非常复杂的地区，且长时间在野外

运行，其工作环境非常恶劣，使得输电线路面临比较大的安全和故障风险。特高压输电线路运行时，附近的气候条件是影响运行稳定性和可靠性的重要因素，所以有必要对输电线路附近的气候条件指标进行实时采集，以便对由于气候引起的灾害问题进行有效预防。可以采集的气候环境指标主要包括温度、湿度、风速、风向、雨量、日照等^[2]。如表1所示为气候环境在线监测使用的传感器及相关技术指标。

2.2 输电线路视频图像监控技术

特高压输电线路很多分布在地形复杂、环境恶劣的地区，如果利用传统方法进行巡检，会花费很多人力、物力、财力，且风险较高。利用当前使用比较多的视频图像监控技术，能够大幅度降低劳动强度，工地巡检时的风险，并且可以对周围环境实现 24 h 监控。监控得到的视频图像经过压缩后，通过无线网络上传，在服务器中心对视频进行解析，工作人员可以实时掌控输电线路的运行状态。视频监控主要功能有：观察地线、导线的覆冰状态，观察容易塌方或者滑坡区域的状态，观测容易受到人为破坏区域的状态，观察输电线路周围树木、竹子等的生长情况，观察绝缘子、塔体、导线等关键结构部件的异常状态，观察大跨越区的环境情况，观察偏远区域变电站的运行状态。可以用于视频监控的相机工作原理分 2 类，分别为 CCD 和 CMOS，其俯仰角度可以在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 范围变化，水平旋转角度可以在 $0^{\circ} \sim 355^{\circ}$ 范围变化，像素数超过 704×576 ，且可以通过远程方式对光圈、焦距、色度、对比度等技术参数进行调整。

2.3 输电线路杆塔倾斜监测技术

杆塔是输电线路中的重要构成部分，工作时输

表1 气候环境在线监测使用的传感器及技术指标

传感器	温度传感器	湿度传感器	风速传感器	风向传感器	雨量传感器	日照传感器
工作原理	电阻传感/热电偶传感	氯化锂湿度传感/氧化铝湿度传感/碳湿敏元件传感/陶瓷湿度传感	超声波涡接测量原理/差压变化测量原理/热量转移原理	光电信号转换原理/电子罗盘定位原理	光学折射传感	光伏二极管传感
监测范围	$-50 \sim 120^{\circ}\text{C}$	$1\% \sim 100\%$	$0 \sim 60 \text{ m/s}$	$0^{\circ} \sim 360^{\circ}$	$0 \sim 4 \text{ mm/min}$	$0 \sim 2000 \text{ W/m}^2$
精度	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	$\pm 4\% \text{ RH}$	$\pm (0.5 + 0.03V)$, V为标准风速	$\pm 0.2^{\circ}$	0.2 mm	$\pm 2\%$
分辨率	0.1°C	$1\% \text{ RH}$	0.1 m/s	0.1°	$\pm 0.4 \text{ mm}$	$7 \sim 14 \mu\text{V}/(\text{W} \cdot \text{m}^2)$

电线路会对杆塔产生一定的作用力。但是受到附近地质环境以及气候条件的影响，杆塔基础可能会出现沉降，甚至山体滑坡等难以预料的问题，进而威胁输电线路的安全运行。工程实践经验表明，输电线路在风的作用下如果长时间沿一个方向舞动，会导致杆塔受力不均匀引发杆塔倾斜；杆塔本体出现裂纹或其他变形问题导致杆塔倾斜；自然地质灾害可能导致杆塔发生倾斜。但是杆塔从倾斜到最终倒塌是一个缓慢的过程，如果能及时发现并处理完全可以规避风险。所以通过对杆塔倾斜状态的持续监测，及时发现安全隐患，可以大幅度降低由于杆塔倒塌造成的危害及经济损失^[3]。在对杆塔倾斜度进行监测的过程中，须要综合考虑风速、杆塔高度等因素对潜在的倾斜趋势进行准确预测计算，评估倒塌的风险程度，在此基础上系统向外发出报警信号。该环节使用的传感器主要是倾角传感器，工作原理分为压阻技术原理、电容效应原理、热气泡原理以及光效应原理等，监测范围为双轴 $\pm 20^\circ$ ，精度须控制在 $\pm 0.05^\circ$ 范围内，分辨率可达到 0.01° 。

2.4 输电线路覆冰预警监测技术

冬季野外的气温比较低，特别是在山区温度会在 0°C 以下。如果遇到雨雪天气，输电线路路上不可避免地会出现覆冰现象，覆冰会增加输电线路的整体质量，严重时导致绝缘子出现闪络，引起故障跳闸问题。另外会加速相关结构件的疲劳损伤，缩短其使用寿命。在输电线路覆冰的工况条件下，一旦出现故障问题，会延长故障处理时间，或者扩大故障影响范围。世界范围内已经出现了多起由于线路覆冰引起的输电故障，造成了不好的社会影响。对覆冰问题进行预警监测主要通过间接方式进行，因为在输电线路出现覆冰的情况下会导致绝缘子拉力、倾角等出现变化，通过对倾角和拉力的监测能间接反映覆冰的严重程度。基于上述监测得到的数据信息，结合气候环境状态参数，可以对导线覆冰厚度进行研判，然后结合实际情况给出针对性的覆冰防治措施^[4]。使用的拉力传感器主要是用弹性元件进行检测，检测范围为 $2\% \sim 100\% \text{FS}$ ，在该阶段为线性工作区间，精度可以达到 0.2 及以上。使用的倾角传感器工作原理包括压阻技术、电容效应、热气泡效应以及光效应等，监测范围要求达到双轴 $\geq \pm 70^\circ$ ，精度须控制在 $\pm 0.1^\circ$ 范围，分辨率为 0.01° 。

2.5 输电线路微风振动监测技术

当特高压输电线路周围存在风时，在风力影响下线路会出现一定的振动现象，当风力作用引起的振动频率与线路固有频率接近时会出现共振问题，进而导致输电线路出现断股，轻者影响特高压输电过程的稳定性，严重时引发安全事故，造成巨大经济损失。针对微风引起的振动问题，很多学者开展了一定的理论和实践研究，并将研究成果应用到工程实践中，取得了很好的效果，使得微风引起的振动危害性大幅度降低，但到目前为止无法从根本上抑制微风振动问题。所以须要对输电线路的微风振动过程进行持续监测，基于监测结果进行研究以便采取针对性的措施抑制振动现象。实践中须要利用加速度传感器对输电线路振动现象进行监测，可以对振动加速度、振幅以及频率等关键参数实现监测^[5]。基于监测结果并结合气候环境数据信息，可以对输电导线的疲劳损伤程度实施预测，获得导线的使用寿命数据信息，为导线运行维护提供有效理论指导，降低输电导线发生安全事故的概率。加速度可以使用压电式加速度传感器，其中振动加速度的监测范围为 $\pm 5g$ ，振动幅度监测范围为 $0 \sim 15 \text{mm}$ ，振动频率范围为 $0 \sim 20 \text{Hz}$ ，检测的精度可以达到 $\pm 5\%$ 。

2.6 绝缘子污秽监测技术

绝缘子是特高压输电线路重要的构成部分，但是绝缘子长时间在室外工作，如果环境质量较差，很容易对绝缘子产生污染，影响绝缘子的性能，尤其是绝缘性能，威胁特高压输电线路的运行安全性。基于此，须要对绝缘子的污秽状态进行在线监测，基本原理是对绝缘子的表面状态进行测量，根据相关数据代入理论模型进行计算分析，判断绝缘子表面实际情况。比如漏电电流是反映绝缘子污秽程度的重要指标，可以检测漏电电流大小及其分布情况，进而判断绝缘子的表面状态。相关计算过程可以利用系统中内置的算法程序进行处理即可。

3 结束语

受到周围环境因素的影响，特高压输电线路运行过程中的故障率通常比较高。基于此，通过先进

(下转第86页)

一种不停电修复 10 kV 架空裸导线的方法

朱小莹¹, 徐勇^{2*}, 汤春俊², 梁加凯²

(1. 金华送变电工程有限公司, 浙江 金华 321000; 2. 国网浙江金华供电公司, 浙江 金华 321000)

摘要: 10 kV 架空导线主要架设在道路两侧等人员车辆密集场所, 对地距离有限, 易遭受大型施工机械误碰、树木压覆以及雷击等事故, 引发导线损伤、断股等故障。根据 10 kV 架空裸导线因外力破坏造成的线径损伤, 结合现有新工具、新材料和新工艺, 提出一种不停电剪断重接架空裸导线的方法, 保证修复后导线的机械强度、电气性能均符合运行标准要求, 且修补过程线路用户用电不受影响。

关键词: 架空裸导线; 导线损伤; 剪断重接; 不停电作业

中图分类号: TM726

A Method of Repairing 10 kV Overhead Bare Conductor without Power Failure

ZHU Xiaoying¹, XU Yong^{2*}, TANG Chunjun², LIANG Jiakai²

(1. Jinhua Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Zhejiang Jinhua 321000, China; 2. State Grid Zhejiang Jinhua Power Supply Company, Zhejiang Jinhua 321000, China)

Abstract: 10 kV overhead conductors are mainly erected on both sides of the road and other places where people and vehicles are concentrated, and the distance to the ground is limited, which is prone to accidents such as accidental collision of large construction machinery, tree covering and lightning strikes, leading to conductor damage, broken strand and other faults. According to the wire diameter damage caused by external force damage of 10 kV overhead bare conductor, combined with the existing new tools, new materials and new technology, a method of cutting and reconnecting the overhead bare conductor without power failure is proposed to ensure that the mechanical strength and electrical performance of the repaired conductor meet the requirements of the operation standard, and the power consumption of the line users will not be affected during the repair process.

Keywords: overhead bare conductor; wire damage; cut and reconnect; operation without power failure

1 导线受损修补要求

供电公司运维人员在日常巡视 10 kV 架空线路时经常会发现导线受损现象, 如车辆、机械设备触碰、树木枝条长期压迫导线等情况破坏了导线机械性能, 严重时可能造成导线断股断线、坠地引发单相接地乃至人身伤亡事故。因此, 供电部门发现架空线路受损的情况, 应第一时间组织人员力量抢修架空导线。当前主流修补方法是采用绝缘斗臂车带电作业方式进行, 一般采用缠绕法修补或加装附线(存在安全隐患)弥补导线机械性能损失, 根据配电网架空导线运行规定, 视导线损伤情况采取不同措施^[1]:

钢芯铝绞线导线, 在同一截面处铝股损伤面积

收稿日期: 2023-03-14

不超过铝面积的 7%, 应采用缠绕法修补; 损伤面积在 7% 以上、25% 以下, 利用补修金具修补; 损伤面积超 25%, 剪断重接。

单金属导线(铝绞线、钢绞线), 在同一截面处铝股损伤面积不超过铝面积的 5%, 应采用缠绕法修补; 损伤面积在 5% 以上、17% 以下, 利用补修金具修补; 损伤面积超 17%, 剪断重接。

导线连续损伤虽在允许修补范围内, 但若其损伤长度已超出一个修补金具所能补修的长度, 必须剪断重接。

根据上述条件, 导线受损面积较大、受损超过一定长度时, 就必须剪断重接。目前通常是在线路停电工况下, 剪断处理损伤部位、使用导线接续管压接连接导线, 或直接更换整个耐张段导线, 消除导线缺陷工作^[2]。以上 2 种作业方式, 耗时费力,

且都须要对线路停电，根据线路网架情况造成一定范围的用户停电。现提出一种不停电、安全高效的剪断重接导线技术方法，解决修复架空导线须停电的难题。

2 剪断重接架空裸导线方法

以剪断重接导线方式修复架空裸导线主要用到张力牵引转换工具和自动快速接头 2 种特殊工具，架空导线不停电、用户无感知的导线剪断重接步骤如下。

采用绝缘斗臂车绝缘手套作业法，在导线损伤处前后合适位置各装设 1 只卡线器，使用张力牵引转换工具连接 2 只卡线器，并通过操作自身棘轮机械装置逐渐收紧两侧导线。在 2 只卡线器外侧加装后备保护卡线器和绝缘绳，如图 1 所示。



图 1 张力牵引转换工具

在 2 只卡线器外侧分别安装 2 根绝缘引流线，绝缘引流线一端固定在导线上，另一侧安装固定在张力牵引转换工具刀闸旁路连接点上。

通过操作杆合上刀闸，使用钳形电流表分别测量绝缘引流线和导线电流，确认引流线分流正常（占导线电流 1/4 及以上）。

使用带绝缘手柄的断线钳开断导线，开断点选在导线损伤部位中间，剪除导线损伤部位，清理毛刺，平整导线。使用自动快速接头连接导线 2 个断头，安装固定后外拔冲击确认，如图 2 所示。

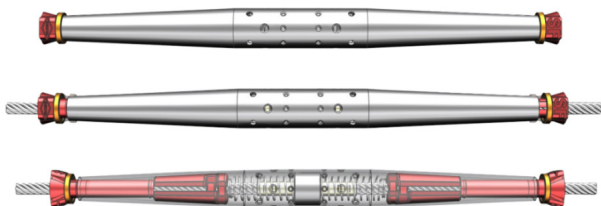


图 2 自动快速接头

使用钳形电流表分别测量导线和绝缘引流线电流，确认分流正常（占导线电流 1/4 及以上）。

使用操作杆拉开刀闸，拆除 2 根绝缘引流线，拆除后备保护卡线器和绝缘绳，操作棘轮机械装置逐渐松开两侧导线，并最终拆除张力牵引转换工具和卡线器。

以上即为剪断重接架空裸导线方法，但须注意以下事项。

一般导线损伤区域多发在道路中间或路边，作业前应做好交通疏导，防止过往车辆干扰影响作业安全；针对树木茂盛作业点，为防止施工过程中导线晃动触碰树木导致单相接地事故，应提前清理作业导线段可能触及的树木枝条。

张力牵引转换工具主体绝缘结构采用环氧玻璃，可承受 150 kV 耐压，紧线装置最大使用张力 17.64 kN，作业范围可达 1.5~1.8 m。在使用时应选择合适配套绝缘引流线，额定通流最大可达 600 A。

自动快速接头选型与待修复导线线径匹配，机械强度可达导线断裂强度的 95% 以上，接头电阻不大于等效长度导线，使用时应将导线平整插入直到无法继续。

安装 2 根绝缘引流线时，应先装刀闸侧，再装导线侧；拆除 2 根绝缘引流线时，应先拆导线侧，后拆刀闸侧。

3 结束语

带电作业是当下配电架空线路不停电检修最重要的作业手段，通过绝缘斗臂车绝缘手套作业法的作业方式，使用新型工具张力牵引转换工具和新材料自动快速接头，在用户无感知不停电情况下完成受损严重导线的剪断重接修复工作。同时保证修复后导线机械性能和载流通流能力不受影响，避免更换导线和停电施工，大幅度减少工作量，节约经济成本和社会资源，为多元融合高弹性电网提供支撑保障。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 10 kV 配网不停电作业规范: Q/GDW 10520—2016[S]. 北京, 2017—03.
- [2] 国网浙江省电力有限公司设备管理部. 配电网不停电作业方法和案例分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.

作者简介

朱小莹 (1991—), 女, 本科, 助理工程师, 从事配网不停电作业。
(责任编辑: 刘艳玲)

基于标准化的高压开关柜电气二次设计

毛志恒^{1*}, 黄成东², 胡顺健¹, 李健德², 龙书生²

(1. 杭州数港科技有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 杭州西石科技有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要: 电气二次设计的主要目标是为高压开关柜提供稳定可靠的电力供应, 并提供必要的保护和控制功能, 确保电力系统运行的稳定性和安全性。包括电流、电压、保护、测量和控制设备的选型以及线路的布置和连接方式。设计中需要考虑到现场环境、工作条件和维护要求等因素, 并遵循相关的电气安全规范与标准。通过合理的设计和配置, 可以确保高压开关柜的可靠性、安全性以及高效性, 以满足电力系统的各项需求。

关键词: 标准化; 高压开关柜; 电气二次; 设计

中图分类号: TM642

Electrical Secondary Design of High Voltage Switchgear Based on Standardization

MAO Zhiheng^{1*}, HUANG Chengdong², HU Shunjian¹, LI Jiande², LONG Shusheng²

(1. Hangzhou Shugang Technology Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou, 310000, China; 2. Hangzhou Xishi Technology Co., Ltd., Zhejiang Hangzhou, 310000, China)

Abstract: The main goal of electrical secondary design is to provide stable and reliable power supply for high-voltage switchgear, and provide necessary protection and control functions to ensure the stability and safety of the power system operation. Including the selection of current, voltage, protection, measurement and control equipment, as well as the layout and connection method of the circuit. In the design, factors such as on-site environment, working conditions, and maintenance requirements need to be considered, and relevant electrical safety regulations and standards should be followed. Through reasonable design and configuration, the reliability, safety, and efficiency of high-voltage switchgear can be ensured, thereby meeting the various needs of the power system.

Keywords: standardization; high voltage switchgear; electrical secondary; design

高压开关柜电气二次设计是对高压开关柜内部电气系统进行详细的设计和配置, 旨在满足电力系统的各项需求。通过合理设计与配置电气元件和保护装置来确保高压开关柜内部的电气系统能够平稳运行^[1]。该设计包括选用适合的开关设备、安装正确的电气元件、设计合理的电路连接与布线, 以及配置必要的保护和控制装置。通过精确的设计与配置, 高压开关柜电气二次设计可以提高电力系统的运行效率, 进而降低故障风险, 并确保电力系统的安全稳定运行。

1 电气二次设计工作内容

1.1 设计电气接线图

确定开关柜的结构和尺寸, 根据具体的使用需

收稿日期: 2023-07-25

求, 确定开关柜的外形、内部隔板和隔离室的布置, 以及各个元件(如开关、保护装置、测量仪表等)的安装位置; 绘制开关柜布置图, 根据开关柜的结构和尺寸, 使用 CAD 等绘图软件绘制开关柜的布置图, 包括开关柜的外观图、内部隔板布置图、元件安装位置图等; 确定接线方式, 根据开关柜内部元件之间的连接关系和接线要求, 确定各个元件的接线方式, 包括直接连接、间接连接、并联连接等, 并标注在接线图上; 绘制接线图, 将各个元件的连接关系绘制到接线图上, 包括开关与负载的连接、保护装置与电源的连接、测量仪表与开关的连接等^[2]。在接线图上使用符号表示不同类型的元件和连接方式(如图 1 所示); 标注电气参数, 对于每个元件, 标注其电气参数, 如额定电压、额定电流、额定频率等, 在接线图上合适的位置进行标注; 完

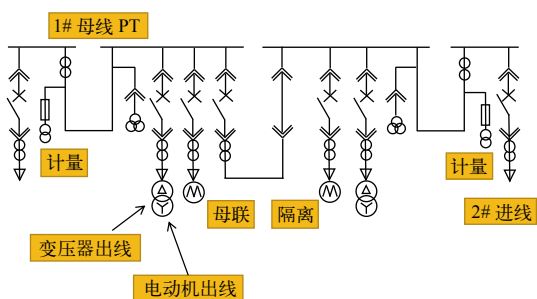


图1 开关柜高压二次原理图

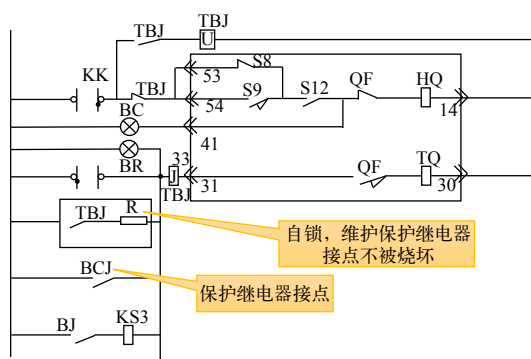


图2 外部防跳

善接线图，检查接线图的准确性和完整性，确保没有遗漏或错误的连接，并对接线图进行必要的修改和调整。

1.2 选择电气元件

设计需求，根据设计需求确定电气元件的功能和特性，例如：开关的类型（断路器、隔离开关等）、保护装置的类型（过电流保护、欠压保护等）、仪表的类型（电流表、电压表等）；设备参数，根据设备的额定电流、额定电压、额定频率等参数选择符合要求的电气元件^[3]。确保所选元件的额定值能够满足设备的工作条件；电气性能，了解电气元件的性能指标，例如：是否具备过载保护、短路保护、温度保护等功能，以及元件的稳定性、可靠性等；安全性要求，选择符合安全性要求的电气元件，包括防护等级、耐热性能、防爆等级等；品牌和质量，选择有良好信誉和高品质的电气元件品牌，确保元件的质量和可靠性。

2 设计电气保护系统

过电流保护，是为了防止设备在电流超过额定值时受到损坏或发生危险情况。常见的过电流保护装置有熔断器和电流保护器。熔断器可以根据设备的额定电流选择合适的规格，电流保护器可以根据设备的电流进行相关设置（如图2所示）；短路保护，是为了防止设备在短路故障发生时受到严重的损坏。常见的短路保护装置有断路器和熔断器。断路器可以根据设备的额定电流和短路电流进行选择；接地保护，是为了防止设备因接地故障导致人身伤害或设备损坏。常见的接地保护措施包括接地故障保护器、接地电阻器等；根据设备的特点选择其他保护措施，根据设备的具体特点，如电压波动、频率变化等，选择相应的保护措施。

3 分闸控制开关与远程控制

合分闸控制开关，主要用于控制高压开关柜的合闸和分闸操作，以确保其正常运行。合分闸控制开关通常包括合闸按钮、分闸按钮、合分闸指示灯等元件。设计时须要根据实际情况选择合适的控制开关，并确保其安全可靠、操作方便；远程控制，是指通过无线通信、网络通信等技术手段对高压开关柜进行操作与控制^[4]。远程控制可以提高操作的便利性和安全性，特别是对于一些难以接近或危险环境下的高压设备。远程控制的实现须要考虑通信方式、通信协议、数据传输安全等因素。在高压开关柜电气二次设计中，须要对合分闸控制开关和远程控制进行综合考虑，确保其互相配合、稳定可靠。同时，还须考虑防护措施、急停按钮、过载保护、故障指示等功能的设计，以确保高压开关柜的正常运行和安全性，如图3所示。

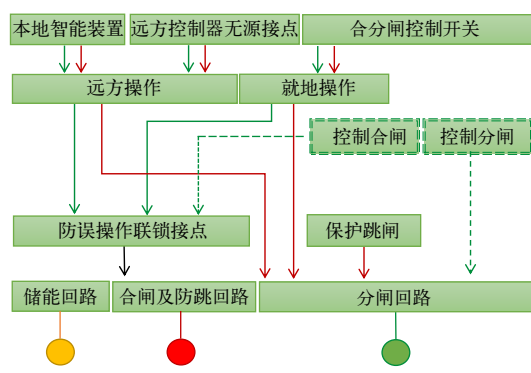


图3 合分闸控制流程

4 电气计算

确定设备负荷需求，根据设备的额定功率、
(下转第97页)

高原风电场架空线路冰雪灾害治理研究

文 兴

(大唐云南发电有限公司滇中新能源事业部, 云南 昆明 650100)

摘要: 高原风电场架空输电线路冬季覆冰造成的损失较大, 常会发生过荷载、冰闪、舞动、脱冰跳跃等现象, 导致线路跳闸、断线、倒塔和通信中断等事故。通过近3年的技术研究和不断改进试验, 研发了针对高原风电场特有的线路脱冰防跳跃措施和直流融冰方案, 该方案能有效治理高原风电场架空线路因冰雪灾害造成的影响。

关键词: 架空线路; 冰雪灾害; 治理

中图分类号: TM726.3

Research on Ice and Snow Disaster Management of Overhead Lines in Gaoyuan Wind Farm

WEN Xing

(Yunnan Sino-Singapore Energy Division, Datang Yunnan Power Generation Co., Ltd., Yunnan Kunming 650100, China)

Abstract: The overhead transmission lines of Gaoyuan Wind Farm suffer significant losses due to icing in winter. Overloading, ice flashing, dancing, and jumping off ice often occur, leading to accidents such as line tripping, disconnection, tower collapse, and communication interruption. Through nearly 3 years of technical research and experimental improvement, we have developed line deicing and anti jumping measures and DC ice melting solutions specific to the Gaoyuan Wind Farm. This plan can effectively address the impact of ice and snow disasters on the overhead lines of Gaoyuan Wind Farm.

Keywords: overhead lines; ice and snow disasters; govern

随着云南地区高海拔风电场建设增多, 风电场架空输电线路冬季覆冰造成的危害越来越严重。常会引起过荷载、冰闪、舞动、脱冰跳跃等现象, 导致线路跳闸、断线、倒塔和通信中断等事故。线路覆冰已成为威胁电网安全运行的重要原因。

通过近3年对云南高原风电场架空输电线路预防冰雪灾害治理的研究, 我们已经掌握冰雪灾害形成的原因及相关预防措施。主要分为2部分:

(1) 云南高原风电场冬季架空线路结冰是雪凇型, 雪凇型架空线路冰雪灾害最大特点是杆塔档间导线由于冰密度小处于松散状, 在风力作用下造成导线瞬间整档脱冰跳跃, 导线大弧度回弹, 容易发生短路接地事故。靠近高位绝缘子导线反复回弹时此处受力最大极易发生瞬间断线甚至倒塔事故。线路直流融冰过程中也会发生整档脱冰跳跃现象。我们研发的脱冰防跳跃装置极大限制整档脱冰时导线的跳跃幅度, 降低对线路的危害; (2) 极端天气情况下高海拔、湿度较大地区架空线路形成密度超过

收稿日期: 2023-06-06

0.5 g/m³ 的混合凇。导线结冰直径达到 40 cm, 很容易造成线路断线和倒塔。以上研发了专门针对风电场特有的直流融冰技术。我们研发的这两项技术将有效降低高原风电场架空输电线路冰雪灾害。目前该研究通过多次试验已经取得成功, 并已经在高本山风电场试点实施。

1 云南高原架空线路冰雪灾害特点及危害

覆冰作为威胁电网安全运行的重要因素, 目前线路冰雪灾害最严重的地区是北方和西藏, 因为这些区域冬季天气寒冷干燥, 具体表现为雨凇, 冰密度大, 逐步融化不会整体脱冰跳跃。并且由于空气干燥, 导线结冰不是很厚。云南高原型架空线路纬度低海拔高, 冬季湿度大, 很容易在冬季降温造成输电线路雪凇型冰雪灾害, 当线路结冰成雪凇时, 在风力作用下导线和地线整体脱冰跳跃就会发生断线、短路、接地、倒塔等故障。

云南骑龙山风电场从 2014 年投产以来一共发生了 27 次线路因冰雪灾害跳闸事故, 特别是 2019 年

因冰雪灾害线路短路跳闸造成 220 kV 主变烧毁，两期风电场停产 3 个月；2020 年线路因冰雪灾害影响直接断线 8 处，该风电场在 2022 年 1 月 12 日—2 月 8 日又发生了连续 27 天的持续低温暴雪天气，线路发生倒塔断线等事故，自投产以来因冰雪灾害影响该风电场经济损失达 1 亿元；

云南高本山风电场自 2016 年投产以来因冰雪灾害影响发生线路跳闸 8 次，特别是 2018 年 2 月 5 日冰雪灾害事故造成 27 基塔倒塔，42 基塔导线断裂，该次事故造成直接经济损失 3 000 万元；

云南丘北风电场从 2014 年投产以来发生过 23 次线路因冰雪灾害跳闸事故，2021 年 1 月 11 日因冰雪灾害发生 3 处倒塔和 5 处断线；

电网架空线路结冰目前采取的措施是停电直流融冰或人工除冰。但高原风电场架空集电线路不是电网线路的点对点分布方式，而是根据风机机位布置呈树状。冬季下雪结冰特殊天气时道路积雪厚度达 50 cm 以上，传统直流融冰车辆根本无法进入和输送设备。并且直流融冰过程中也会发生导线整档脱冰跳跃，导线的瞬间弹跳力会拉断导线和杆塔。

雪淞型输电线路冰雪灾害的治理研究目前在全国是一项空白。防范与治理工作迫在眉睫，笔者从 2019 年开始就收集雪淞冰雪灾害的相关资料和研究工作，主要目的是将容易发生雪淞型架空输电线路通过技术改造达到能防止或抑制脱冰跳跃现象发生，确保架空线路长期稳定运行。

2 线路整档脱冰跳跃预防措施

笔者及团队成员通过对云南雪淞型架空输电线路覆冰后观察发现，当覆冰导线在风力作用下会发

生整档脱冰跳跃情况。整档脱冰时，受力导线由于瞬间失去冰的附着就跟弓箭弦的原理一样，如图 1 所示。导线瞬间上弹，强大的弹力传递到杆塔两端的绝缘子上，导线来回反弹次数多达 10 多次。现场断线发现，导线断点都是在杆塔最高点绝缘子处。因为此点受力最大，容易发生断线，同时强大的瞬间拉力会造成杆塔上半部分折断。但云南高本山风电场由于特殊高海拔地理位置，当冬季连续几天大雾导线结冰后由于水滴的附着，导线覆冰密度和直径越来越大，采集到的最大覆冰直径 40 cm，密度 0.55 g/m^3 。长时间在大雾环境中导线和杆塔发生因导线覆冰过重出现断线倒塔事故。

云南地区雪淞型覆冰架空输电线路存在风力作用下整档脱冰跳跃情况，可通过以下 5 项措施解决导线整档脱冰跳跃问题。

2.1 在导线上缠绕预绞丝

为预防导线冰整档同时掉落，在导线上每隔 5~10 m 缠绕一根预绞丝，预绞丝能改变冰在导线上的附着形态，起到分断导线附着冰的作用。当导线脱冰时由于预绞丝的隔段，冰分段脱落，避免了整档导线同时脱冰。但现场观察此方法只是在微风情况下有用。当导线遇到风速超过 4 m/s 还是存在整档脱冰跳跃情况。

2.2 导线间加装相间间隔棒

导线整档脱冰跳跃时一般首先发生在单芯导线，为抑制导线弹跳幅度和避免导线间发生相间短路故障，在导线间加装了相间间隔棒，该方法对导线弹跳起到了抑制作用。但在恩骑线上试验时，只加装导线间隔棒的情况下，发生了一相导线整档脱冰跳跃带动另一根导线发生脱冰跳跃，地线和导线面向跳跃时，地线挂在导线间隔棒球头上发生短路接地



图 1 风电场导线整档脱冰反复弹跳图片

故障，所以在冰雪灾害治理时该措施不能单独使用，如图 2 所示。



图 2 相间间隔棒和防跳跃装置

2.3 中间和终端塔用反向拉线防止倒塔事故发生

导线整档脱冰跳跃时终端塔和中间塔单方向受到强大的拉力。通过反方向增加拉线的方法抵消拉力，避免杆塔瞬间单向拉力损坏情况。

2.4 利用绝缘子预防冰闪情况发生

线路结冰时如果发生重合闸故障多数情况是因为冰闪。我们通过将绝缘子每隔 2 片更换 1 片大盘径绝缘子，重新定制加宽三角连板增加双串绝缘子之间距离等措施避免结冰发生桥联故障。恩骑线每年结冰都会发生线路重合闸故障，改成大小扇绝缘子组合后重合闸故障率明显降低。

2.5 运用线路防跳跃装置减缓导线弹跳幅度

通过反复的试验和总结，我们研发的线路防跳跃装置是目前所有方法中最简单有效的方法。该方法是在档距超过 200 m，山顶或迎风面的导线中间加装一个悬垂线夹，再拉一个同电压等级的复合绝缘子，通过一根环状的尼龙绳，拉到地面的时候再通过一个低电压等级的复合绝缘子收紧后经水泥拉盘拉在地面上（水泥拉盘直接放在地面，不用埋在土里，弹跳时有缓冲作用）。该方法在一条 35 kV 导线的地线上试验了 2 年，加装后该地线的整档脱

冰弹跳幅度明显减缓，有效预防与上端导线交叉发生的短路故障。例如恩骑线山顶 8-9 号塔的档距达 320 m，在迎风面最大的 24-28 号塔这几个危险段进行了加装试验，2022 年 2 月，骑龙山最大冰雪灾害面前，这几处最容易发生断线的危险段，除一根本身发生断股的地线断线外，试验段的导线没发生倒塔断线故障。12 月 19 日，拍摄到的一次现场脱冰视频对比发现没加装缓冲装置前导线一整档脱冰时弹跳弧度高达 12 m，跳弹次数达 10 次。并且由于弹跳通过杆塔的摆动将相邻导线也发生整档脱冰弹跳，杆塔摆动在多根导线同时脱冰情况下摆动加剧。但加装了该装置后整档脱冰导线弹跳幅度只有 2 m 左右，弹跳次数最多 2~3 次往复就停止，不会发生相邻导线脱冰弹跳现象。该方法存在一个问题就是为方便更换尼龙绳，制作成环状的尼龙绳很容易丢失，为防止此类事件的发生，进一步安全措施是将尼龙绳靠下面部分更换成 4 m 的单芯钢线。

试验的方法主要有以上几点，在实际运用过程中最简单有效经济的方法才能被现场推广运用。在高本山改造项目中只采用了大小扇绝缘子、杆塔增加反向拉线和加装防跳跃装置这 3 种方法。

3 适合高原风电场的架空线路直流融冰方案

高原架空线路发生极端天气下的结冰，结冰直径甚至达 40 cm 以上。一般线路重覆冰设计根据规范要求都是 20 mm，长时间导线负重甚至在微风情况下晃动很容易发生断线和倒塔事故，最有效的措施和方法就是直流融冰。我们曾经联系过许多直流融冰的厂家，给出的方案都是送出线路需要到对侧变电站建设一套线路融冰装置，对风电场树状集电线路需要一个大型拖板车将直流融冰整套设备拉到各个融冰点分别进行直流融冰。该方案存在的问题：（1）风电场不可能到变电站去加装融冰设备；（2）冰雪灾害时山上车辆除大型铲车或大排量越野车外其余车辆通行非常困难，用拖板车拉设备在深厚的雪地里行走无法实现。风电场受冰雪灾害影响的架空线路一般长度在山上 6~8 km 距离，通过不断总结优化，研发了适合风电场自身的便携简易直流融冰装置及配套的风电场特有的直流融冰方案。

3.1 研发了适合风电场的便携式直流融冰装置

通过对风电场架空线路直流融冰分析计算，LGJ240-300 的导线只要通过的直流电流在 700~

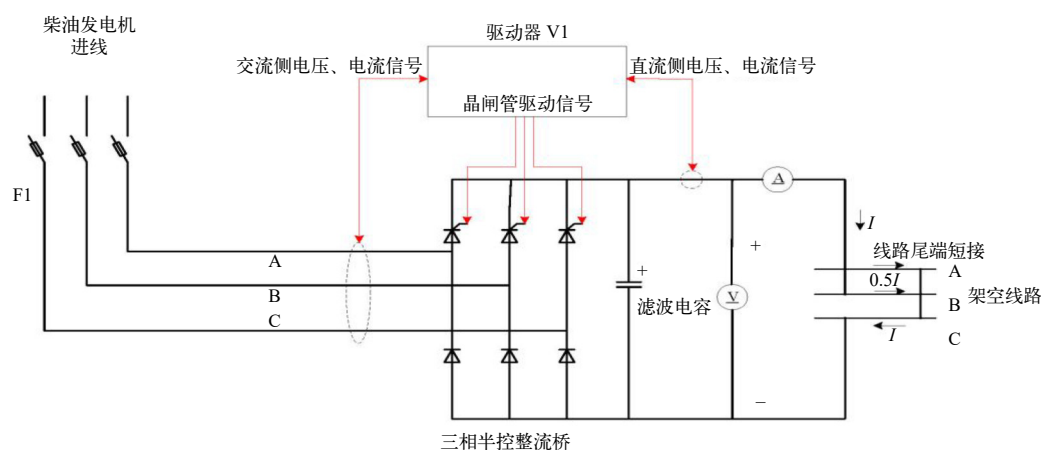


图3 研发的直流融冰装置原理图

1 000 A 环境温度 $-5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 情况下 20~30 min 可以完成一相导线的直流融冰工作^[1]。我们研发的直流融冰装置根据简单、经济、实用的原则。利用三相可控硅整流原理。经一台特制的三相融冰变压器将柴油发电机（容量一般为 1 000~1 500 kW）输出电压变成 800 V、1 000 V、1 250 V、1 500 V、10 kV（接 SVG 变低压侧）几个挡位的交流电压供整流装置。整流装置的可控硅选用定制的反向耐压为 6.3 kV，额定电流为 2 000~3 000 A。整流回路中最主要的是脉冲变压器必须跟厂家定制选用耐压 3 000 V。柴油发电机在高原功率会降低，实际输出功率只有额定功率的 80%。试验一条海拔高度 3 000 m、长度为 6 km、型号为 LGJ240 的导线，整流后直流电流 800 A、电压 1 000 V。一台 1 250 kV·A 的柴油发电机在额定容量 90% 能长期稳定运行，当输出容量超过额定容量时，柴油发电机的运行声响异常。所以通过计算采用柴油发电机额定容量的 80% 作为运行工况选择比较合理。详细整流回路原理如图 3 所示。

3.2 树状集电线路融冰方案

高原风电场 35 kV 架空集电线路目前采用的是树状结构。采用的融冰方案是将主回路带风机箱变的杆塔两端进行分断后，把两边导线引到塔下电压安全距离位置。利用螺丝对导线进行连接，将主线路在连接点处三相短接。针对送出线路，在山下不结冰段将线路转为冷备用状态后，验电挂地线人为塔上短接，通过升压站的直流融冰装置就可以完成对主干集电线路、送出线路的融冰工作。主线融冰完成后恢复主干线路。通过融冰变压器逐级升压给 35 kV 系统倒送电，让分支点风机箱变高压侧带

35 kV 三相交流电，高本山风机箱变低压侧是交流 690 V，利用笔者所在单位研发的直流融冰装置（该装置是便携式，2 个人就能轻易从风机塔筒内掏出）整流后接在断开点靠分支侧。就可以对剩下的分支逐条进行直流融冰^[2]。对分支进行融冰时最好将每台风机高压侧三相保险或负荷开关断开，避免箱变高压侧绕组三角形接线通过直流电流。因风机箱变高压侧直流电阻比短接后的线路电阻大很多，一般短接后的融冰线路通过大部分融冰电流。在大雪等特殊情况下，箱变高压侧可以不断开部分高压侧保险，通过计算和实际测量，正常直流融冰时箱变高压侧通过的直流电流在额定电流内，不会造成箱变高压侧绕组过流。

4 结束语

云南地区特有的低纬度高海拔风电场在冬季存在温度低湿度大等特殊天气，对架空线路冰雪灾害治理主要考虑直流融冰和线路防跳跃相结合这两项措施。本研究成果如果在系统内得到推广，将有效减缓高原风电场架空输电线路冰雪灾害问题。

参考文献

- [1] 梁德欣, 孙闻浩, 赵蔚, 王海涛. 融冰电流计算及融冰装置原理探究[J]. 电力安全技术, 2022, 24(11): 65.
- [2] 李剑, 文鑫, 刘延来. 输电线路冰雪事故及原因分析[J]. 黑龙江科技信息, 2017(9): 66.

作者简介

文兴（1977—），男，高级工程师，高级技师，主要研究方向：自动化。

（责任编辑：刘艳玲）

高压及超高压电缆户外充油终端受力分析及计算

贾超*, 潘海平, 方菊, 易亚琳

(长园电力技术有限公司, 广东 珠海 519085)

摘要: 电缆户外终端是高压及超高压输电电缆与架空线连接必不可少的附件, 其安装环境复杂, 承受多种外力载荷作用, 在户外终端设计过程中必须充分考虑多种载荷极端情况下其机械强度是否满足要求。通过对户外终端承受的出线导线拉力、风载荷、地震力、短路时电动力分析, 运用仿真软件对户外终端在多种外力载荷共同作用下的变形及应力进行计算, 并对终端套管与底座法兰、底座法兰与支撑绝缘子连接螺栓进行机械强度校核。

关键词: 充油终端; 外力; 机械强度; 应力

中图分类号: TM757

Force Analysis and Calculation of Oil-filled Outdoor Termination of High Voltage and Ultra High Voltage Cable

JIA Chao*, PAN Haiping, FANG Ju, YI Yalin

(ChangYuan Electric Co., Ltd., Guangdong Zhuhai 519085, China)

Abstract: Outdoor termination is an indispensable accessory for the connection between high voltage and ultra-high voltage transmission cable and overhead line. Its installation environment is complex and the termination withstand a variety of external loads. In the design process of outdoor termination, it is necessary to fully consider whether its mechanical strength meets the requirements under various extreme loads. Through the analysis of the outgoing wire tension, wind load, earthquake force and short-circuit electrodynamic force under outdoor termination, calculate the deformation and stress of outdoor termination under the combined action of various external loads with simulation software, check the mechanical strength of bolt connecting termination bushing and base flange, base flange and support insulator.

Keywords: oil filling terminal; external force; mechanical strength; stress

电缆户外充油终端是输电系统中架空线与电缆连接的重要组成部分, 其安装于电缆末端, 保证电缆与其他部件的电气连接^[1]。户外充油终端在运行过程中须承受多种外力作用, 特别是高压及超高压户外充油终端中电缆回缩、电缆本体拉力等也对终端本身提出较高的要求。电缆终端一般在设计时应保障有足够的抗弯、防震等性能^[2]。本文通过对户外终端承受的外力分析, 运用仿真软件对户外充油终端在多种外力载荷作用下的变形及应力计算, 并对终端套管与底座法兰、底座法兰与支撑绝缘子连接螺栓进行机械强度校核。

1 户外充油终端结构形式

目前, 国内外高压及超高压电缆户外充油终端

收稿日期: 2023-08-18

主要采用工厂预制橡胶应力锥结构, 主要有无环氧套管利用应力锥自身抱紧力压紧和应力锥外部套环氧管靠弹簧压紧 2 种结构 (如图 1 所示)。以上 2 种结构的终端一般由应力锥、绝缘填充剂、外绝缘 (瓷套和复合套)、连接金具、密封结构和支撑绝缘子组成。电缆通过固定在套管上法兰的连接金具

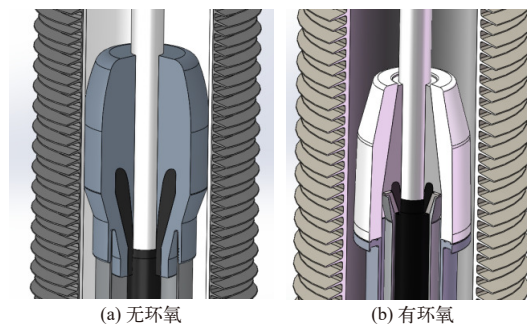


图 1 户外充油终端结构

悬挂在终端上，套管与底座法兰通过螺栓连接后固定在支撑绝缘子上，整个终端通过支撑绝缘子安装在终端支架上。

2 户外充油终端承受外力分析

户外终端在运行过程中除受自重外，主要承受出线导线拉力、风载荷、地震力、冰载荷、短路电动力、电缆重量等外力作用。

2.1 出线导线拉力

作用在出线导线上的荷载除自重外，导线还承受风载荷和冰重。为便于计算，将以上荷载考虑为均匀荷载沿导线分布。在计算导线张力弧垂时，常用单位长度荷载来表示导线受到的机械荷载。单位荷载主要有：导线自重荷载（ p_1 ）、冰重荷载（ p_2 ）、导线自重和冰重总荷载（ p_3 ）、无冰时导线风压荷载（ p_4 ）、覆冰时导线风压荷载（ p_5 ）、无冰有风时的综合荷载（ p_6 ）、有冰有风时的综合荷载（ p_7 ）。其中最大荷载为有冰有风时的综合荷载，其值为：

$$p_7 = \sqrt{p_3^2 + p_5^2} = \sqrt{(p_1 + p_2)^2 + p_5^2} = \sqrt{(m_0g + 0.9\pi gh_b(h_b + d))^2 + \left(\frac{\mu_{sc}a(2h_b + d)V^2}{1600}\right)^2} \quad (1)$$

式中： m_0 为每单位导线的质量，kg/m； g 为重力加速度， m/s^2 ； h_b 为覆冰厚度，mm； d 为导线直径，mm； μ_{sc} 为风载体型系数，取1.2； V 为设计风速，m/s。

导线上任意一点的张力（不考虑弹性伸长、温度伸长等），由图2可见为：

$$T = T_0 \sec \alpha = T_0 \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} = T_0 \operatorname{ch}^2(kx) \quad (2)$$

或

$$T = T_0 + \frac{P}{k} (\operatorname{ch}^2(kx) - 1) = T_0 + py \quad (3)$$

式中： T_0 为导线水平张力，N； a 为风速不均匀系数，也称档距系数； k 为导线计算因素， $1/m$ ， $k = p/(2T_0)$ ； x 、 y 为导线各点的横坐标和纵坐标，m。

2.2 风载荷

当空气以一定速度吹向终端，速度减小甚至降为0时，空气减小的动能则转换成对终端的静压力。在空旷平坦的户外，风压值可采用公式(4)计算：

$$F_f = WS = \frac{1}{2} \rho V^2 S = \frac{SV_0^2}{1.6} \quad (4)$$

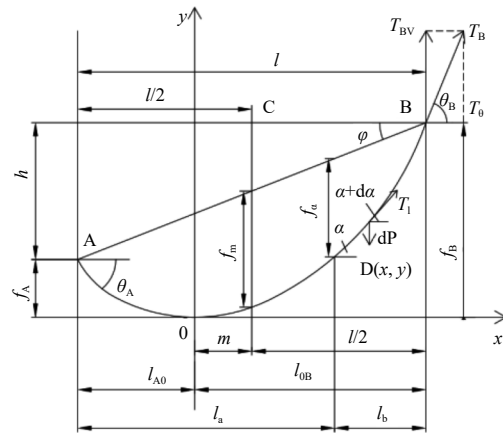


图2 架空线近似为斜抛物线的受力图

式中： F 为外荷载； V_0 为设计基准高度下的基准风速（m/s）； S 为终端垂直于风方向投影面积（ m^2 ）； ρ 为空气密度， kg/m^3 ，工程上为了简化，取标准空气密度 $1.25 kg/m^3$ ，对我国大部分地区适用，除西南高海拔地区误差较大外。

2.3 地震力

户外充油终端设计允许地震烈度为Ⅷ度，根据GB/T 17742《中国地震烈度表》查得其仪器测定的地震烈度： $7.5 \leq I_1 < 8.5$ ，合成地震动的最大加速度 a 为 $2.79 (1.95 \sim 4.01) m/s^2$ ， $(1.95 \sim 4.01) m/s^2$ 为加速度变动范围， $2.79 m/s^2$ 为最大加速度参考值；最大速度为 $0.258 (0.177 \sim 0.378) m/s$ ， $(0.177 \sim 0.378) m/s$ 为速度变动范围， $0.258 m/s$ 为最大速度参考值，计算时将此加速度施加到整个终端上。

2.4 冰载荷

假设户外充油终端套管每一片大伞裙及均压罩上均积满冰，则冰载荷：

$$F_b = \rho_b S_b h_b g \quad (5)$$

式中： S_b 为套管大伞裙面积为 S_b ， m^2 ； ρ_b 为冰密度， kg/m^3 。

2.5 短路电动力

户外充油终端 A、B、C 三相常按同一平面依次布置。终端分别通过在同一时刻电流值不等的 I_a 、 I_b 和 I_c 三相交流电流。发生短路故障时，每一相终端所承受的短路电动力是该终端通过电流与其他两相终端通过电流相互作用确定。可能出现的最大电动力为中间相（B相），其最大电动力比两边 A、C 相大（约 7%）。短路时电动力最大值与冲击电流相关，计算时采用最大冲击电流 i_{cj} ，由毕奥-萨伐尔

定律，B相终端可考虑为在A、C相终端内电缆所产生的磁场中，且磁场方向和B相终端的电缆垂直，B相终端所承受的最大电力为：

$$F_d = 1.73 \times 10^{-7} \frac{L}{l} i_{cj}^2 \quad (6)$$

式中： L 为导体在终端长度，m； l 为终端间距，m； i_{cj} 为短路电流，A。

3 终端受力分析

当导线拉力、风载荷、地震力、短路时电力作用方向相同时，户外充油终端受到的外力组合最大，此时终端受力处于最危险状态。本文以220 kV 2 500 mm²复合套户外充油终端为例进行仿真计算。

3.1 模型处理

为简化计算，对复合套管终端计算模型做如下处理：（1）去除尾管、密封圈、螺栓等对复合套管终端强度几乎无影响的零件；（2）各螺栓连接零件之间连接可靠，近似为刚性连接；（3）电缆通过导电杆作用在终端上的重量，通过力的形式加载到导电杆底部；（4）绝缘油和应力锥主体的重量通过力的形式加载到密封套上。

将前述载荷及电缆重量、绝缘油重量、终端自重（以重力加速度形式）施加于终端模型，支撑绝缘子与安装板采用固定约束进行静力仿真计算。

3.2 终端整体变形

复合套户外充油终端整体变形如图3所示，顶部出线线夹变形最大，其最大变形量为3.59 mm。

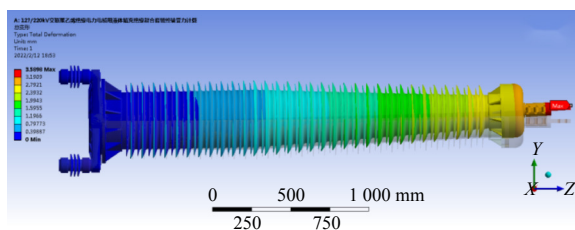


图3 复合套管终端总变形

3.3 终端应力分布

复合套管终端整体应力分布如图4所示，在底座法兰与支撑绝缘子接触位置应力最大，最大应力在支撑绝缘子上，其最大值为74.81 MPa。

复合套管终端各零部件大于等于8 MPa的应力分布如图5所示。

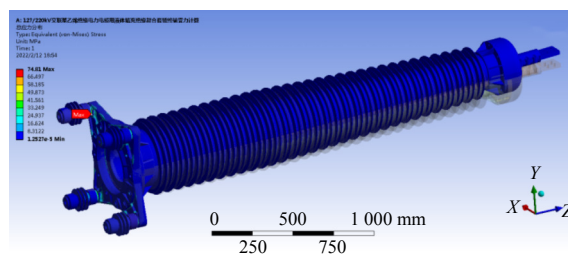


图4 复合套管终端应力分布

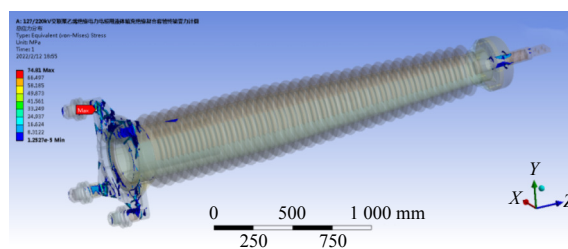


图5 复合套管终端大于等于8 MPa应力分布

支撑绝缘子应力分布如图6所示，最大应力在支撑绝缘子上法兰（其材料为ZL101A）处，最大应力为74.81 MPa < $R_m = 195$ MPa，故支撑绝缘子机械强度满足设计使用要求。

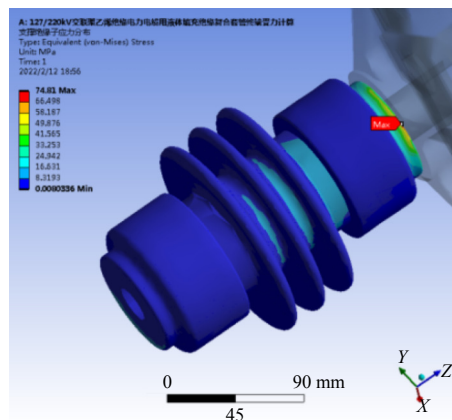


图6 支撑绝缘子应力分布

3.4 螺栓强度校核

3.4.1 套管与底座法兰螺栓强度校核

复合套管与底座法兰采用12套4.8级（ $[\sigma] = 320$ MPa）的M16螺栓沿圆周方向均布连接，当外载荷 F 沿两对称螺栓的连线方向作用到复合套终端时，此时复合套管与底座法兰连接螺栓中承受最大外载荷螺栓如图7（左）所示。

复合套管与底座法兰连接螺栓承受的力矩：

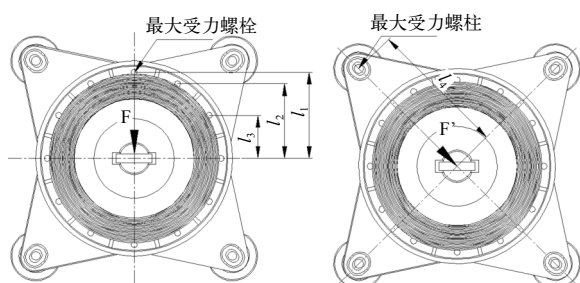


图7 最大受力螺栓(柱)示意图

$$M_1 = T_0(H - h_z) + (F_f + F_d + F_{dz})H_1 \quad (7)$$

式中: H_1 为复合套管终端重心距套管下表面高度, m; H 为终端整体高度, m; h_z 为支撑绝缘子高度, m; d 为螺栓底径, m。

复合套管与底座法兰连接螺栓最大工作拉力:

$$F_{if} = \frac{M_1 l_i}{\sum n l_i^2} \quad (8)$$

式中: l_i 为第 i 组螺栓, 其距产品质心距离为 l_i 。

复合套管与底座法兰螺栓预紧力:

$$F_{p1} = \frac{K_{s1} F}{f_1 n N_1} \quad (9)$$

式中: F 为螺栓承受的剪切力, N; K_{s1} 为防滑系数取, 1.3; n 为距离套管质心距离 l_i 的螺栓数量; N_1 为套管与底座法兰连接摩擦面数量, 此处值为 1。

复合套管与底座法兰螺栓总拉力:

$$F_{Q1} = F_{p1} + \frac{C_b}{C_b + C_m} F_{if} \quad (10)$$

复合套管与底座法兰螺栓承受最大拉应力:

$$\sigma_{if} = \frac{4 \times 1.3 F_{Q1}}{\pi d^2} = 15.1 \text{ MPa} < [\sigma] \quad (11)$$

式中: F_f 为复合套管终端承受的风载荷, N; F_{dz} 为复合套管终端承受的地震力, N; f_1 为复合套管与底座法兰摩擦系数, 1.05。

综上, 复合套管与底座法兰连接螺栓强度满足使用要求。

3.4.2 支撑绝缘子与安装支架螺栓强度校核

支撑绝缘子与安装支架螺栓采用 4 套 4.8 级的 M30 螺柱沿圆周方向均布连接, 当外载荷 F' 沿两对称支撑绝缘子的连线方向作用到复合套终端时, 此时支撑绝缘子与安装支架连接螺柱中承受最大外载荷螺柱如图 7 (右) 所示。

支撑绝缘子与安装支架连接螺栓承受的力矩:

$$M_2 = T_0 H + (F_f + F_d + F_{dz}) H_1 (H_1 + h_z) \quad (12)$$

支撑绝缘子与安装支架连接螺栓最大工作拉力:

$$F_{za} = \frac{M_2}{n l_4} \quad (13)$$

支撑绝缘子与安装支架螺栓预紧力:

$$F_{p2} = \frac{K_{s2} F}{f_2 n N_2} \quad (14)$$

式中: N_2 为支撑绝缘子与安装支架连接摩擦面数量, 此处值为 1。

支撑绝缘子与安装支架连接螺栓总拉力:

$$F_{Q2} = F_{p2} + \frac{C_b}{C_b + C_m} F_{za} \quad (15)$$

支撑绝缘子与安装支架连接螺栓承受最大拉应力:

$$\sigma_{za} = \frac{4 \times 1.3 F_{Q2}}{\pi d^2} = 20.5 \text{ MPa} < [\sigma] \quad (16)$$

式中: f_2 为支撑绝缘子与安装支架摩擦系数, 0.17; K_{s2} 为防滑系数取, 1.3;

综上, 支撑绝缘子与安装支架连接螺栓强度满足使用要求。

4 结束语

采用以上方法计算出线导线拉力、风载荷、地震力、冰载荷、短路时电动力等外力, 将各力施加于终端上, 经过仿真计算及螺栓强度校核, 220 kV 复合套户外充油终端能承受外部最恶劣工况下的外力破坏, 满足设计使用要求。

根据计算结果, 终端各零部件除支撑绝缘子、底座法兰、上法兰应力较大, 其余零部件应力基本上都小于 8 MPa, 远小于对应材料的许用应力, 因此该户外充油终端机械结构有较大的优化空间。有必要对该户外终端进一步开展结构优化, 以节省产品材料成本。

参考文献

- [1] 赵健康, 阎孟昆, 欧阳本红, 等. 高压电缆及附件[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020: 2.
- [2] 赵健康, 赵鹏, 陈铮铮, 等. 高压直流电缆绝缘材料研究进展评述[J]. 高压技术, 2017, 43(11): 3490-3503.

作者简介

贾超 (1987—), 男, 本科, 工程师, 主要从事电力电缆附件研究制造的技术工作。

(责任编辑: 刘艳玲)

激光清除输电线路异物的技术分析

王海涛*, 赵蔚, 崔建勇, 段赛飞

(国网北京市电力公司检修分公司, 北京 丰台 100073)

摘要: 输电线路是电力系统中重要的组成部分之一, 但输电线路也经常受到各种外界因素的干扰, 比如防尘网、风筝线、塑料布等。这些异物可能会导致输电线路跳闸、停电、火灾等事故发生, 给社会造成重大损失。为了防止这些事故的发生, 科研人员开始探索利用激光技术清除输电线路异物的方法。主要介绍了激光清除输电线路异物的工作原理、技术特点、技术难点以及发展前景。

关键词: 激光技术; 输电线路; 异物清除

中图分类号: TM726

Technical Analysis of Laser Removal of Foreign Bodies in Transmission Lines

WANG Haitao*, ZHAO Wei, CUI Jianyong, DUAN Saifei

(State Grid Beijing Electric Power Company Maintenance Branch, Beijing Fengtai 100073, China)

Abstract: Transmission lines are one of the most important components in the power system. However, transmission lines are often subject to interference from various external factors, such as dust screen, kite line, plastic cloth, etc. These foreign substances may cause short circuits, open circuits, fires and other accidents, causing significant losses to society. In order to prevent these accidents from happening, researchers have begun to explore the use of laser technology to remove foreign objects from transmission lines. This paper mainly introduces the working principle, technical characteristics, technical difficulties and development prospects of laser removal of foreign objects on transmission lines.

Keywords: laser technology; transmission lines; foreign object removal

1 激光清除输电线路异物技术的意义

输电线路是电力传输的重要通道。当输电线路存在异物时, 不仅会对电力传输造成影响, 而且会对电力设施造成损害, 有时会因此引起严重火灾事故。根据某地区抽样统计显示, 输电线路故障中 22%~50% 是由异物引起的, 如表 1 所示。

可见异物对输电线路安全稳定运行产生了不容

忽视的影响; 因此, 输电线路异物的清除具有重要意义。

激光作为一种高能量、高密度、高频率的光束, 具有诸多优越性能, 如直线传播、高能量密度、出色的定向性、不受输电线路径影响等特点, 因而具备清除输电线路异物的潜力。与传统的方法相比, 激光清除异物无须接触输电线路, 可以实现远距离操作, 不会对输电线路的安全稳定运行造成影响, 同时还具备可重复使用性^[1]。

研究激光清除输电线路异物的技术, 不仅可以提高输电线路的安全稳定运行, 促进电力生产的发展, 而且还可以改善环境质量, 维护社会和谐稳定。

2 激光清除输电线路异物技术的研究现状

随着目前激光技术的不断发展, 架空输电线路激光清除异物的研究也得到了广泛关注。国内外学者针对不同输电线路异物的特点, 研究了不同类型、功率、波长的激光清除方法。

表1 某地区近4年异物故障占比

年	异物故障次数	当年故障总数	异物类故障占比/%
2019	22	52	42
2020	14	39	35
2021	9	40	22
2022	17	34	50

收稿日期: 2023-08-10

较早的激光清除方法是使用碳化硅热释电体 (SiC HTP) 作为激光光源。由于碳化硅热释电体在瞬间加热下的阻值变化显著, 导致瞬间放电可以通过轻微的激光脉冲引发, 在放电的同时即可清除输电线路上的异物。但是该方法的效率较低, 无法应用到架空输电电路上。

当前, 基于光纤激光器的激光清除技术已成为主流, 具有光束质量较好、功率密度高、可控性强、易于集成、输出稳定等特点。此外, 可见光激光器也逐渐得到应用, 国内外学者已经进行了大量的研究工作。

同时, 随着激光技术的发展, 新型激光器如二氧化碳激光器、红外线激光器、半导体激光器等也逐渐被应用到输电线路异物的清除中^[2]。目前, 激光清除输电线路异物已经得到了相对成熟的理论基础和实践经验, 并且已经成功应用到一些电力公司的生产实践中。

3 激光清除输电线路异物技术

直接使用激光光束清除异物是当前研究的主要方法之一, 具有操作简单、效率高、无污染、高可靠性等特点。在使用不同功率的激光对不同质量的异物试验后发现, 对于质量特别小的异物, 需要较高的功率才能达到清除的效果, 激光器如图 1 所示。



图1 激光器

该方法是基于激光光束对异物表面进行瞬时加热, 使异物表面出现高温, 从而产生机械液化效应, 使异物从输电电路上掉落。在实际使用中, 使用高功率、短脉冲的激光光束, 可产生足以将异物表面

快速加热的能量密度, 从而使异物表面温度升高到数千℃, 出现局部液化或热解反应, 使异物表面结构发生变化, 从而使异物从输电电路上脱落。

某 110 kV 线路导线悬挂一支风筝, 由于线下环境为河流, 且该地区空域申请受限, 因此使用激光除异物设备在 20 min 之内完成处理。

激光清除异物的方法主要应用于清除输电线路上的防尘网、塑料布、风筝线及其他不具备导电性的异物, 其清除效果良好, 但对于金属异物及有导电性的异物清除效果较差, 激光除异物设备如图 2 所示, 现场作业如图 3 所示。



图2 激光除异物设备组装图

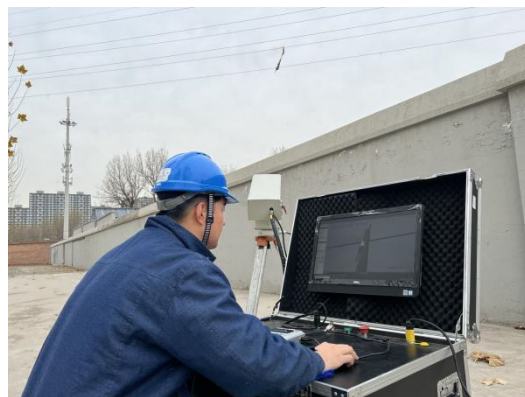


图3 激光除异物作业

4 激光清除输电线路异物技术的特点与难点

4.1 技术特点

激光清除输电线路异物的技术有如下特点。

高效率。与传统的手工、机械清除方法相比, 激光清除异物可以实现高效率、快速清除, 且在可控功率调节范围下不会对输电线路造成任何损伤。

操作简便。激光清除异物不需要人工上塔, 可以实现远距离操作, 无须申请输电线路的停电, 可有效提高作业安全性。

清洁无污染。激光清除技术具有环保、无污染

等特点，不会产生任何有害物质，并且不会对环境造成污染。

高可控性。激光技术可以实现对激光光束的功率、射频、频率、波长等参数的控制调节，从而实现对异物清除过程的精确控制。

4.2 技术难点

激光清除输电线路异物技术在实际应用中仍存在一些技术难点，主要有如下几点。

条件复杂。激光清除技术可能需要在高温、高湿等恶劣条件下工作，因此对激光设备的散热、防水等技术要求较高。

适用范围有限。激光清除技术对异物的种类、尺寸、位置等有一定的限制，如异物为白色不吸光的塑料薄膜或者缠绕在防鸟刺等附件上，激光设备不易在短时间内将其清理。

安全问题。激光清除技术须要使用高功率激光器，对操作人员的眼睛和皮肤造成潜在的伤害，因此在操作中需对激光路径格外注意，采取必要的安全措施。

成本较高。激光清除技术对设备的要求较高，设备较精密，同时也需要投入较大的财力、物力。

激光技术的标准化和规范化尚未完善。目前激光清除技术在标准化和规范化方面尚处于探索和研究阶段，对技术的操作标准和注意事项还须要进一步的研究和完善。

5 激光清除输电线路异物技术的发展前景

激光清除输电线路异物技术具有广阔的应用前景。随着激光技术的不断发展和完善，激光清除技术将会在输电线路异物的清除中发挥重要作用，成为电力行业中不可或缺的技术手段。

随着输电线路的结构和设计越来越复杂，对输电线路异物清除技术的要求也越来越高。相信激光清除技术在输电线路异物清除方面将会更加成熟，高效、可靠、安全。

同时，在激光清除技术的发展中，需要进一步推进技术标准化和规范化，加强技术培训和普及，提高技术人员的素质和技能水平，以推动激光清除技术的广泛应用和推广。

此外，激光清除技术也可以与其他技术相结合，如无人机和机器人等，以实现架空输电线路异物

的智能监测、定位和清除，更好地保障电力系统的安全和稳定运行。

激光清除输电线路异物技术具有广泛的应用前景，有望成为电力行业中的一个重要技术支撑。同时，随着社会的不断发展和对电力安全稳定运行的更高要求，激光清除技术也将不断发展和完善。预计未来，在激光清除技术的应用方面，将会出现更加先进和高效的技术和设备，以满足日益增长的需求。

然而，我们也要看到激光清除技术在实际应用中可能会遇到的挑战和问题。例如，激光清除技术需要消耗大量的能量和成本，需要建立完善的激光清除设备和系统，这将对技术的普及和推广带来一定的阻力。此外，由于输电线路异物的种类和形状多样，不同异物的清除难度也不相同，这将对激光清除技术的应用带来一定的难度。

因此，在推广和应用激光清除技术的过程中，需要加强对激光除异物技术的研究和探索，不断拓展技术应用的领域和方法，提高技术的应用效率和成本效益，使其能够更好地适应不同领域的需求和环境。同时，需要注重技术的可持续性和环保性，积极推动节能减排的理念，在技术的应用和发展中实现可持续发展的目标。

6 结束语

激光清除输电线路异物技术可远距离快速有效清除输电线路异物，是异物处缺工作中一项必备的利器。其具有广阔的应用前景，同时也需要我们在技术研究和应用中积极面对挑战，加强创新和探索，不断提高技术的质量和效率，为推动电力行业的可持续发展做出应有的贡献。

参考文献

- [1] 朱德中, 赵进军, 周健, 等. 远程激光电网异物清除试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 30(24): 73-75.
- [2] 汪海东, 黄晓华, 王军, 等. 输电线路异物激光过程机理研究综述[J]. 电力建设, 2018, 39(11): 97-104.

作者简介

王海涛(1996—), 男, 助理工程师, 主要从事输电线路检修工作。

(责任编辑: 刘艳玲)

变压器套管安全隐患与防范措施的分析

洪艳君

(国网福建省电力有限公司厦门供电公司, 福建 厦门 361006)

摘要: 在供电系统中, 变压器是电力系统的重要设备之一, 变压器的运行状况直接影响电力系统的正常工作。介绍了变压器套管的基本结构和性能, 结合实例, 分析了变压器套管密封不良的原因, 并针对密封问题产生的原因提出了预防措施和相关建议。

关键词: 变压器; 套管; 密封; 措施

中图分类号: TM216

Analysis of Potential Safety Hazards and Preventive Measures of Transformer Bushing

HONG Yanjun

(Xiamen Power Supply Branch of State Grid Fujian Power Co., Ltd., Fujian Xiamen 361006, China)

Abstract: In the power supply system, the transformer is one of the important equipment in the power system, and its operation directly affects the normal work of the power system. This paper introduces the basic structure and performance of transformer bushing detailly. Combined with examples, the causes of poor sealing of transformer bushing are analyzed, and preventive measures and related suggestions are put forward according to the causes of sealing problems.

Keywords: transformer; casing; sealing; measure

1 变压器套管概述

变压器套管是变压器箱外的主绝缘, 变压器套管的引出线应通过绝缘套管连接, 使得引出线之间及引出线与变压器外壳之间绝缘, 同时起固定引线的作用。随着我国能源经济的发展, 电力供应逐年增加, 变压器也逐渐向高电压、大容量发展。为满足市场需求, 达到并超越国外先进水平, 在产品性能、安装尺寸不变的条件下, 外形美观、体积小、质量轻的产品将是一种发展趋势。变压器套管由测量导体和位于变压器油容器顶部的空气释放开关组成^[1]。

2 套管的结构

变压器套管主要用于支撑引出线到地面的绝缘, 起到防电、防污染、防雨防潮的作用。根据电路结构的不同, 变压器套管主要包括穿缆式、导杆式等, 当整体承载力为 1 250 A 及以下时, 应选用电缆类型。

箱体内部为铝绝缘管, 套管为绝缘导体, 内环带穿过铝管套管, 再穿过套管, 最后将固定扣的连接销和电缆连接到螺纹盖的一端, 带导向杆和牵引杆的盖板通常适用于承载能力超过 1 250 A 的场合,

收稿日期: 2023-09-20

导杆内部由封装金属丝作为载体组成。现场装配时, 绕组可连接到气缸后部的端子座上, 内部动力转向杆可以拆卸, 便于连接。

3 变压器套管的使用注意事项

在安装和维护过程中, 应特别注意防潮。除清洗干燥条件外, 最好能在 40~50℃ 组装, 因为电容芯子温度高出环境温度 10~15℃ 时, 可以降低湿度的影响。组装前加热至 70~80℃ 为佳, 保持 3~4 h, 以便排除表面潮气, 尽量在冷却前完成准备工作; 壳体顶部的密封可分为壳体本身的密封和螺纹引线的密封, 其作用是控制压力, 防止波片破裂, 才能达到密封效果。如果顶夹块和顶夹头密封不严密, 雨水会在顶夹块、顶夹头和电缆处沿线路进入变压器。装配中除要有清洁干燥的条件以外, 最好能在 40~50℃ 温度下进行组装。

在起吊、卧放、运输过程中, 套管起吊速度应缓慢。避免与其他物体碰撞, 垂直升降时, 升降线采用法兰, 上壳体连接麻绳, 防止倾倒, 小心不要提起瓷圈套管, 防止连接电池盒的钢丝碰撞; 放置壳体时, 避免在任何部位落地; 如果机壳是水平运输的, 必须放在一个专用的盒子里, 安装平面上必须有 2 个支撑点, 支撑点一定要在顶部, 不能有瓷

裙和瓷尾，套管必须固定在箱中，避免在运输过程中移动或损坏机箱。

检修维护人员应注意的问题。试验人员拆接末屏套管引线时，必须防止导杆旋转或旋转到接地部位，测试后，导杆必须恢复到原来的状态。测试后可以用万用表来测量端子屏是否接地，这是检查端子屏接地后是否恢复的可靠方法；油品取样人员工作后必须紧固取样口；严格质量控制，采购的维修材料须经主管部门验收批准^[2]。

4 故障案例

近年来，变压器套管密封问题比较常见，主要集中在电缆盒和顶部密封不良。

4.1 案例 1：电缆盒密封不良

某台 110 kV 变压器型号为 sz11-50000/110，运行约 15 个月后发生故障，变压器的差动保护动作，故障发生后，检修人员对变压器进行了试验和检查，除油色谱分析异常外，直流电阻和绝缘电阻未见异常。通过三比值法的分析，故障编码组合为 102，为轻弧放电，根据增量计算， CO_2/CO 为 0.57 很可能是固体绝缘的分解，做出吊罩检查决定。经检查，变压器高压电缆套管头部 C 相套管端部有明显的水浸痕迹，由 C 相套管端部进水确认，如果套管的端部密封不好，外部的水分和湿气就会被吸进套管中，并沿着电缆进一步渗透。在绕组电缆出口转角处根部的积聚和滴落，导致内部湿度增加，从而导致绕组绝缘受潮劣化，绝缘电阻降低，差动保护动作。

4.2 案例 2：顶部密封不良

220 kV 变压器夜间爆炸，穿缆式套管的顶部可以根据套管的铁芯与主变压器本体连通，在这种情况下如果不能合理解决顶部的密封问题，很容易在变压器线路晃动等外力作用下松动。导致密封位置就会有缝隙，外界空气进入外壳，形成一个气室。一般情况下，它位于导电铜管上方。此外，通过螺纹与密封圈的缝隙，上端与空气连通。通过变压器油，下端与变压器本体连通。随着主变压器本体油量的提升，导电铜管上的气室容积大小也将随之发生变化。再加上套管内外温差的影响，产生内外压差。一般来说，如果变压器内部的自然环境发生变化，如变压器油量的增减，工作温度的变化，气室也会因变压器本体的变化而发生变化。夏季降水期间，雨水极易积聚在套管顶部。此时，在外壳内部

负压的作用下，雨水很容易被吸入变压器内部。降水期间若遇大风，电线会晃动，进一步破坏套管顶部的密封性，导致更多的雨水进入变压器，最终造成变压器更严重的常见故障。工作人员在雷雨后发现 220 kV 变压器时，发现绕组堵塞发生短路故障。经过检查，发现与 B、C 相比，A 相外壳的法兰片和总帽有严重的锈蚀和松动现象。水进入外壳后，绕组之间的绝缘电阻抗压强度会降低，绝缘层会被穿透而短路，判断为 A 相外壳顶部进水。这种情况的主要因素是顶部结构密封不良。同时，外壳顶部没有严格的密封方案，使得外壳顶部积聚的水顺着导电管直接进入变压器。在对套管顶部进行密封处理的过程中，应采用科学、合理、高效的方法将螺栓固定在套管顶部，可以有效避免密封不严密的情况。为了更好地保证密封的实际效果，可以采用双螺栓结构。此外，还可以标记套管螺栓的密封位置，以便在后续操作中更方便。

5 预防措施及相关建议

变压器套管可以根据实际运行情况安装在线监测装置，持续跟踪套管数据的变化，通过数据对比分析，及时发现套管缺陷。

运行过程中，操作人员应仔细监测并记录充油仓的含油量，必要时，用望远镜仔细检查壳体各部件的密封性，用红外测温确定壳体的含油量，发生溢油事故，应立即报告，并采取相应措施。

6 提高运行可靠性措施和建议

6.1 结构设计方面

最好使用阀盒底部的金属棒，并在阀盒中间端使用绝缘盖，防止旋转，将其锁在螺纹箱结构的顶部，为避免螺纹接头因张力而松动，在使用过程中应加热，切勿断开或中断端子，多点、多通道间隙应避免驱动器与高压线接触。

6.2 制造工艺和试验方面

管道焊接几段后，必须检查焊接工艺的质量，避免导电管道在运行过程中焊缝漏油，在外壳的制造过程中，应严格控制生产环境的清洁度和部件的变形，测试不均匀电场与电容器屏之间的放电及异物的机械强度，避免在使用过程中接触强度过大导致连接器过热，并在焊接前后检查。

(下转第 29 页)

66 kV 干式空心电抗器短路故障整体参数试验研究

陈 颂

(宜昌三峡送变电工程有限责任公司电网建设分公司, 湖北 宜昌 443001)

摘要: 通过研究66 kV干式空心电抗器短路故障问题, 根据现场检查及结构特点, 来进行设备解体检查, 发现包封层表面存在明显毛絮及鸟类排泄物, 第7绕包层与第8绕包层有过火过烟的情况, 且逐渐恶化, 对层间及股间绝缘进行损坏, 最终使得电抗器发生故障。由此提出相应的预防措施, 保障设备的安全运行。

关键词: 干式空心电抗器; 故障检查; 解体分析; 整体参数试验

中图分类号: TM47

Study on Overall Parameters of Short Circuit Fault of 66 kV Dry Hollow Reactor

CHEN Song

(Yichang Three Gorges Power transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Hubei Yichang 443001, China)

Abstract: through the study of 66 kV dry hollow reactor short circuit fault, according to the field inspection and structure point, to inspect the equipment disintegration, found that the surface of the obvious wool and bird excrement, and the 7th and 8th coating have excessive smoke, and gradually deteriorate, the interlayer and strands insulation damage, finally makes the reactor failure. Therefore, the corresponding preventive measures are put forward to ensure the safe operation of the equipment.

Keywords: dry-type hollow reactor; fault inspection; disintegration analysis; overall parameter test

干式空心电抗器是一种用于电力系统中的无源电器件, 其主要功能是提供电感性负载, 以限制电流的变化速度, 稳定电压和电流, 并改善系统的功率因数^[1]。干式空心电抗器具有高度的可靠性, 长寿命, 且不容易发生故障。干式空心电抗器在电力系统中扮演着重要的角色, 用于控制电流波动, 提高功率因数, 以及保护电力设备免受过电流的影响, 是现代电力系统中不可或缺的元件, 有助于提高电力系统的稳定性和可靠性^[2]。

1 故障简况

500 kV的ZH变电站66 kV Z₅号电抗器保护装置过流Ⅱ段保护动作于2022年11月15日08:49, 出现断路器跳闸的情况。变电站在当天没有进行任何操作, 也没有设备异常信号报告, 站点所在地的气温为11℃, 晴天。自动电压控制(AVC)系统自动投退66 kVⅢ母所连接的无功补偿设备, 66 kVⅢ母一次设备接线如图1所示。

收稿日期: 2023-09-21

2 现场检查

2.1 电抗器检查

根据实地检查结果, 对于66 kV Z₅号电抗器中的B相一次引出线, 发现从内向外数还观察到在第7和第8绕包封层之间, 通风道的上端面和下端面都存在电弧过火的迹象。此外, 还注意到与这些受损位置对应的过渡支座与支撑瓷瓶也有明显的烟痕和火损。

根据维护人员对该电抗器保护测控系统的操作记录进行核查, 确认一次过流保护的第一阶段在正常操作中发挥了正确的作用。在2021年3月进行的直流与绝缘电阻测试也通过了合格验证。此外, 在2022年2月的巡检中, 使用红外热像技术和紫外放电技术进行了检查, 结果均显示正常。另外, 还进行了内窥镜检查, 主要针对电抗器的A相通风道和C相通风道进行了检查, 结果显示, 通风道内积聚了一些污物和疑似纤维状的物品。

2.2 故障电抗器结构参数

该电抗器的型号为BKK-20000/66, 是由防雨罩、

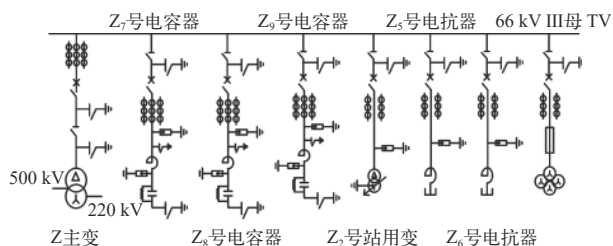


图1 66 kV III母一次设备接线

线圈、绝缘瓷瓶以及玻璃钢支柱构成,其详细参数如表1所示。

表1 电抗器设备参数

项目	参数
标准代号	IEC280-88
冲击水平	350.00 kV
短时间电流持续时间	3.00 s
短时电流	3.00 kA
额定电流	525.00 A
使用条件	户内户外通用
绝缘耐热等级	F
实测电抗	73.13 Ω
最高运行电压	72.50/ $\sqrt{3}$ kV
系统电压	66.00 kV
额定电压	66/ $\sqrt{3}$ kV
额定容量	20 000.00 kV · A

玻璃钢支柱用于支撑和固定导线、绝缘子串、绝缘瓷瓶等元件。能够承受机械载荷,确保设备在恶劣气候和外部力量作用下保持稳定^[3]。玻璃钢支柱具有优良的绝缘性能,可防止电力设备与地之间的电气接触,有助于防止电气设备的绝缘击穿和故障,提高系统的可靠性^[4]。绝缘瓷瓶能够在高温下保持绝缘性能,这对于高压输电线路和变电站等应用至关重要,不易受到电流负荷和环境温度的影响^[5]。绝缘瓷瓶通常设计成具有良好的机械强度,以承受风荷载、冰荷载和外部力量,保障电力系统的可靠性。线圈采用了11个包封的并联结构,共同承担电流和电压的分配,这样的并联设计可以增加电流容量和功率,提高线圈的性能和负载能力^[6]。每个包封都使用了玻璃纤维作为材料,并经过浸透环氧树脂的处理,这种材料组合固化后具有良好的绝缘性能、耐高温性和机械强度,能够在电力系统中长期稳定工作^[7]。确保了包封的完全填充和均匀

分布,提高了电气绝缘性能,减少了局部热点和局部放电的风险。

3 解体分析

通过现场检查以及保护动作,推测该电抗器B相第7~第8绕包层间出现绝缘击穿,为了对故障原因及部位精准确认,进行解体分析。

3.1 整体参数试验

对该电抗器B相工频损耗值、阻抗值以及电阻值进行测量,并对比出厂值,如表2所示。

表2 整体参数试验值

项目	工频损耗/kW	阻抗/ Ω	直流电阻/ Ω
实测值/出厂值	2.55	1.01	1.16
返厂值	149.95	73.53	0.22
出厂值	61.46	73.24	0.19

3.2 导线试验

将下吊臂出线头剔开,做好标记,保持上吊臂不动,对每根导线通断进行测量。将上、下吊臂出线头剔开,对各绕包封层间、股间绝缘电阻值使用500 V兆欧表进行测量。通过结果能够看出,第8绕包封层中导线断裂,第7与第8层间与股间绝缘电阻值为0,其他均正常。

3.3 电抗器解体

该电抗器B相一共解剖4个绕包封层7~11绕包封层,9~11绕包封解体中发现通风道内出现严重的积灰,且有大量鸟类排泄物。

第10绕包封层在顺时针方向外表面的出线臂的第一个扇区内,从下到上分别位于1800 mm和900 mm处,观察到电力支架上的鸟类排泄物。进一步检查后,发现电力支架上有爬电灼伤痕迹,这可能是鸟类排泄物引发的电弧放电所致。

另外,在第8绕包封层的外表面,注意到电弧闪络导致的穿透烟道,明显可见鸟类排泄物和积灰。这一现象在从下到上的1450、700及330 mm处都有出现。此外,外绝缘发现烧蚀孔洞与裂缝,而这些损坏位置主要分布在支撑条附近。

将第8绕外包封4层导线进行揭开,剔出330 mm处的导线,发现导线包覆盖绝缘膜无老化、无变色,且韧性良好。导线明显出现内侧轻、外侧

严重的情况，由此可得到故障的发展是由外向内。

在第7绕包封层与第8绕包封层相对应的位置，发现烟道贯穿的痕迹，并且在700 mm处可见外绝缘孔洞。在进行解体分析时，4层导线揭开发现在绝缘孔洞处，导线的最外层有2根导线熔断，次外层有一根导线熔断，其他位置没有发现损伤问题。

第8绕包封层中，4层导线受损，且受损情况内侧比较轻，外侧比较严重。经过包封解体分析，可以看出故障起始于第7绕包封层与第8绕包封层之间，起始点位于第8绕包封层内侧，与上端相距330、700、1450 mm处，以及外侧距离上端700 mm处，出现了电弧灼伤痕迹，这是逐步发展而来的结果。

3.4 分析故障原因

在通风道内存在毛絮及鸟类排泄物，当遇到降雪及降雨等环境时电抗器在运行中容易引发污湿放电。随着时间的推移，这一现象逐渐恶化，将会沿着包封表面逐渐向内部进行发展，由此使得内绝缘层出现损伤，最终导致包封层间与股间发生短路。而这种短路会生成大量的导电烟尘，使得纵向爬电的情况加速发展，最终该包封层发生贯穿性故障。当电抗器发生故障时，过流保护系统的第一段动作，触发了电抗器断路器的跳闸操作，以保护电力系统的安全和稳定运行。

4 处理及预防措施

4.1 处理措施

该电抗器故障相更换后，进行了必要的电气试验。结果显示合格，因此可以将电抗器重新并入电力系统。在复电后的运行过程中，没有观察到任何异常，且红外热像检测也呈现正常的状态。

4.2 预防措施

制定定期的维护计划，包括定期巡检和检测，以确保电抗器的正常运行。定期检查电抗器的外部绝缘情况，包括绝缘子和包封，以发现并及时修复绝缘损坏。

定期清洁电抗器的通风道，防止积污和杂物积累，降低污湿放电的风险。使用高质量的绝缘材料，提高电抗器的耐高温和绝缘性能。

定期测试电抗器的绝缘电阻，确保其绝缘性能处于良好状态。在电抗器周围安装鸟类防护装置，如鸟网或鸟刺，以减少鸟类的侵害和排泄物对电抗

器的影响。

定期检查鸟类防护装置的有效性，及时修复损坏或松动的部分。安装环境监测设备，监测温度、湿度和污染水平等因素，以便及时采取措施应对潮湿环境和污染。根据环境监测数据，制定相应的预防措施，例如加强绝缘材料的防潮性能。

定期进行电抗器维护，包括清洁、紧固连接件、检查支撑瓷瓶等。

定期进行绝缘试验，如直流电阻测量和局部放电检测，以评估绝缘系统的健康状况^[8]。培训维护人员和操作人员，使其了解电抗器的正常运行和维护要求。制定详细的操作规程，确保操作人员按照正确的程序操作电抗器。始终常备备用电抗器，以便在故障发生时快速更换，减少停电时间^[9]。制定紧急计划，以便在发生故障时能够迅速采取行动，降低损失和维护时间。

参考文献

- [1] 刘传永, 王明, 赵普志, 等. 基于电抗器开断过电压特征分析的匝间绝缘短路故障在线辨识[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38 (8): 7-15, 23.
- [2] 祝令瑜, 杜一鸣, 高璐, 等. 不同频率激励下干式空心电抗器匝间绝缘缺陷振动分布特性[J]. 高电压技术, 2022, 48 (8): 3201-3209.
- [3] 赵春明, 敖明, 王永红, 等. 基于功率因数变化量的干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41 (3): 87-93.
- [4] 尹睿涵, 丁国成, 杨海涛, 等. 基于功率因数法的干式空心电抗器匝间短路故障检测研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41 (2): 80-85.
- [5] 李文杰, 许国龙, 邵三保, 等. 高电压大容量干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法探析[J]. 电工技术, 2020 (4): 75-76+79.
- [6] 胡泰山, 蔡汉生, 刘刚, 等. 500 kV限流电抗器接入90 kA短路电流系统时瞬态恢复电压抑制分析[J]. 南方电网技术, 2019, 13 (12): 53-59.
- [7] 齐伟强, 田翠华, 董健鹏, 等. 基于不平衡度差值的并联电抗器匝间短路故障检测方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40 (5): 110-115.
- [8] 凌云, 赵彦珍, 肖利龙, 等. 高电压大容量干式空心电抗器匝间短路故障在线监测方法[J]. 高电压技术, 2019, 45 (5): 1600-1607.
- [9] 杨振宝, 黄文武, 赵彦珍, 等. 基于ANSYS Maxwell的干式空心电抗器匝间短路故障瞬态特性的仿真分析[J]. 实验科学与技术, 2018, 16 (6): 50-53.

作者简介

陈颂 (1983—), 男, 本科, 副高级工程师, 主要从事工作: 电气试验。

(责任编辑: 刘艳玲)

几种对出口压板投退状态进行检测的方法

李靖文*, 谢煜堃

(广东电网有限责任公司梅州供电局, 广东 梅州 514000)

摘要: 现今自动化保护装置广泛应用于电网线路中, 对线路健康运行起着重要作用。在线路运维时经常要对保护装置的压板进行投退操作, 如果在临时投入或退出压板后未及时恢复, 就会影响保护装置动作, 线路在有故障发生时将无法隔离故障。而出口压板的电路装接了断路器的分合闸线圈, 若使用电压电流检测压板通断的方法势必会触发分合闸线圈的方式, 必然会导致断路器误动。介绍对比了几种对出口压板进行监控的方法, 同时分析了各种方式适用的场景, 利用红外传感器的方式感应压板的位置, 对压板的投退状态进行监控, 这种方式适合于改造现场已投运的自动化终端设备。

关键词: 出口压板; 监测; 自动化终端

中图分类号: TM773

Several Kind of Method to Detach the Status of the Relaying Plate

LI Jingwen*, XIE Yukun

(Meizhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Meizhou, 514000, China)

Abstract: Nowadays, relay protection device are widely used in electricity distribution line, playing an important role in the healthy operation of electricity distribution line. When maintaining the line, it is often necessary to switch on and off the relaying plate of the protection device. If the relaying plate is not restored in time after temporary switching on or off, it will affect the action of the protection device, and the electricity line will not be able to detect the fault in the power system. The outlet pressure plate circuit is connected with the opening and closing coil of the circuit breaker. If the method of detecting the pressure plate on and off by voltage and current is used, it will inevitably trigger the opening and closing coil mode, which will inevitably cause the circuit breaker to malfunction. This article introduces and compares several methods for monitoring the relaying plate, and analyzes the applicable scenarios of various methods. This method is suitable for transforming the automation terminal equipment that has been put into operation on site.

Keywords: relaying plate; monitor; automated terminal

目前配网自动化设备已广泛应用于配电网线路保护当中, 配网自动化设备动作准确性决定了配电网线路的运行稳定性, 而配网自动化设备的压板直接影响了配网自动化设备的保护功能与动作出口, 压板的误投退往往会导致配网自动化开关拒动或误动。在配网线路运行中, 会导致压板误投退的情况有以下几种: (1) 配网自动化设备运维人员在对配网自动化设备进行定值整定时误投退设备压板; (2) 配网线路运维人员在配网线路退重合闸、运行转检修等操作时需临时变更压板投退状态, 在线路检修结束后须恢复压板状态时可能会误投退压板或者忘记恢复压板状态。由于配网线路常有退重合闸、运行转检修等操作, 而且操作频率较高, 对配网自动化

设备稳定运行影响也更大, 出口压板误投退的情况下保护信号将无法出口到线圈, 就会影响保护装置动作, 线路在有故障发生时将无法隔离故障, 因此对配网自动化设备压板投退状态进行检测的需求越来越高^[1]。

配网自动化设备上的压板分为功能压板与出口压板, 功能压板串接在自动化终端遥信采集回路, 压板一端接入终端公共遥信点, 另一端接入遥信采集端口, 终端通过遥信采集端口的电平信号可以判断压板是否投入; 出口压板串接在自动化终端的控制回路, 压板一端接入终端分闸或合闸出口端子, 另一端接入开关分合闸线圈。功能压板通过采集电平信号可以检测压板是否投入, 而出口压板由于串接在控制回路, 回路中除开关分合闸电平信号以外的其他信号都会引起开关的误分或误合, 故终端无法通过采集电平信号的方式来监测出口压板的投退状态。

基金项目: 广东电网有限责任公司职工创新项目资助 (项目名称: 一种可以检测出口压板投退状态的装置; 项目编号: 031400KZ23070002)。
收稿日期: 2023-08-30

为实现对自动化设备出口压板的投退状态进行监测，现提出几种监测的方法并分析相互之间的优缺点。

1 检测方法分析

1.1 双压板联动

通过改进压板的物理结构，使 2 个压板的投退状态互相关联，其中一个压板投入或退出时，另一个压板也跟随变化投入或者退出，其中一个压板 A 作为出口压板接入控制回路，另一个压板 B 作为投退辅助判断压板接入遥信采集回路，通过采集压板 B 的遥信回路电平状态来判断压板 A 的投退状态，实现在不影响出口压板所接入的电路回路的情况下，对压板的投退状态进行检测。

优点：通过改进物理结构的方式实现功能，终端二次回路可以保持简洁。

缺点：压板数量增加可能会影响终端面板布局；2 个压板的物理结构相连接可能导致压板的投退操作变得更烦琐、更复杂。

1.2 串接遥信点

在终端分合闸信号出口至出口压板的电路上、出口压板到线圈之间的电路上分别增加一个遥信采集点，在终端开出分合闸信号的瞬间，如果压板在投入状态，则 2 个遥信采集点能同时采集到一个变化的电平信号，反之如果压板在退出状态，则终端分合闸信号出口至出口压板的遥信点能采集到的电平变化，出口压板到线圈之间的遥信采集点采集不到电平变化的信号，通过比较 2 个遥信点的电位变化实现对压板投退状态的判断。

优点：无须改变终端物理结构。

缺点：仅能在终端开出分合闸信号的瞬间判断压板是否投入，无法实现对压板投退状态的持续监测，也就是只能作为设备拒动或误动后的一个判断依据，不能预防因压板误投退导致的开关误动或拒动的发生；遥信采集点的故障可能会导致开关误动作；在出口回路多接入一个遥信点可能导致分合闸信号被分流、分压，从而使分合闸线圈无法启动。

1.3 磁感应位置

在出口压板的中间位置嵌入一个磁铁，在压板投入与退出的对应位置分别放置磁感应传感器，在压板投入或退出时分别会触发到 2 个磁感应传感器。

通过计算 2 个磁感应传感器所接收到的信号强弱来判断压板所处的位置，从而实现对压板投退状态的监测。

优点：不改变终端二次回路的结构。

缺点：电磁感应信号有可能影响到终端的二次回路；电磁感应范围比较大，位置识别不够精准。

1.4 红外感应位置

在终端面板上对应压板投入与退出的位置分别开一个小孔，在小孔下方各放置一个红外传感器。使压板背面处于光亮、可反射光的状态，使终端背板上除小孔的其他部分都处于深色、不反射光的状态，通过计算红外传感器所接收到的信号强弱来判断压板的位置，实现对压板投退状态的监测。

优点：对压板位置的识别比较准确，不改变终端二次回路的结构。

缺点：须要对终端面板进行一些加工处理。

1.5 将压板并入控制回路断线检测回路中

大部分终端的二次回路中一般都包含控制回路断线检测，如图 1 所示，B14 与 B17 遥信点，B14 遥信点可以监控线圈、刀闸辅助接点、储能辅助接点等状态共同构成的合闸回路通断，若将合闸压板也串接入此回路，就可以实现对合闸压板通断的监测。

优点：无须改变装置物理结构。

缺点：将压板状态和开关辅助位置等一并接入控制回路断线检测中，若压板未投入一定能收到控制回路断线告警，但收到控制回路断线告警不一定是因为压板未投入，也可能是回路断线。

2 方案比较与适用场景

通过比较以上 4 种方案的优缺点，可以分析得出：双压板联动的监测方式对压板的识别比较准确，但结构比较复杂，适用于终端面板空间充裕，且比较适合在新生产的终端上定制使用，不适用于现场已投运设备的改造。

串接遥信点的方式比较适用于对于设备发生问题时的辅助分析判断，不适用于对压板日常监测的需求。由于改造方式比较简单，此种方案比较适合对已投运设备的改造升级。

磁感应监测方式原理比较简单，但由于磁感应范围不好把控，可以作为压板位置的辅助判断，不

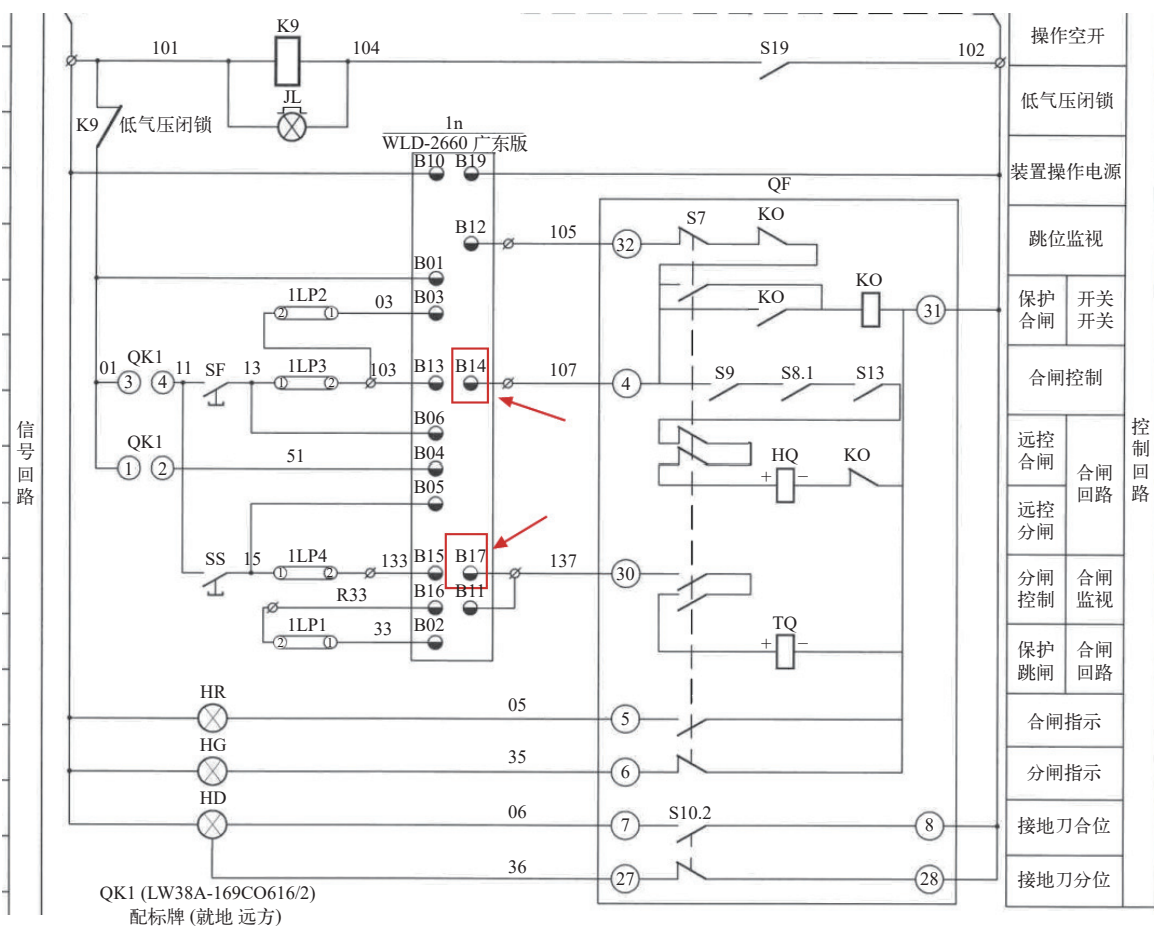


图1 自动化终端二次回路示意图

适合用于日常监控。

红外感应监测方式原理比较简单，其感应位置的精确度可由终端面板上加工孔的大小和位置来调整，比较适合对已投运设备的升级改造。

将压板并入控制回路断线检测回路中的方式需要在设备出厂前即进行改造设置，无法对已投运设备进行此种方式的改造。

3 红外感应监测的实现方式

3.1 检测每个出口压板的投退状态

现今使用的压板结构主要由压板底座和连接片组成，压板在投入和退出状态时，连接片的位置会发生变化。

连接片为光亮金属结构，可反射红外光线。在压板底座加上 2 个红外传感器，每个红外传感器由红外线发射装置和红外线接收 2 个装置组成。2 个红外传感器安装位置对应压板投入和退出时的位置，压板的连接片位于红外传感器上方时，连接片反射

红外传感器发射出的红外光线，传感器中的红外接收器就可感应到红外信号，即可感知压板的连接片位置在传感器的上方；若红外接收器未接收到红外信号，即可感知压板的连接片不在传感器上方，如图 2 所示。

结合 2 个红外传感器接收的信号，即可知道压板的投退位置。若传感器 A 接收到信号，传感器 B

绿色为未被连接片遮挡的传感器
红色为被连接片遮挡的传感器

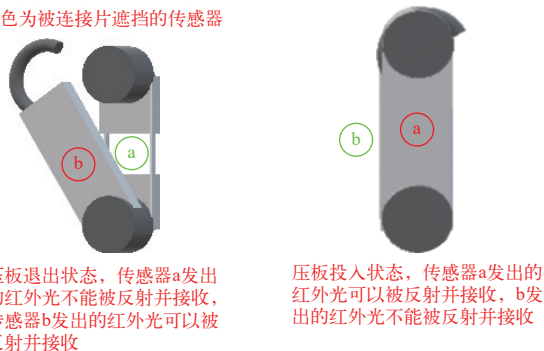


图2 红外传感器检测压板位置的原理示意图

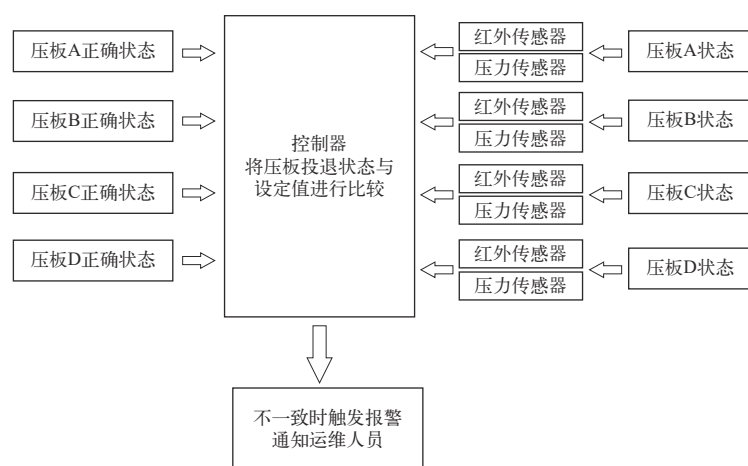


图3 监测多个出口压板的投退状态的逻辑图

未接收到信号，压板在投入位置；若传感器 A 未接收到信号，或传感器 A 和 B 都接收到信号，压板在退出位置。

3.2 检测每个出口压板的投退状态

使用一个控制器，运维人员可在控制器上设定每个出口压板的正确投退状态。控制器同时采集每个出口压板的投退状态和螺帽拧紧程度，并与设定的正确状态进行比较，当有压板的状态与预设不符时，控制器将触发报警信号，提醒运维人员，如图 3 所示。

4 结束语

利用红外传感器的方式感应压板的位置，对压

(上接第 22 页)

6.3 安装和运行维护方面

拉杆三脚架扣安装好后，用扭矩测量装置检查安装张力，避免因张力过大而断裂。在监控装置上安装带有屏幕转换器的盒子来接收信号。在安装锁紧装置前，必须定期检查测试介电损耗和电容。正常运行损耗会产生少量乙炔，如果套管受潮或密封损坏，会加剧乙炔含量的增长。对于有过热或漏油等问题的套管，必须及时进行同类型套管的状态检测和分析。

7 结束语

变压器高压套管是变压器的薄弱环节，头部结构中的薄弱环节易造成轻微的负压。老化和技术引进不当会导致密封不良和外部进水，导致变压器产

板的投退状态进行一个监控，从而可以提高线路上自动化设备保护动作的准确性。这种方式很适合用于改造现场已投运的自动化终端设备，但要注意改造施工过程中对面板的加工工艺，加工孔的位置和大小会影响压板投退判断的准确性。

参考文献

- [1] 叶在福. 基于物联网技术的保护出口压板位置监测系统[J]. 流体测量与控制, 2023, 4 (2): 43-47.

作者简介

李靖文 (1991—), 女, 本科, 工程师, 从事配电方面工作。

(责任编辑: 刘艳玲)

生严重故障, 影响设备的稳定运行。为避免箱体密封不良, 建议加强对箱体最终安装过程的控制, 同时可利用油色谱、微水和局部在线监测装置进行实时数据监控。

参考文献

- [1] 胡芳婷, 赵密锋, 章景城, 等. 塔里木油田套管气密封检测技术现状及分析[J]. 理化检验 (物理分册), 2021, 57 (3): 1-6, 13.
- [2] 练章华, 刘洋, 张耀明, 等. 一种套管悬挂器金属密封结构设计与研究[J]. 润滑与密封, 2019, 44 (8): 115-120.

作者简介

洪艳君 (1989—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向: 电气工程。

(责任编辑: 刘艳玲)

开关柜绝缘放电信号缺陷定位典型案例

王思萌*, 陈东巍, 李晓阳, 雷劲跃, 刘辰, 李震

(国网北京市电力公司检修分公司, 北京 丰台 100073)

摘要: 定期对开关柜开展状态监测工作, 检测方法包括暂态地电压 (TEV)、特高频局放检测、超声波、红外热像等技术。有时 TEV、超声波、红外热像数据均正常, 特高频检测发现异常, 可能存在绝缘类缺陷, 所以 TEV 与特高频检测要同时进行, 全方位判断设备是否正常运行。发现缺陷时, 对缺陷信号进行全方位分析, 并使用示波器进行准确定位, 在开仓检修后发现开关柜 TV 部件 C 相存在绝缘放电信号。

关键词: 开关柜; 绝缘放电信号; TEV 检测; 特高频局放检测; 示波器定位

中图分类号: TM591

Typical Case of Insulation Discharge Signal Defect Localization in Switchgear

WANG Simeng*, CHEN Dongwei, LI Xiaoyang, LEI Jinyue, LIU Chen, LI Zhen

(State Grid Beijing Maintenance Company Equipment Condition Monitoring Center, Beijing Fengtai 100073, China)

Abstract: Regularly monitor the status of the switchgear, including transient earth voltage (TEV), Ultra high frequency partial discharge detection, ultrasonic, infrared thermal imaging and other technologies. Sometimes, TEV, ultrasonic and infrared thermal image data are normal, and Ultra high frequency detection finds abnormalities, which may lead to insulation defects. Therefore, TEV and Ultra high frequency detection should be conducted at the same time to judge whether the equipment operates normally in an all-round way. When defects are found, a comprehensive analysis of the defect signal is carried out and an oscilloscope is used to accurately locate them. After opening the warehouse for maintenance, it is found that there is an insulation discharge signal in phase C of the TV component of the switchgear.

Keywords: switchgear; insulation discharge signal; TEV testing; ultra high frequency partial discharge detection; oscilloscope positioning

状态监测人员在对开关柜进行检测工作时, 通常使用暂态地电压 (TEV)、红外热像、超声波、特高频局放等检测技术。最常用的检测技术为 TEV, 有时 TEV 数值正常, 检测人员可能认定开关柜运行正常, 但有一些绝缘类缺陷信号不会在 TEV 数值上显示异常, 却在特高频检测数据中明显呈现出来^[1]。当发现某开关柜 TEV 数值正常, 特高频数值异常, 须立刻警惕, 判断缺陷信号类型, 结合示波器进行缺陷定位, 立刻上报开仓检修。



图 1 4B9/4B8 开关柜

1 基本概述

2022 年 8 月 16 日, 设备状态监测中心根据工作计划对 S 站进行全站检测, 在对开关柜室进行检测时发现 4B9/4B8 开关柜存在特高频局部放电信号, TEV、红外热像、超声检测未见异常, 经示波器定位放电位于开关柜前中柜靠右上位置, 如图 1 所示。

收稿日期: 2023-08-08

2 缺陷问题

2.1 暂态地电压 (TEV) 检测数据

由 TEV 检测数据表 1 得知, 开关柜数值都较为接近, 4B9/4B8 开关柜的 TEV 数据未见异常。

2.2 特高频检测数据

通过图 2、图 3、图 4 T90 特高频检测数据可知,

表 1 开关柜 TEV 数据

调度号	前中 dB	前下 dB	后上 dB	后下 dB
245	10	—	9	9
4B9/4B8	10	10	9	10
202B	10	—	9	10
202A	10	—	10	10

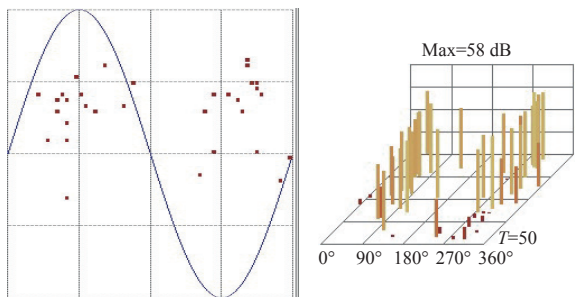


图 2 4B9/4B8 前中柜

信号发生于开关柜内部，空间无信号。4B9/4B8 开关柜前中柜最大值在 60 dB 左右，且信号较为连续，前下柜信号明显减小，后下柜信号最大数值为 60 dB。

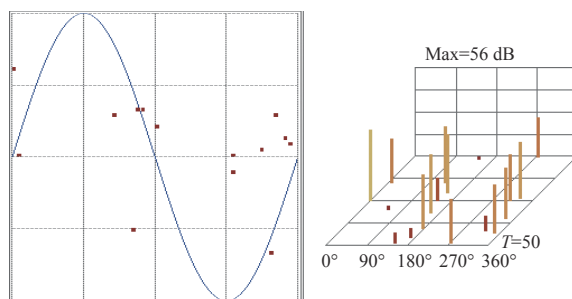


图 3 4B9/4B8 前下柜

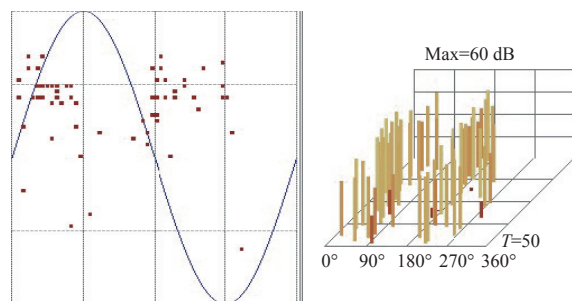


图 4 4B9/4B8 后下柜

2.3 DMS 特高频检测数据

由图 5、图 6、图 7 DMS 检测结果可知，4B9/4B8 前中柜观察窗信号明显，且信号大于前下柜、

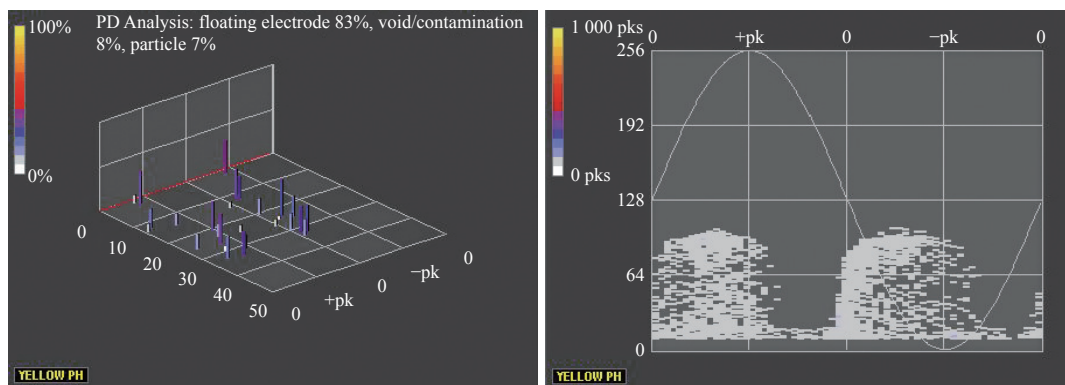


图 5 4B9/4B8 前中柜 DMS 图谱

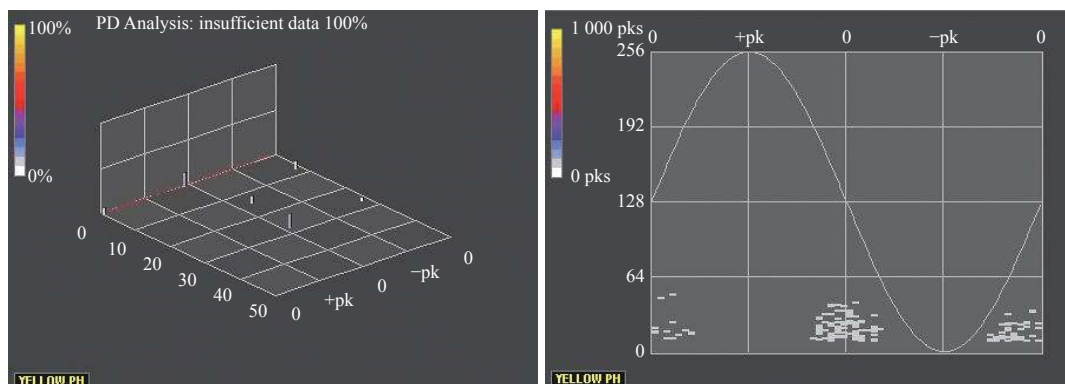


图 6 4B9/4B8 前下柜 DMS 图谱

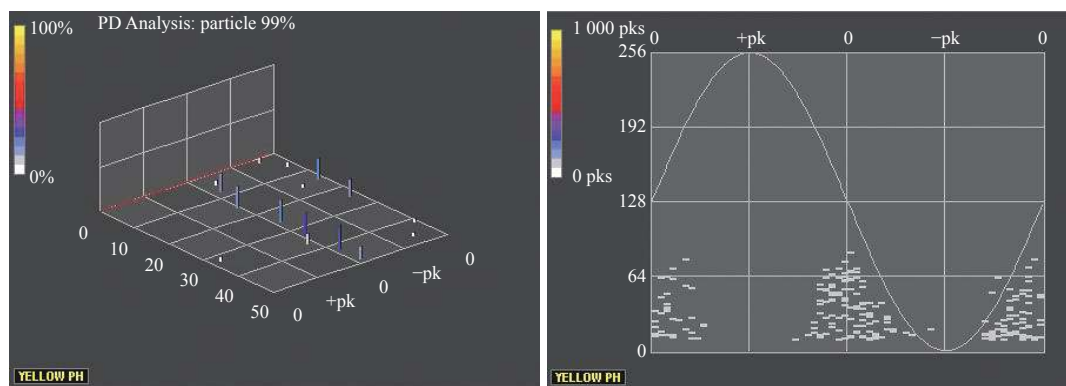


图7 4B9/4B8后下柜DMS图谱

后下柜，初步推测局部放电信号类型应为绝缘类放电。

2.4 示波器检测数据

4B9/4B8前中柜与后下柜比较（后下柜：黄色；前中柜：紫色），如图8所示，前中柜信号明显快于后下柜信号，时差 $\Delta t = 3.55\text{ ns}$ ，通过时差定位法，开关柜前后距离 $L = 2.1\text{ m}$ ， $c = 3 \times 10^8\text{ m/s}$ ，通过公式^[1]： $x = \frac{1}{2}(L - c\Delta t)$ 可计算得出信号位于距离前柜45~50 cm左右。

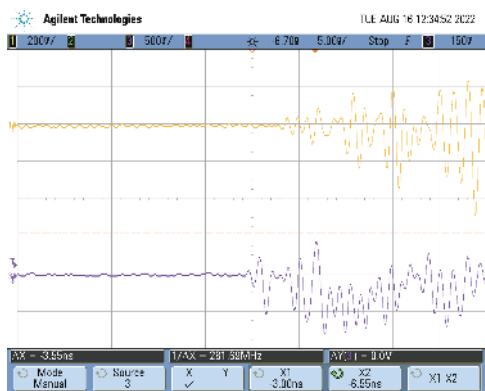


图8 4B9/4B8前中柜与后下柜图谱

检测4B9/4B8前中柜窗与右柜缝（柜窗：紫色；右柜缝：黄色），如图9所示，信号先到达柜窗，时差 $\Delta t = 500\text{ ps}$ ，如图10所示，通过时差定位法，两探头距离 $L = 40\text{ cm}$ ，由于时差数值较小，且开关柜内部结构复杂，通过计算信号大概位于开关柜靠右侧。

检测4B9/4B8前中柜窗与前中上柜缝（柜窗：紫色，上柜缝：黄色），如图11所示，信号先到柜窗，时差 $\Delta t = 700\text{ ps}$ ，如图12所示，由于时差数值较小，通过计算推断信号源大概位于中上方。



图9 4B9/4B8前中柜窗与右柜缝探头位置



图10 4B9/4B8前中柜窗与右柜缝图谱

结合3次示波器检测结果，判断该信号源位于4B9/4B8前中柜靠右上部，如图13所示。

3 分析结果

TEV数值在正常范围，红外热像、超声波检测无异常，特高频数据存在异常信号，初步推断可能



图 11 4B9/4B8 前中柜窗与前中上柜缝探头位置

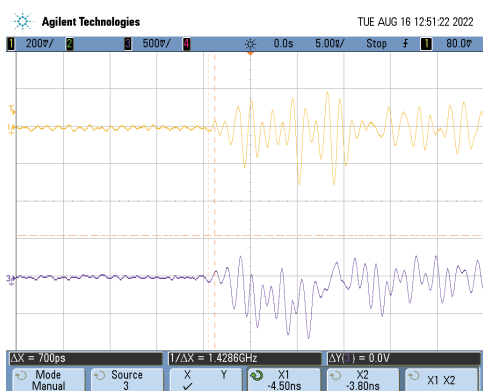


图 12 4B9/4B8 前中柜窗与前中上柜缝图谱



图 13 信号发生位置

存在绝缘类缺陷，经示波器检测定位，4B9/4B8 存在特高频放电信号，信号源位于距离前柜 45 cm 左

右，位于 TV 位置，经示波器确定信号在前中柜靠右上部，大致确定信号位于 TV 靠 C 相位置，信号类型应为绝缘类放电，建议停电处理。

4 检修结果

经过加压测试，发现开关柜 TV A、B 相无问题，C 相存在绝缘放电信号，如图 14 所示，经检修人员更换 C 相 TV 后，信号消失。



图 14 缺陷位置

5 防护建议

开关柜检测须采用多种技术手段，当发现局部放电时初步分析出放电类型，存在绝缘缺陷问题值得工作人员高度重视，加强对开关柜进行特高频局放检测、红外热像、暂态地电压、超声等技术检测，发现问题及时上报，尽早处理。

参考文献

[1] 国家电网公司运维检修部组. GIS设备带电检测异常判断手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.5.

作者简介

王思萌 (1993—)，女，工程师，主要从事设备状态监测工作。

陈东巍 (1977—)，男，助理工程师，主要从事设备状态监测工作。

李晓阳 (1995—)，男，工程师，主要从事设备状态监测工作。

雷劲跃 (1984—)，男，助理工程师，主要从事设备状态监测工作。

刘辰 (1988—)，男，助理工程师，主要从事设备状态监测工作。

李震 (1975—)，男，助理工程师，主要从事设备状态监测工作。

(责任编辑: 张峰亮)

500 kV 线路耐张线夹断裂原因分析及治理防范建议

张贵军

(云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南 昆明 650011)

摘要: 耐张线夹是用来将导线或避雷线固定非直线杆塔耐张绝缘子串上的金具。输电线路运行过程中, 耐张线夹锈蚀、发热、断裂等问题时有发生, 线夹断裂问题直接威胁输电线路的安全稳定运行, 因此, 加强耐张线夹断裂原因分析尤为重要。文章对某500 kV 线路导线耐张线夹引流板根部断裂原因进行了分析, 提出了相应的治理防范建议, 为类似事件的分析与处理提供参考。

关键词: 输电线路; 耐张线夹; TJ型调距间隔棒; 引流线夹; 断裂

中图分类号: TM727

Analysis of Fracture Causes of 500 kV Transmission Line Tensioning Clamp and Suggestions for Treatment and Prevention

ZHANG Guijun

(Kunming Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yunnan Kunming 650011, China)

Abstract: Tension clamp is a kind of hardware used to fix conductor or lightning conductor on the tension insulator string of non-linear tower. In the process of transmission line operation, problems such as corrosion, heating and fracture of tension clamp often occur. Clamp fracture is a direct threat to the safe and stable operation of transmission lines. Therefore, it is particularly important to strengthen the fracture analysis of tension clamp. In this paper, the causes of the root fracture of the drainage plate of a 500 kV line conductor tension clamp are analyzed, and the corresponding treatment and prevention suggestions are put forward, which can provide reference for the analysis and treatment of similar incidents.

Keywords: transmission lines; tension clamp; TJ type pitch spacer; drainage clamp; fracture

0 引言

耐张线夹是用来将导线或避雷线固定非直线杆塔耐张绝缘子串上, 并承受导线张力的金具。根据连接型式不同, 主要分为螺栓型、楔型和压缩型3种^[1]。为满足线夹握力要求, 在500 kV输电线路中, 常用的耐张线夹为压缩型耐张线夹, 压缩型耐张线夹由铝管与钢锚组成, 安装可采用液压或爆压, 随着近年来液压工艺的发展, 液型耐张线夹在电网中得到广泛应用。耐张线夹设计、压接、安装等缺陷以及恶劣运行环境可能造成线夹腐蚀、发热或断裂等问题^[2-13], 直接威胁输电线路的安全稳定运行。

本文以一起500 kV输电线路导线用耐张线夹引流板根部断裂缺陷为研究对象, 从断口形貌、化学

收稿日期: 2023-08-02

成分、有限元仿真、金相组织、运行环境、金具组装结构等方面综合分析线夹断裂原因, 并提出治理防范建议, 为类似事件的分析与处理提供参考。

1 缺陷概况

运维人员巡视发现某500 kV输电线路12号塔中相小号侧右上(2号)子导线耐张线夹铝管弯管处断裂, 右下(3号)子导线引流线夹断裂, 属紧急缺陷, 如图1所示。

12号塔塔型为5E1Y1-J2-36, 向左转角35°40', 大号侧使用档距225 m, 小号侧使用档距712 m, 设计覆冰厚度10 mm, 设计基本风速27 m/s(风速基准高度10 m)。导线采用4×JL/LB1A-400/50铝包钢芯铝绞线, 分裂间距450 mm。耐张线夹型号为NY-400/50BG, “手枪型”外观, 铝管(引流板)材质为1050A铝, 热挤压成型材。



图1 耐张线夹断裂情况

2 断裂原因分析

2.1 外观检测

检测样为某 500 kV 输电线路 12 号塔断裂的耐张线夹引流板及引流线夹，样件有 3 部分，分别编号为 1#、2#、3#，如图 2 所示。1#为 12 号塔中相小号侧 2 号子导线断裂的耐张线夹引流板；2#、3#为 12 号塔中相小号侧 3 号子导线两侧断裂的引流线夹。根据图 1 现场照片，2、3 号子导线靠近耐张线夹的引流线上安装了调距间隔棒，间隔棒的另一端分别连接着旁边子导线的延长拉杆。



图2 送检样品

经外观检测，2 号子导线耐张线夹引流板（1#）断口表面平整，断口上有高温熔融痕迹，断口上和铝管后出口位置的高温熔融痕迹应为耐张线夹断裂后放电导致。观察到断口表面有疲劳辉纹，呈现疲劳断裂特征。

2.2 化学成分检测

根据厂家提供资料，断裂耐张线夹铝管设计材质为 1050A。按 GB/T 7999—2015《铝及铝合金光电直读发射光谱仪》和 GB/T 3190—2008《变形铝及铝合金化学成分》，采用电火花发射光谱法对 1#、2#样品进行成分检测，经检测化学成分满足标准要求，检测结果如表 1 所示。

表1 样品化学成分分析结果

牌号	化学成分（质量分数）/%							
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
1050A	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05	99.50
1# 样品	0.22	0.12	0.03	—	0.04	0.02	0.01	99.52
2# 样品	0.20	0.14	—	0.003	0.01	0.01	0.009	99.59

2.3 断口形貌

利用扫描电镜观察 2 号子导线耐张线夹引流板（1#）断口，观察到明显的疲劳辉纹，如图 3 所示，呈现疲劳断裂特征，表明断口在断裂过程中发生了疲劳扩展。疲劳裂纹间距较小，根据比例尺判断，间距约为 1 μm/条。耐张线夹直径为 45 mm，单边长度大约 70.68 mm，加上裂纹的萌生阶段，根据材料与结构的疲劳判断，耐受疲劳能力在高周疲劳与耐久疲劳之间，降低应变幅值（即：减小金具受力），可明显增加其使用寿命，使金具耐受疲劳能力进入耐久区域。经分析，结构与应力不配套是导致断裂的主要原因，破坏源主要为振动次数较多的微风振动。

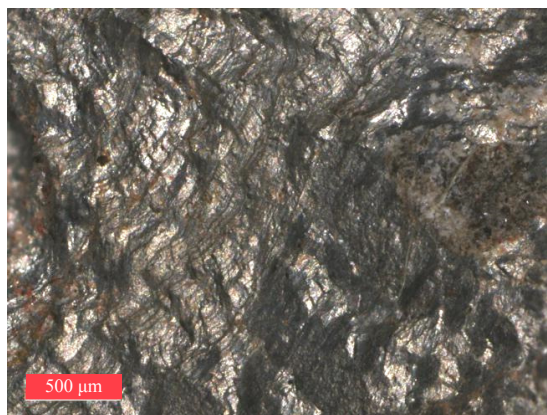


图3 2号子导线耐张线夹引流板（1#）断口 3D 显微照片

3 号子导线引流线夹（2#、3#）断口中间有间隙，主要因为引流线夹是由铝管压制成型，所以在断口中间有间隙，间隙两侧的断口形貌不同，一侧的断口较平整，一侧的断口粗糙，如图 4 所示。

在扫描电镜下观察 3 号子导线引流线夹（3#）断口，观察到明显的疲劳辉纹，呈现疲劳断裂特征，表明断口在断裂过程中发生了疲劳扩展，如图 5 所示。



图4 3号导线引流线夹(2#)断口照片

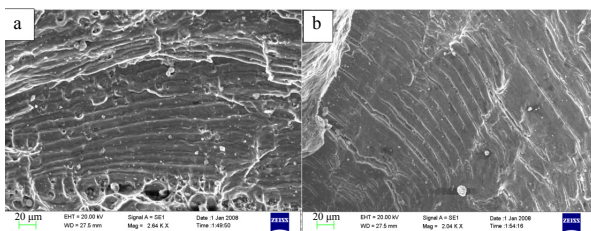


图5 3号导线引流线夹(3#)断口3D显微照片

根据比例尺判断,疲劳裂纹间距较小,间距约为 $7\mu\text{m}/\text{条}$ 。线夹宽度大于 24mm ,压制板呈两层分布,一侧为疲劳断裂,另一侧瞬断区,疲劳断裂厚度大约 12mm ,根据材料与结构的疲劳判断,耐受疲劳能力在低周疲劳与高周疲劳之间,随着应变幅值增大,能够耐受的循环次数变少。经分析,结构与应力不配套是导致断裂的主要原因,破坏源主要为振动次数较少的舞动。

2.4 仿真分析

为研究线夹断裂过程的受力情况,采用有限元方法建立线夹模型,通过测绘获得耐张线夹外形并建模,结果如图6所示。

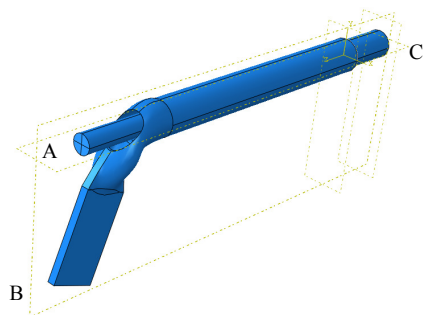


图6 线夹外形仿真模型

有限元模型采用三维实体单元建模,铝弹性模量 70GPa ,泊松比 0.3 ,塑性延伸强度 100MPa ,抗拉强度 150MPa 。钢锚弹性模量 210GPa ,泊松比 0.3 ,塑性延伸强度 1000MPa ,抗拉强度 1500MPa 。

在载荷加载方式上,通过在C位置施加位移模拟导线舞动,C位置向下位移 4mm 。

施加边界条件约束时,A位置和B位置全部固定。计算结果如图7、图8所示。

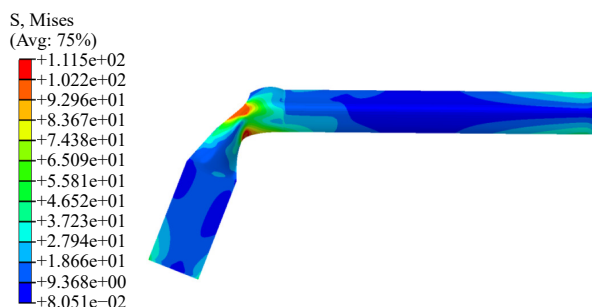


图7 底板约束应力云图1

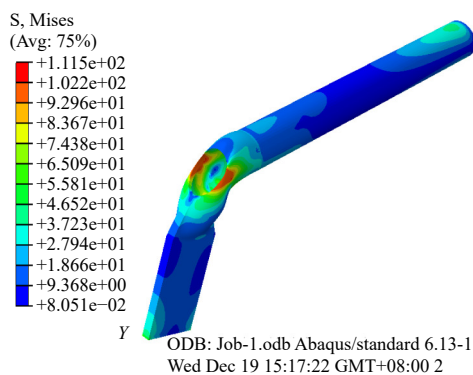


图8 底板约束应力云图2

如果取消B处的约束,在C位置施加相同的位移,计算所得应力云图如图9、图10所示。

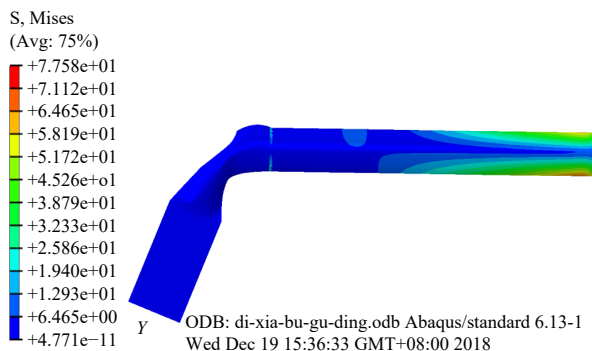


图9 取消B处的约束时的应力云图1

有限元的分析显示,耐张线夹连接的引流线受到约束可造成耐张线夹转折位置的应力集中,该应力集中部位与1#样品实际断裂部位一致。2#样品的引流线夹处于同一应力传递路径上,结合现场图片判断,由于对应耐张线夹和调距间隔棒安装位置不同,导致导线舞动(微风振动)产生的最大应力集

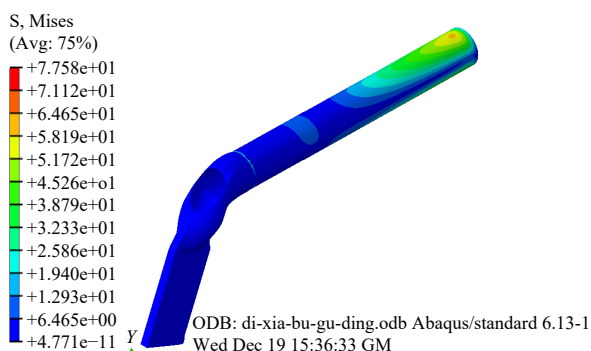


图10 取消B处的约束时的应力云图 2

中位置转移至引流线夹根部，使得疲劳断裂位置发生变化。经分析断裂主要原因为：安装在引流线与延长拉杆之间的间隔棒对引流线夹和耐张线夹引流板产生了刚性约束，导致在导线摆动时线夹转角部位产生应力集中，在长期摆动的循环应力作用下产生疲劳裂纹并最终导致断裂。综合分析，1#样品破坏源主要为振动次数较多的微风振动，2#样品破坏源主要为振动次数较少的舞动。

2.5 周边环境

某 500 kV 输电线路 12 号塔位于山顶最高处，大号侧使用档距 225 m，小号侧使用档距 712 m，跨越山箐，但是与山箐沟方向呈 50°左右夹角，此地地形为非微地型区域，从地势看，此地无隘口风力汇聚情况，不存在较为特殊的风速及覆冰，耐张线夹的断裂与地形、地势无强相关性，如图 11 所示。



图11 现场地貌及周边环境

金具腐蚀通常分为烟气腐蚀、应力腐蚀、蒸气腐蚀、腐蚀疲劳、冲击腐蚀、晶间腐蚀、垢下腐蚀共 7 种，结合每种腐蚀特性及周边环境联系性开展分析：周边 3 km 范围内无化工厂，可以排除烟气腐

蚀、蒸气腐蚀；断裂金具为 NY-400/50BG，对本金具无明显应力腐蚀作用；周边无腐蚀性介质，不存在交变荷载和腐蚀性介质的交互作用，可以排除腐蚀疲劳；周边流体只有空气，而且为非腐蚀性空气，可以排除冲击腐蚀；晶间腐蚀通常出现于黄铜、硬铝合金和一些不锈钢、镍基合金材质中，结合金相组织分析，可以排除晶间腐蚀；线夹上无水垢或有沉积水渣，可以排除垢下腐蚀。

2.6 金具组装

对照金具组装图分析，现场金具组装结构满足设计要求。但该类型金具组装结构存在不足，耐张线夹采用“手枪型”，其本身强度低且抗振动疲劳性能较弱，加之所有引流线与延长拉杆较近的地方均安装有 TJ2-12400 调距间隔棒，如图 12 所示，该根子导线引流线与另一根子导线的延长拉杆形成刚性连接，增加了同一水平面内前后子导线异频振动的应力，导致耐张线夹引流板及引流线夹转弯应力较大，易出现疲劳损坏，增加线夹断裂的风险。



图12 调距间隔棒现场安装位置图

同时，在引流线与延长拉杆之间的调距间隔棒对引流线夹和耐张线夹引流板的刚性约束作用下，易导致调距间隔棒与耐张线夹子导线出现高频振动，耐张线夹型号采用“锄头型”的情况下，线夹抗振动抗疲劳等性能较强，高频振动下容易造成调距间隔棒跳线端螺栓松脱，如图 13 所示，降低了线夹断裂的风险。但调距间隔棒跳线端螺栓松脱缺陷不及时处理，在大风作用，跳线极易与均压环及其他导线金具摩擦，增加引流线磨损断裂的风险；在线路周期巡视、特殊巡视发现此类缺陷隐患后，应及时开展消缺工作，尤其大风季节应加强对此类缺陷隐患的排查治理。



图13 调距间隔棒松脱照片

3 治理防范建议

3.1 隐患排查

建议采用“无人机精细化巡视+人工登检”的组合巡检模式开展隐患排查。重点关注中相引流线水平引出采用“手枪型”耐张线夹、调距间隔棒与耐张线夹安装距离小于450 mm、位于风口、大档距的耐张塔，检查引流线夹及耐张线夹引流板有无裂纹；针对水平方向设计夹角为45°的耐张线夹引流板及引流线夹利用停电机会开展出线排查。

3.2 隐患治理

针对导线耐张线夹铝管弯管处断裂隐患，采用行业内常用的补压TY型线夹引流方法来改造或更换断裂耐张线夹^[12]，紧急情况可以用预绞丝引流临时处置。针对引流线夹断裂隐患，重新开断并压接新的引流线夹。

3.3 风险防范

建议建设、设计单位，加强新建输电线路工程质量管控，在技术规范书、可研设计、施工图设计等技术文件中明确相关要求。采用多分裂导线的220 kV及以上输电线路，建议耐张线夹型号全部采用“锄头型”，提高线路高周疲劳损坏的耐受能力。

跳线调距间隔棒与耐张线夹安装距离小于450 mm的点位，建议调整跳线调距间隔棒与耐张线夹之间的安装距离，或将普通跳线调距间隔棒更换为柔性跳线调距间隔棒^[13]，或者用胶套进行包裹。

在设计审查时，要求设计单位提供调距间隔棒的安装要求，明确子导线防护措施及跳线调距间隔棒与耐张线夹之间的安装距离；在验收时，须检查跳线调距间隔棒与耐张线夹之间安装距离是否满足设计要求。

4 结束语

通过本文分析可知，跳线调距间隔棒与耐张线夹安装距离较近，安装在引流线与延长拉杆之间的调距间隔棒对引流线夹和耐张线夹引流板产生了刚性约束，在风力作用下，存在固定跳线调距间隔棒的子导线与耐张线夹子导线出现不同频率、幅度的振动，增加了耐张线夹弯管部位及引流线夹发生断裂的设备风险。遵循“减存量、扼增量”的原则，及时开展在输电线路隐患排查治理，消除存量隐患，有效降低在输电线路耐张线夹断裂风险；同时，严格可研设计、施工图设计评审，加强新设备投产前验收工作，严把设备入网关，确保线路隐患“零增量”。

参考文献

- [1] 董吉谔. 电力金具手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.12.
- [2] 姚贵娇, 高剑凌, 陈作新, 等. ±500 kV 直流线路耐张线夹断裂原因分析[J]. 机电信息, 2018 (12): 120-121.
- [3] 王鹏宇, 白耀鹏, 王元君. 220 kV 线路耐张线夹断裂原因分析及建议[J]. 山西电力, 2019 (3): 69-72.
- [4] 郑松. 220 kV 线路耐张线夹断裂原因分析及建议探究[J]. 电子测试, 2022, 36 (8): 114-115.
- [5] 汤世彬, 赵潇, 杨晓龙. 500 kV 紧凑型杆塔耐张线夹连接板断裂分析[J]. 浙江电力, 2020, 39 (10): 69-73.
- [6] 蔡向晖. 500 kV 紧凑型线路耐张线夹断裂事故分析[J]. 华北电力技术, 2003, 32 (3): 36-38.
- [7] 刘纯, 熊亮, 陈红冬, 等. 500 kV 输电线路耐张线夹钢锚断裂分析[J]. 湖南电力, 2010, 30 (3): 14-16.
- [8] 徐望圣, 孙志林, 谢亿, 等. 500 kV 输电线路耐张线夹钢锚断裂分析[J]. 矿冶工程, 2020, 40 (2): 144-146.
- [9] 黄学能, 张云, 潘龙斌, 等. 500 kV 线路耐张线夹断裂原因分析[J]. 广西电力, 2012, 35 (6): 63-65.
- [10] 胡加瑞, 刘纯, 欧阳克俭, 等. 500 kV 直流输电线路耐张线夹断裂的原因分析[J]. 电力建设, 2012, 33 (7): 82-85.
- [11] 郑准备, 张李锋, 张兵, 等. 输电线路耐张线夹开裂原因分析[J]. 陕西电力, 2010, 38 (12): 35-37.
- [12] 梁伟昕, 吴才亮, 林翔. 紧凑型大档距耐张塔引流板断裂原因分析及快速修复方法研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2017, 7 (22): 91-93.
- [13] 孙忠慧, 金哲, 时伟君, 等. ±500 kV 直流输电线路耐张线夹断裂机理分析研究[J]. 电工技术, 2019 (21): 103-105.

作者简介

张贵军(1992—), 男, 工程师, 研究方向: 输电线路运行及检修、智能电网建设、数字输电建设与研究。

(责任编辑: 张峰亮)

两起继电保护误整定导致误跳闸事故分析

张 祥, 李慧勇

(内蒙古电力(集团)有限责任公司乌兰察布供电分公司,
内蒙古 乌兰察布 012000)

摘要: 继电保护装置的正确动作是保证电力系统安全稳定运行的先决条件, 而保护定值的误整定将会导致保护拒动或者误动。文章对一起误整定导致区外故障发生误跳闸和一起误整定导致负荷波动引发误跳闸案例进行分析, 探讨导致断路器误跳闸的原因, 提出杜绝此类事件再次发生的防范措施。

关键词: 继电保护; 保护误动; 误整定

中图分类号: TM465

Analysis of Two Cases of Relay Protection Missetting Resulting in Mistrisip Accidents

ZHANG Xiang, LI Huiyong

(Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd. Ulanqab Power Supply Branch, Inner Mongolia
Ulanqab 012000, China)

Abstract: The correct operation of the relay protection device is the prerequisite to ensure the safe and stable operation of the power system, and the missetting of the protection setting value will lead to the protection rejection or misoperation. This paper analyzes a case of missetting leading to an out-of-area fault trip and a case of missetting leading to load fluctuation leading to false trip of the circuit breaker, and discusses the causes of false trip of the circuit breaker. Finally put forward the prevention measures to prevent the recurrence of such incidents.

Keywords: relay protection; protection against misoperation; missetting

0 引言

根据相关规程要求, 现场作业应有效防止继电保护“三误”事件的发生, 保护的“三误”事件指的是误碰、误整定以及误接线, 其中误整定是继电保护人员最容易犯的错误, 误整定可能导致最常见的故障便是误动作或者拒动作^[1]。误动作是在实际没有故障的情况下, 保护装置采集到的电气量已达到保护装置的动作值, 进而错误地动作将正常运行的负荷切除, 使得不该跳闸的断路器跳闸, 导致停电或者使故障范围扩大^[2]; 拒动作指的电力系统发生故障时, 保护装置采集到的故障电气量未能达到保护定值, 进而保护装置无法跳开断路器, 导致故障无法及时隔离^[3]。因此继电保护定值的整定必须严谨, 只有严格保证继电保护装置运行定值的正确性, 继电保护装置方能可靠动作^[4]。

收稿日期: 2023-08-03

1 区外故障导致保护误动作案例分析

某 500 kV 变电站一条 220 kV 联络线为了配合对侧保护装置技改工作, 将本线路 A 套保护型号更换为 RCS-931BM, B 套保护型号更换为 PSL-603U, 本次技改工作结束后进行双套线路保护装置定值修改、保护对调及传动工作等。送电后, 次日该线路发生断路器跳闸故障, 保护人员对 220 kV 线路双套线路保护故障波形、故障录波器波形及监控系统开关变位 SOE 等信息进行分析。发现 A 套保护 RCS-931BM 未动作, B 套保护 PSL-603U 线路保护在故障发生 2 ms 时快速距离保护动作, 出口跳 B 相, 662 ms 重合闸动作, 重合于故障, 816 ms 距离加速动作跳开三相。故障类型为 BN, 故障测距为 44.084 km, 故障阻抗为 $2.085 + j8.273 \Omega$, 故障电流为 4.663 A, 零序电流为 1.928 A, 最大差流为 0.000 A。

技术原因分析: 在发生故障后 B 套线路保护

PSL-603U 在 2 ms 时快速距离保护动作，出口跳 B 相，重合闸动作，重合于故障，距离加速动作三跳；A 套保护 RCS-931BMV 分相开关位置重合，重合于故障，距离加速动作三跳。PSL-603U 保护最大差流：0.000 A，RCS-931BMV 保护最大差动电流 0.03 A，双套线路保护均无差流，线路差动保护均未动作，故判断该电流为穿越性电流，故障为区外故障。专业人员对继电保护整定值通知单与现场装置打印定值清单核对，发现 PSL-603U 保护装置定值清单第 46 项“快速距离阻抗定值”整定要求为最小值，而现场保护人员整定为 100 Ω ，未按要求整定。随即保护人员将 PSL-603U 纵联电流差动保护装置自定义定值中“快速距离阻抗定值”项按定值单整定要求（最小值）整定为 0.01 Ω ，现场保护传动无异常，定值核对无误，恢复送电。

2 负荷波动导致保护误动作案例分析

某 110 kV 变电站 110 kV 出线的保护型号是国电南自 PSL-621U，某日发生跳闸，保护人员对线路保护故障波形及监控系统开关变位等信息进行分析。发现 PSL-621U 线路保护装置接地距离Ⅲ段动作、重合闸动作，断路器跳闸，重合成功。经检查发现，该线路保护装置保护动作灯亮、重合闸动作灯亮，液晶屏显示接地距离Ⅲ段动作、重合闸动作，操作箱合闸位置灯亮。

技术原因分析：查看保护装置动作报告，发现南自 PSL-621U 接地距离Ⅲ段动作。同时调取保护装置录波图形，发现在保护动作时，该间隔电压、电流为铁路正常负荷，无明显故障波形。核对保护装置定值后发现，保护装置内接地距离Ⅲ段定值整定为 200 Ω ，时间为 10 s，而定值通知单中显示为接地距离Ⅲ段不投。由于 PSL-621U 保护装置接地距离Ⅲ段定值整定太大，保护动作时线路阻抗约 133.6 Ω ，达到接地距离Ⅲ段保护定值 200 Ω 、未达到接地距离Ⅱ段定值 120 Ω ，故线路正常运行时，系统负荷波动达到保护动作定值，保护装置接地距离Ⅲ段动作，持续时间满足后发生跳闸，经 1 s 延时后重合闸动作，该断路器重合成功。而国电南自 PSL-621U 保护装置仅通过“距离保护Ⅲ段投退”一个控制字来控制接地距离Ⅲ段与相间距离Ⅲ段保护

投退。该线路定值单要求相间距离Ⅲ段保护投入，接地距离Ⅲ段保护不投，定值整定过程中将“距离保护Ⅲ段投退”控制字投入后，接地距离Ⅲ段保护不投，只能通过修改具体定值而实现该保护项目不投，所以应该将接地距离Ⅲ段保护定值改为最小值 0.01 Ω ，不能随意整定为任意值或者默认值。

3 防范措施

在执行定值通知单时，应将各厂家继电保护装置的工作原理熟悉到位，掌握它的动作条件与动作行为，杜绝在定值输入时对定值项产生错误的理解，同时应认真履行一人整定、一人核对的工作流程^[5]。

现场人员在定值核对时应及时发现定值通知单中的错误或者是不合理之处，如过量保护对于不投的保护项，通常整定为最大值；欠量保护对于不投的保护项，通常整定为最小值。只有这样方可保证不投的保护项即使在最不利的情况下，也能将误动作的概率降到最低。

定期开展保护定值专项排查工作，对投运后的其他变电站就类似问题应定期开展继电保护定值执行情况的正确性排查，举一反三，对排查存在问题第一时间整改。

定值通知单下发时应该规范，尤其是针对不投入的保护项，应明确指出具体的数值，不应该出现不投、不用、退出等模糊不清的字眼，这有利于从源头防止现场整定时出错。

参考文献

- [1] 谷国瑞. 误整定引发误跳闸[J]. 农村电工, 2021, 29 (4): 49.
- [2] 肖明伟. 一起由误整定引发的发电机组跳闸事件分析[J]. 山东工业技术, 2020 (4): 121-124.
- [3] 周碎云, 马秀林. 继电保护装置误整定引起的思考[J]. 大众用电, 2017, 32 (12): 28.
- [4] 赖天德. 继电保护装置定值误整定探讨[J]. 电工技术, 2017 (8): 91-92.
- [5] 王飞, 王志祥. 实例探讨继电保护定值误整定及预控措施[J]. 现代工业经济和信息化, 2015, 5 (1): 53-54, 104.

作者简介

张祥 (1989—) 男, 工程师, 从事电力系统继电保护检修及变电站运维工作。

(责任编辑: 张峰亮)

一种变电站智能联合巡检系统

吴俊杰

(国网福建省电力有限公司厦门供电公司, 福建 厦门 361006)

摘要: 通过在变电站配置高清摄像头、机器人、无人机等多类智能巡视设备进行巡视数据采集, 提升变电站智能巡视点位覆盖率、系统贯通性和图像识别率, 构建变电站立体联合巡检体系, 解决传统人工巡视存在的人员不足、巡视效率低、巡检盲区等问题, 提升设备巡视智能化和数字化水平。

关键词: 无人机; 高清视频; 机器人; 智能联合巡检系统

中图分类号: TM763

A intelligent joint inspection system for substation

WU Junjie

(State Grid Xiamen Electric Power Supply Company, Fujian Xiamen, 361006)

Abstract: By configuring high-definition cameras, robots, drones and other types of intelligent inspection equipment in substations for inspection data collection, the coverage of intelligent inspection points in substations, system connectivity and image recognition rate are improved, and a joint inspection system for substations is built to solve the problem. Manual inspections have problems such as insufficient personnel, low inspection efficiency, and blind spots in inspections, etc. The intelligent joint inspection system can improve the intelligent and digital level of equipment inspections.

Keywords: unmanned aerial vehicles; high-definition camera; robot; intelligent joint inspection system

传统的变电站巡检方式为运维人员驱车到目标地之后, 在变电站设备下方巡视通道上用望远镜或红外测温仪实施检测, 巡检费时费力, 智能化、数字化水平较低, 巡检耗时长, 效率低; 且设备区上方常存在巡视“死角、盲区”, 人工巡视也存在故障异常响应速度慢等问题。针对人工巡检的痛点难点, 通过在变电站配置高清视频、机器人、无人机3类智能设备进行数据采集, 构建变电站智能巡检系统, 提升设备巡检智能化和数字化水平^[1]。

1 系统组成

变电站智能联合巡检系统由高清视频、机器人、无人机等前端感知设备和变电站站端智能巡视主机组成, 各变电站立体联合巡检系统统一接入智能巡检管理服务器, 在智能巡检管理服务器中部署远程巡检系统并与PMS系统和智能分析主机实现数据交互, 运维人员可远程下发巡检任务, 灵活调用各变电站前端感知设备实现立体联合巡检^[2]。智能联合巡检系统如图1所示。

收稿日期: 2023-08-22

在变电站联合巡检中高清视频重点对观测目标间隔的中、低处区域设备外观进行巡检, 自动进行开关刀闸位置、表计油位示数识别, 自动判别飘浮物、鸟巢等异物。每个点位的拍照图谱和识别结果可以实时推送上窗, 并对异常识别结果进行告警。

变电站内机器人主要负责对设备区各点位进行红外测温, 同时补充高清视频的盲区并对拍摄效果不佳的表计、油位、设备外观等进行补充拍摄。巡检过程中机器人同样采用可见光和红外双镜头进行巡检, 并对所采集的巡视图片和红外图谱温度进行自动识别。机器人红外成像功能也较为成熟, 巡检过程中红外成像的温宽可以实现自动调节, 画面可自动呈现最高温、最低温和平均温度, 图片传至后台可自动对拍摄部位进行框图并自动读取红外温度。

无人机的角色主要是补充高清视频和机器人的可见光巡视和红外测温盲区, 完成变电站内目标间隔的中高处设备部件自主巡检, 重点包括高处引线接头、绝缘子、门型构架、半高层设备、主变顶部等站内设备和建筑物^[3]。

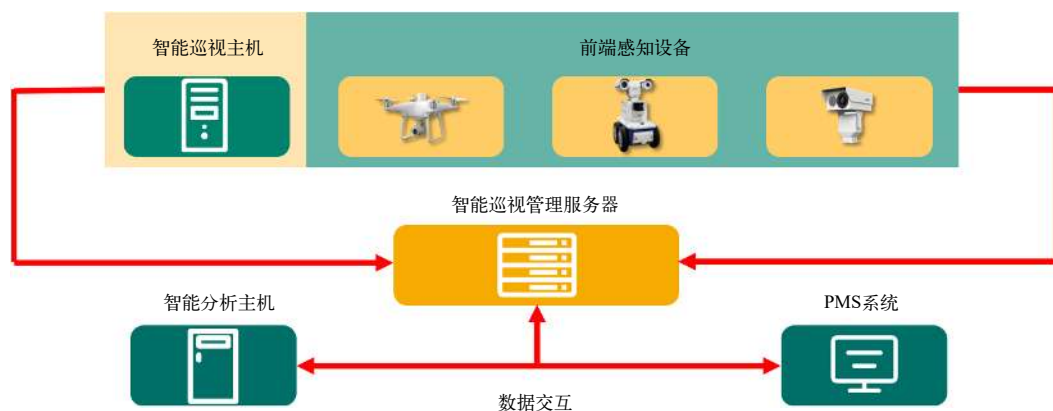


图1 智能联合巡检系统组成

原3类前端感知设备分属3个独立平台管理控制，通过系统资源整合，目前3类远程智能巡视设备均已接入智能巡视管理服务器中部署的远程巡视系统。通过远程巡视系统调用变电站内不同的前端感知设备进行联合巡检，也实现了与PMS系统的双向贯通。巡视过程中可以实时查看3类智能巡视设备各自的巡视进度，每个点位的巡视结果可实时推送上窗，当巡视点位异常时可对异常实时查看，人工进行确认。

2 智能联合巡检策略

为提升智能联合巡检实用化程度，依据国家电网（运检/3）828—2017《国家电网公司变电运维管理规定（试行）》规程规定，结合设备运维实际，将设备巡视需求分为3个类别，具体如下。

设备巡视需求类别Ⅰ类（以下简称Ⅰ类）：即设备异常风险性大、设备巡视需求高的设备。设备Ⅰ类点位列入每次例行巡视，机器巡检失败，应由人工确认（优先通过远程方式确认）。

设备巡视需求类别Ⅱ类（以下简称Ⅱ类）：即设备突发异常可能性低、异常风险性低，可采用差异化巡检周期，但须在特定时段开展专项巡视的设备。设备Ⅱ类点位在技术条件满足的情况下开展专项巡视，不列入例行巡视要求，机器巡检盲区或巡检失败点位，可由下次人工巡视时确认。

设备巡视需求类别Ⅲ类（以下简称Ⅲ类）：即设备异常发展可能性低或具备其他远方评价手段，可采用差异化巡视周期的设备。设备Ⅲ类点位智能巡视不做要求，由人工巡视时确认。

对于Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类巡视点位，变电站内Ⅰ

类巡视点位应满足100%巡视覆盖；Ⅱ类巡视点位也应满足100%巡视覆盖，可结合现场实际情况对部分Ⅱ类巡视点位进行调整；Ⅲ类巡视点位在符合现场实际情况时应满足最大化巡视覆盖。

为满足巡视点位覆盖区要求，智能联合巡检点位设置综合考虑设备类型、巡视类型、现场设备和道路布置方式等因素，满足室内外一次设备、二次设备及辅助设施巡视全覆盖要求，包括设备外观、表计、状态指示、变压器（电抗器）声音、二次屏柜、设备及接头测温、变电站周界、出入口、主控室、蓄电池室、保护室、消防室、电缆层等。

依托智能联合巡检系统配备的3类巡视点位，运维人员可根据不同巡视类别、不同巡视对象合理选择巡视点位，配置智能联合巡检方案，巡检方案包括例行巡视、专项巡视（充油设备巡视、SF₆设备抄表专项巡视等）、特殊巡视（恶劣天气前后特巡、重要间隔保电特巡等）。

变电站各类智能联合巡检方案总体遵循“机巡为主、人巡为辅”的原则，考虑机器巡视各类终端（机器人、无人机、高清视频）特性，如天气适应性、续航能力、配属摄像头功能特性、自身工作稳定性、对运行设备安全影响等。联合巡检系统总体要求为：

恶劣天气减少机器人参与巡视频率，杜绝无人机参与巡视，夜间巡视应尽量减少无人机巡视；

红外测温以机器人巡视为主，无人机为辅；

常规可见光巡视以高清视频为主，无人机、机器人为辅；

主变区域、站内高处架构、一次设备顶端、站内高视角全景巡视等以无人机为主（具体以各电压

等级变电站实际情况而定)；

高清视频、机器人巡视按点位匹配，无人机巡视按完整或部分区域做连贯匹配；

有条件的变电站，应适当考虑重点部分巡视同时匹配一主一备 2 种机巡点位作为互补，互补原则为视频系统>机器人>无人机；

各站须根据实际情况，梳理机巡盲区，并具体明确人工巡视具体补充点位；

为了最大限度地实现机巡，减少人工巡视工作量，人机协同巡视应遵循人工巡视应在机巡任务完成后启动开展的原则，人工巡视内容及点位应包括机巡盲区、机巡异常点位、机巡缺陷及告警复核等。

3 应用成效

3.1 变电站巡视由人工巡视向机器巡检方式改变

运检队伍面临总量缺员和结构性缺员并存的严峻形势，人员老龄化严重，设备规模持续增长与巡检人员相对不足之间的矛盾日益突出；传统人工巡检作业受地形条件、环境因素、人员素质等多方面因素制约，存在巡检效率低、巡视范围不全面等问题。通过变电站智能联合巡检替代目前人工例行巡视、特殊巡视，改变以人工巡检为主的电网运检模式，这样运维人员可将更多精力投入到现场安全管控、精益运维、分析诊断等全业务核心班组建设工作中，也缓解了设备规模持续增长与巡检人员相对不足之间的矛盾。

3.2 提升变电站巡视效率

传统的变电站巡视流程为运维人员驱车到达变电站后在变电站设备下方巡视通道上利用人眼、望远镜或红外测温仪实施检测，巡视结束后回到主站进行巡视记录登记、缺陷填报，实现巡视流程闭环。整个巡视流程复杂、耗时长，利用变电站智能联合巡检，不仅可节约人员来回路程，还能同时调用多个高清摄像头、机器人和无人机对不同设备同时开展巡视，巡视效率得到显著提升。从 2022 年 9 月开始，厦门供电公司利用变电站立体联合巡检进行变电站例行巡视，统计表明，220 kV 变电站的巡视时间由原来人工巡视 123 min 下降到 43 min，节省时间 80 min；110 kV 变电站的巡视时间由原来人工巡视 72 min 下降到 27 min，节省时间 45 min。

3.3 避免人工巡检盲区

人工巡检时人员主要在巡视通道上对设备进行检测，受限于检测距离、角度等因素，人工巡检时对于部分设备部件常存在“死角、盲区”，特别是变电站上方主变附属平台、半高层设备、龙门架悬式绝缘子等高处设备。变电站立体联合巡检可调用无人机针对人工、机器人等地面巡视手段无法检测清楚的点位检测，立体联合巡检还能针对地面巡视薄弱点开展避雷针、绝缘子、半高层等站内高处设备顶部周期性巡视和红外测温等。

3.4 打破系统壁垒，实现巡视全流程数据贯通

高清摄像头、机器人、无人机 3 类智能巡视设备原先都有各自的一套巡检系统，PMS 系统与高清摄像头、机器人、无人机这 3 类智能巡视系统存在技术壁垒，系统之间各自为战，巡检效率低。变电站智能联合巡检系统引入智能巡视管理服务器作为数据中转站，实现与 PMS 系统的双向数据贯通，3 类智能巡视通过局域网交换机接入远程智能巡视主机。智能联合巡检体系实现 PMS 系统、辅控系统、机器人系统、无人机系统多系统横向数据贯通，具备变电站智能巡视任务全流程闭环管控能力，如图 2 所示。

3.5 构建图像样本库，提升图像识别率

原变电站图像智能识别率较低，通过搭建图像分析服务器收集各变电站巡视可见光和红外测温图谱，构建图像样本库，不断迭代智能识别算法，提高设备缺陷等识别精度和研判水平，提升智能识别准确率。对于变电站内油位、SF₆表计等识别率低的点位可配置多机型同时巡检进行非同源冗余识别。目前，变电站内巡检设备整体的图像识别率由原来的 50% 提升至 80% 以上，鸟窝、飘浮物、外观损坏、渗漏油等设备外观缺陷识别准确率 90% 以上，如图 3 所示。

3.6 提升变电站设备巡视覆盖率

原变电站智能巡视系统通常只采用高清摄像头进行巡检，受高清摄像头安装数量、位置的影响，变电站内 I 类点位及部分重要的 II 类无法智能巡检全覆盖。为提升变电站内智能巡检覆盖面，智能联合巡检配置高清摄像头、机器人和无人机 3 类智能巡视设备，通过可见光和红外 2 类传感器，对变电站 I 类及部分 II 类重要巡视点位能实现非同源冗余

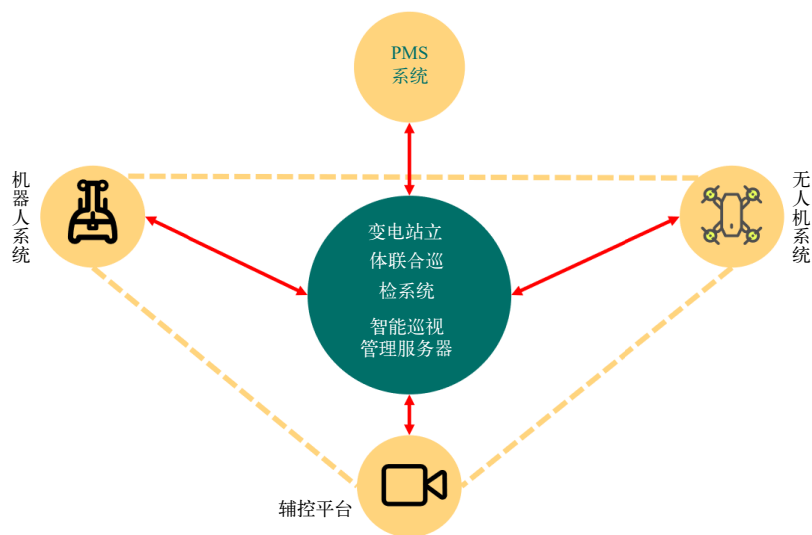


图2 巡视全流程数据贯通



图3 系统提升点位覆盖率

巡视进行多角度覆盖，提升巡视点位识别精准度。目前厦门供电公司立体联合巡视系统均能实现 I 类 100% 覆盖，II 类点位 80% 覆盖。运维人员可根据站内高清摄像头、机器人、无人机的不同拍摄特点，明确各系统的巡检优势和巡检盲区，建立变电站设备巡视点位表。在有重叠的巡视区域，则按照高清摄像头、机器人、无人机的优先顺序配置点位，形成高效、智能的巡检方案。

4 结束语

变电站智能联合巡检是未来变电站的发展方向，利用变电站智能联合巡检系统开展巡视，能大大缩短巡检时间，提高巡检效率，减少人工成本，提高现场工作安全性、供电可靠性，切实保证现场工作

安全可靠，提升供电服务质量和公司形象，具有良好的社会效益。

参考文献

- [1] 张秀斌, 彭鹏, 温定筠, 等. 基于联合巡检的超高压变电站设备精益化管理模式探索[J]. 电气技术, 2017, 2 (9): 135-139.
- [2] 张春晓, 陆志浩, 刘相财. 智慧变电站联合巡检技术及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (9): 158-164.
- [3] 刘琳, 仇俊, 侯颖, 等. 无人机在变电站智能巡视中的应用[J]. 上海电气技术, 2023, 16 (2): 5-8.

作者简介

吴俊杰 (1990—), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向: 变电运维管理提升、变电站远程智能巡视。

(责任编辑: 袁航)

智能电能表的应用与维护探讨

马 野

(国网吉林省电力有限公司长春市九台区供电公司, 吉林 长春 130500)

摘要: 在分析智能电能表结构原理的基础上, 以某地区为例, 从工业用户、居民用户、反窃电方面深入探讨了智能电能表在该地区的具体应用情况, 并结合多年工作实践及经验, 提出了智能电能表的运行维护策略。

关键词: 智能电能表; 用电数据; 用电质量

中图分类号: TM764

Discussion on the Application and Maintenance of Intelligent Energy Meters

MA Ye

(State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd. Changchun Jiutai Power Supply Company, Jilin Changchun 130500, China)

Abstract: Based on the analysis of the structural principles of smart energy meters, this article takes a certain region as an example to deeply explore the specific application of smart energy meters in this region from the perspectives of industrial users, individual users, and anti theft electricity. Based on years of work practice and experience, a strategy for the operation and maintenance of intelligent energy meters has been proposed.

Keywords: intelligent energy meter; power data; power quality

1 智能电能表结构原理

智能电能表系统主要由以下部分组成: 电流采集电路, 用于采集被测电流的信号; 电压采集电路, 用于采集被测电压的信号; 计量芯片, 用于测算电流和电压所采集的信号, 从而获得使用者的有功功率、无功功率、功率因数、谐波畸变等数据信息; 电源, 为智能电能表提供电源; 主控电路, 负责收集、处理和分析计量芯片的数据; 显示电路, 将已知数据实时反馈给使用者, 包括整个软件运行状况、用户信息和故障信息; 时钟电路, 用于保障整个系统的运行, 确保数据的准确性和同步性; 存储器, 用于存储系统中的重要数据, 以便后续数据查阅; 脉冲输出信号, 用于校准电能表数据; 通信电路, 是传送数据的渠道, 实现远程数据采集和传输。

这些部分协同工作, 使智能电能表能够准确测量电流和电压, 并提供丰富的电能数据信息。智能电能表通过采集和处理这些数据, 实现对电能使用情况的监测和管理, 为能源消费者提供更加智能和高效的用电服务^[1]。

2 智能电能表的应用分析

2.1 在工业用户中的应用

对某地区近几年工业用户智能电能表普及率进

收稿日期: 2023-09-05

行调查, 具体数据如图 1 所示。

由图 1 可知, 该地区 2012 年工业用户智能电能表的普及率为 83%, 2014 年上升至 85%, 2016 年为 88%, 2018 年为 91%, 2020 年为 96%, 2022 年普及率达到了 100%, 实现了全面覆盖。

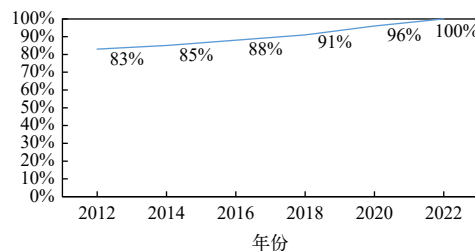


图1 2012—2022 年某地区工业用户智能电能表普及率

在工业领域中, 智能电能表的应用较为成熟并领先于其他行业。工业用电量且配电系统复杂, 在应用智能电能表时有以下几个特点:

提高新能源用电。当下, 我国大力推广屋顶光伏, 这类发电系统往往会配备相应的智能电能表, 对于工业用户而言, 供电部门一般会在配电柜中配置智能电能表, 通过电能表获取用户的用电情况, 从而有效分析用户用电需求, 能够和新能源系统有效联接, 及时调节用户的新能源用电需求。

优化分布式能源。供电部门实时收集用户用电数据, 分析用户用电情况, 从而采取科学合理、安

全适用的供电方案。

增强电力负荷预测能力。随着智能电能表普及率的提升，供电部门能够通过智能电能表获取用户的用电去向，及时汇总整理用电预计量，提高预测的准确度，从而有效应对高峰期的用电量，及时调整用电负荷。

提高故障处理水平。智能电能表能够实现数据实时更新，及时发现用电故障和异常情况，将相关信息传输至供电部门，有助于运维人员进行故障分析；因此，当出现故障时，智能电能表实时数据显示有助于提升处理故障的水平。

实现智能化管理。通过智能电能表采集用户实时用电数据，以此为基础监测用电设备的状况和能耗情况，更加详细地获取电力负荷情况，为编制用电计划提供最优方案，实现自动实施、跟踪、监测和评估用电情况，实现智能化、科学化管理^[2]。

2.2 在居民用户中的应用

对某地区近几年的居民用户智能电能表普及率进行调查，具体数据如图2所示。

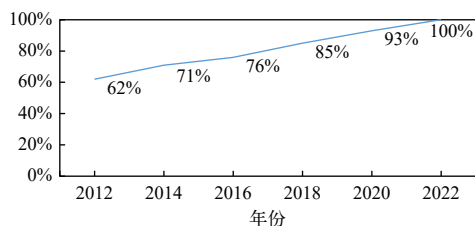


图2 2012—2022年某地区个体用户智能电能表普及率

由图2可知，该地区2012年居民用户智能电能表的普及率为62%，2014年上升至71%，2016年为76%，2018年为85%，2020年为93%，2022年的普及率达到了100%，实现了全面覆盖。

居民用户有着用电少、电路简单的特点，更为重视电费费率、峰谷电显示和查看电费等功能。以2022年数据为例，某一地区已经实现智能电能表全覆盖应用，大大提高了抄表数据正确率和效率，主要有下面几个特征：

智能化用户管理。智能电能表对数据的反馈是实时的，供电部门能够准确掌握用电量，实现用户用电信息的高效反馈。利用反馈信息分析用户的用电需求，获取用户主要用电模型，分析电力损耗和电费情况，设计符合用户需求的用电方案。智能电能表也能够帮助用户了解个人用电情况，从而改善

自身用电习惯^[3]。

重视用户用电质量。对居民用户用电数据进行实时监测，有助于智能电能表在出现故障时的实时分析处理，了解具体故障内容，将有关数据传送给主机。在发生紧急故障时，智能电能表可以通过切断电源的方式降低故障损失，并将不同等级的告警信息发送给主机。

建立健全智能家居。随着技术的发展和进步，智能电能表有助于促进电力双向沟通。在智能家居中，双向通信是电器设备共享数据和信息的基础，能够有效监测家居设备的信息和数据，通过数据监测和负荷管理，提高电能使用效果。

2.3 在反窃电方面的应用

对比其他的防窃电方式，智能电能表有着高准确度、宽频带、低能耗和高性能的特征，有着极为明显的优势，成为当前主流的防窃电方式。智能电能表存储、传输和监测数据都具备防窃电功能，这有助于分析过去运行数据和事件记录情况^[4]。

停电记录分析。大多数窃电用户都是通过断开电表闸，利用表计前端直接用电，这种窃电方式往往造成表计不计量，无法及时被用电系统收集和查看到用电信息，使得后台不能及时分析用电情况，反窃电有着较大难度。面对这种问题，智能电能表的近期停电记录数据是重要参考，能够分析出窃电时间。

开表盖记录分析。表计的开盖记录往往会在出厂前被清除，一般情况下，配送、安装和运行阶段都不会将表计开盖；因此，如果出现了开盖情况，大概率是因为设备被拆开过，导致出现计量不准的情况，存在窃电嫌疑。利用智能电能表历史数据，对近期开盖记录进行分析，若出现表计安装后有开盖的情况，则应及时校对验证设备。

记录数据分析。在运行过程中，表计出现的断相、失压、开盖和电流不均等异常情况都会被记成事件，这些异常情况一旦清除，就会形成记录痕迹。所谓需量清零和电量清零，就是表计在清零过程中形成的过程记录；而编程记录则是记录设置表计中有关数据的。这些记录主要包括操作前后数据信息，有操作前表计电量和需量数据，也有操作时的相关数据，还有操作时间和代码等信息。这些操作往往在表计出厂前完成，如果出厂后发现表计中有相关记录，则有窃电嫌疑。

电流分析。大部分单相智能电能表具备中性线电流记录功能，单相表计中的相线电流相当于中性线电流，如果发现非中性线电流，可认定为用电异常或疑似窃电。正常情况下，表计中性线电流和相线电流是相等的，如果二者不等则存在异常。

电量异常分析。智能电能表能够读取正向和反向电量数据，具备双向计量能力。一般用户只能消耗电量，电能表记录其正向电量，除非出现进出线接反问题才能产生反向电量；因此，如果出现人为更改进出线情况，则可认定为疑似窃电。可读取智能电能表记录的近 10 日冻结正反向电量数据，通过不同时间的用电量对比，分析进出线是否接反。

智能电能表在反窃电过程中的应用非常广泛，为了深入分析其应用情况，笔者通过某一地区的窃电用户数据，分析其窃电过程中的电气接线和表计监测到的数据情况，可从图 3 可知，该用户主要是利用切断中性线，从其他设备中获得中性线，而将相线接入耗电设备来窃取电量。

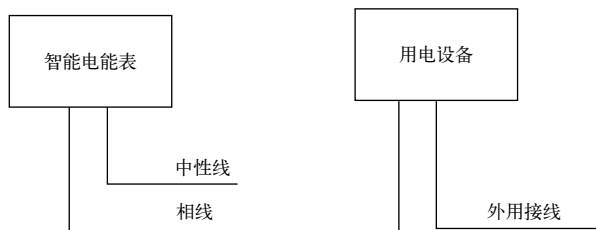


图3 中性线方式窃电

从图 4 中可看到 12 h 内这一用户电能表数据，其中中性线电流数据和相线电流数据非常清晰。从 10:00 开始，出现中性线数据和相线数据不相等的情况，意味着从这一时间开始有疑似窃电行为，须专业人员到现场进行查看。

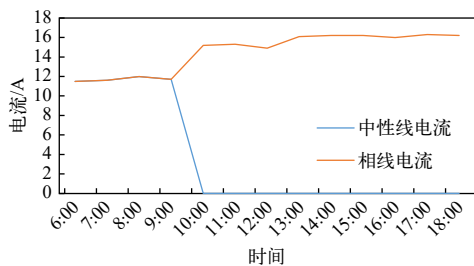


图4 中性线电流与相线电流数据监测情况

3 智能电能表的运行维护

对供电公司来说，智能电能表关系到营销、客

服、电费和计量等多个部门运作，需要各部门之间相互配合，明确任务，这样才能保障智能电能表的正常运行。此外，电能表的维护也需要多部门通力合作，重视跨部门的工作分工和协作是保障其正常运行的重点。

3.1 建立实时高效的信息传递平台

在智能电能表的维护中，建立健全信息管理制度是非常关键的，这就需要供电单位做好部门协调和分工，及时将部门信息资源整理汇总到信息管理平台，方便运维人员收集基础信息，为维护工作作参考。须将涉及到电能表维护全部环节的部门纳入到平台中，及时反馈平台相关数据。另外，做好信息联网也是非常关键的，将计量中心相关数据联网到智能平台，有助于及时反馈故障情况和信息。

3.2 加强专业人才管理及储备

重视专业队伍建设和培养，通过定期考核、技能培训等方式强化工作人员的技术水平，为维护设备运行提供坚强的人才力量。相比传统的电能表，智能电能表有着更为复杂的维护管理要求，其范围广、难度大、涉及内容多，对人员的专业性有着更高要求。为了做好人才管理和培训，管理单位须做好人员的日常管理，定期开展技能培训，定时考核技能水平，真实掌握当前技术人员的技能情况，为后续可能出现的问题和不足做好基础准备工作。

3.3 实施标准化作业

完善工作内容，强化安全监督，切实增强智能电能表工作质量和效能。此外，强化企业管理，提高应急处置能力，避免突发情况导致的风险和危害，真正保障企业用电安全，维护企业利益。

参考文献

- [1] 蒋成永. 智能电能表的应用与维护管理[J]. 农电管理, 2022 (12): 34-35.
- [2] 王金磊, 徐晨光, 郭亚辉, 等. 关于智能电能表在计量管理中的应用与运行维护分析[J]. 建筑工程技术与设计, 2019 (2): 2780.
- [3] 林潮雄, 林跃明. “e取电”智能用电系统的研发与应用[J]. 农村电工, 2021, 29 (10): 31-32.
- [4] 张一彦, 张珂. 智能电能表质量数据采集与质量监控技术研究[J]. 电气技术与经济, 2023 (4): 76-79.

作者简介

马野 (1987—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 智能电能表应用、用电信息采集系统等。

(责任编辑: 袁航)

变电站一键顺控改造技术的研究与应用

胡 杨

(国网浙江省电力有限公司杭州市余杭区供电公司, 浙江 杭州 311100)

摘要: 随着电力系统智能化的发展, 一键顺控在变电站倒闸操作中的作用越来越大; 但由于智能变电站技术仍处于发展阶段且还存在大量常规变电站未进行智能化改造, 当前使用顺控技术的变电站较少, 实际运行管理经验比较缺乏。文章介绍了变电站顺控改造方案与验收环节, 为今后变电站顺控改造、建设的优化提供借鉴。

关键词: 一键顺控; 变电站; 顺控技术; 改造验收

中图分类号: TM766

Research and Application of One Key Sequential Control Transformation Technology in Substation

HU Yang

(State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Hangzhou Yuhang district power supply company, Zhejiang Hangzhou 311100, China)

Abstract: With the development of intelligent power systems, one click sequential control has become increasingly practical in substation switching operations. However, due to the fact that intelligent substation technology is still in the development stage and there are still a large number of conventional substations that have not undergone intelligent transformation. Currently, there are few substations using sequential control technology, and there is a lack of practical operation and management experience. This article studies and introduces the substation sequence control renovation plan and acceptance process, providing reference for the optimization of substation sequence control renovation and construction in the future.

Keywords: one click sequential control; substation; sequential control technology; renovation acceptance

一键顺控是指用电网调控主站端应用自动控制、状态自动识别和智能判断技术, 一键顺控系统引入视频联动系统, 实现断路器和隔离开关的视频联动控制, 将传统人工倒闸操作模式转变为操作票自动生成、操作步骤一键启动、防误主站系统校核、设备状态自动判别、操作过程顺序执行的自动模式。在操作过程中, 系统按设备倒闸操作规则自动生成顺控操作票, 能够高效准确地实现变电站电气设备的分合闸操作, 极大地提高倒闸操作的效率和安全, 减少电气作业事故的发生, 这是变电站倒闸操作的一种全新模式^[1-3]。

现阶段智能变电站在投产时已同步配备一键顺控操作系统, 但还存在大量常规变电站须进行一键顺控改造, 本文以浙江 110 kV 某变电站为例, 探讨一键顺控改造方案和验收方案, 为今后变电站顺控改造、建设的优化提供方法和思路。

收稿日期: 2023-09-28

1 变电站一键顺控改造方案

1.1 改造目标

110 kV 某变为户内 GIS 智能变电站, 110 kV 部分均为 GIS 结构, 采用内桥接线方式, 10 kV 采用单母四分段接线。50 MV·A 主变压器 2 台, 110 kV 出线 2 回, 10 kV 出线 36 回。一键顺控改造工作结合站内停电工作进行, 涉及 110 kV 母线及出线, 共有 14 只隔离开关列入状态“双确认”改造项目。

1.2 改造内容

1.2.1 实现监控主机一键顺控

110 kV 某变电站为户内 GIS 智能变电站, 投产时已具备程序化操作功能, 为满足一键顺控实施要求, 须对变电站监控系统开展一键顺控功能升级改造。

1.2.2 实现防误“双校核”

110 kV 某变电站投产时, 配置内嵌在监控主机

的“五防”系统，不满足监控主机内置防误逻辑与智能防误主机防误逻辑双校核要求，须新上独立智能“五防”主机。

1.2.3 实现隔离开关双确认功能

对在运变电站加装一键顺控时，原则上应尽量减少对现有机构和连杆进行改动。本次一键顺控改造中，隔离开关位置均通过视频图像识别实现双确认功能，监控视频安装在各间隔开关、隔离开关机械指示位置的周边，如智能组件柜、光缆转接箱、电流采集箱等位置，实时传送隔离开关机械位置图片，利用图像识别技术实现一次设备位置的判别。

2 改造方式与技术路线

2.1 一键顺控视频双确认系统架构

变电站一键顺控视频双确认机制主要由摄像机、硬盘录像机、站端视频主机、智能分析主机等组成。站端视频主机部署视频浏览、操作联动、录像等模块，智能分析主机提供隔离开关分合闸智能分析算法。摄像机采集隔离开关位置信息后，上送至智能分析主机，分析主机将视频采集信息分析后输出数字信号，通过反向隔离与后台主机通信，为一键顺控隔离开关位置确认提供判据。后台机完成一键顺控操作后，将操作信息通过正向隔离装置发送至分析主机，实现操作设备视频画面联动。系统架构如图1所示。

2.1.1 开关双确认技术

变电站开关位置双确认技术方案采用“遥信位

置+遥测数据”判据。遥信位置为主判据：采用开关的合位、分位双位置辅助接点。遥测数据为辅助判据：采用三相电流遥测量，电流取自本间隔TA；采用三相电压遥测量，电压取自本间隔线路TV。

2.1.2 视频联动双确认

变电站110 kV母线及出线间隔隔离开关双确认的实现方式是采用视频联动双确认。视频图像识别实现双确认功能，监控视频安装在各间隔开关、隔离开关机械指示位置的周边，如智能组件柜、光缆转接箱、电流采集箱等位置，实时采集一次设备机械位置图片，利用图像识别技术实现一次设备位置的判别，同时兼顾设备监视及设备巡视^[4]。

视频摄像机类型有3种，分别是固定枪机、T型云台和微型摄像机。其中T型云台可以通过摄像头的远程遥控移动，监控多个设备。视频监控摄像头网线接到主控室的视频交换机，把监控图片传送到巡视主机进行图像识别。

2.2 隔离开关位置监控视频的安装

隔离开关位置双确认须监控的主要设备分布在110 kV场地设备区域。110 kV场地设备区域15个监控点，实现对站内设备隔离开关和接地隔离开关机械位置的监控。每个监控点对应具体的视频摄像头的布置如表1所示。进线一、进线二、110 kV母分间隔GIS筒体左侧各设置1个云台监控点。

3 一键顺控验收方案

一键顺控验收监控摄像头安装情况，应满足防

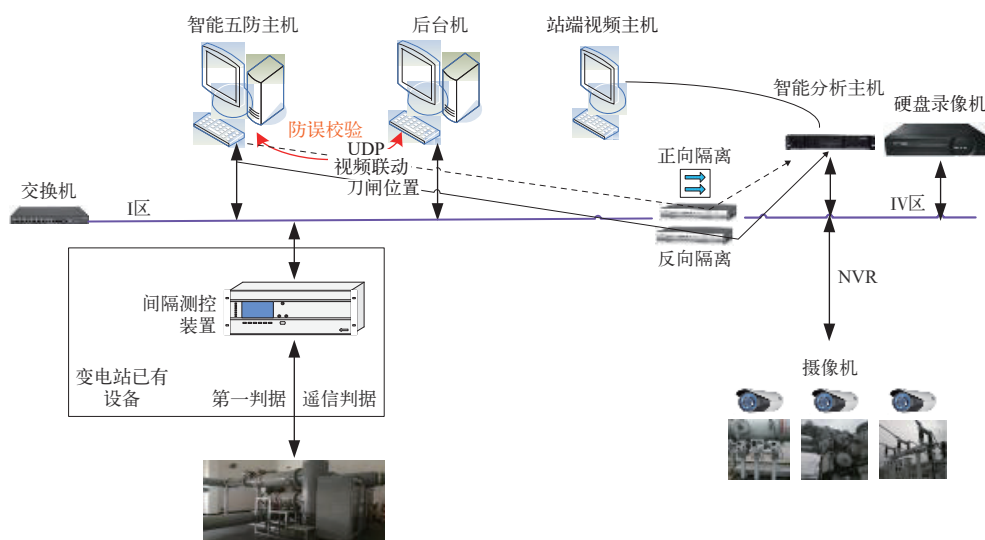


图1 一键顺控视频双确认系统架构

表1 视频摄像头布置

序号	变电站名称	间隔	微型摄像机安装位置	监控视频个数
1	110 kV变电站	进线一	母线隔离开关、开关母线侧接地隔离开关机械位置指示处	3
2	110 kV变电站	进线二	母线隔离开关、开关母线侧接地隔离开关机械位置指示处	3
3	110 kV变电站	110 kV I段母线压变	110 kV I段母线压变隔离开关 110 kV I段母线压变接地隔离开关 110 kV I段母线接地隔离开关机械位置指示处	3
4	110 kV变电站	110 kV II段母线压变	110 kV II段母线接地隔离开关机械位置指示处	2
5	110 kV变电站	110 kV母分开关	110 kV母分 II段母线隔离开关 110 kV母分 II段母线接地隔离开关、110 kV母分 I段母线 隔离开关、110 kV母分 I段母线接地隔离开关机械位置指 示处	4

水、防潮要求,云台移动可靠、性能稳定、信号传输稳定,能够承受正常操作产生的振动要求,且监控摄像头的安装和使用全过程不会对一次设备产生影响,先通过操作隔离开关变位,验收巡视主机的隔离开关机械位置图像;然后执行该间隔一键顺控操作任务,验收巡视主机的图像识别能力,核对监控后台、智能“五防”机点位。

3.1 视频摄像头验收

对视频摄像头采集图像的清晰度、信号稳定性、摄像头转动灵活度进行验收。验收摄像头采集视频和视频联动的能力。

3.2 云台控制验收

对云台的上、下、左、右等方向控制,对镜头的变倍、调焦、光圈控制功能进行验收,应满足支持预置位的设置、调用、删除和修改。

3.3 视频识别隔离开关位置验收

验收智能分析装置对隔离开关位置信息图像分析的准确性。图像识别结果应包括分闸位置、合闸位置、分合闸异常及分析失败等,分合闸异常故障漏报率 $< 0.1\%$ 。

3.4 监控系统防误逻辑验收

监控系统防误逻辑验收时,先解除与智能防误主机的防误校验,按经过审核通过的防误逻辑表在监控主机上进行模拟操作,验证监控系统防误逻辑正确性、完整性。包括验证全站与测控装置联闭锁一致性(站控层)、测控装置联闭锁正确性(间隔层)^[5]。

3.5 智能防误主机防误逻辑验收

智能防误主机逻辑验收,通过模拟开票操作是

否通过,验证智能防误主机内置逻辑的正确性、完整性。

3.6 一键顺控功能验收

一键顺控功能验收主要包括操作票库验收、操作任务验收、模拟预演验收、指令执行验收、监控主机与智能防误主机信息交互功能验收、操作记录验收、性能验收、安全性验收、稳定性验收等。

4 结束语

一键顺控作为变电运维“两个替代”中的重要一环,具有变电设备操作方式历史变革性意义。通过设备改造升级,将大量烦琐的人工倒闸操作步骤固化到专用计算机上,自动、精准地完成倒闸操作,并同步完成位置校验,确保操作到位,减少电气作业事故的发生。

参考文献

- [1] 雷海涛,史兆江.基于变电站“一键顺控”技术的研究及应用[J].电网与清洁能源,2021,37(8):62-67.
- [2] 吴雨.智能电网防误操作系统研究[J].电气应用,2020,39(4):10-14.
- [3] 张洪波,李秋燕.220 kV智能变电站仿真培训系统的研究与开发[J].电气应用,2012,31(23):30-33,52.
- [4] 朱炳铨,王松,黄晓明,等.支持一键式顺控的智能操作票生成和管理系统[J].华东电力,2011,39(5):837-841.
- [5] 范堃,房萍,王申强.一键顺控智能化拟票技术研究与應用[J].电网与清洁能源,2019,35(10):43-49.

作者简介

胡杨(1989—),女,硕士研究生,工程师,主要工作方向:电力系统及其自动化。

(责任编辑:袁航)

配置馈线自动化的配网故障监控方案研究

晓 宇

(国网江苏南京供电公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 南京供电公司正在大力推行配网馈线自动化 (FA) 功能配置, 在缩短故障处理时间、提高供电可靠性的同时, 也给电网监控工作带来新的考验。针对当前实际工作情况, 对配置 FA 功能的配网故障发生后的变电站开关动作情况及信号进行分析, 进一步提出相关事故汇报及信号监控的改进方法, 提高监控工作的准确性。

关键词: 馈线自动化; 配网; 电网监控

中图分类号: TM732

Research on the Power System Monitoring Scheme for the Distribution Network Fault Applied with Feeder Automation

XIAO Yu

(State Grid Nanjing Power Supply Company, Jiangsu Nanjing 210000, China)

Abstract: Nanjing Power Supply Company is actively promoting distribution network feeder automation (FA) technology configuration, which not only shortens fault handling time and improves power supply reliability, but also brings new challenges to power system monitoring work. According to the actual work situation, this paper analyzes the substation switch action information and signals when the distribution network applied with FA fails, and further proposes improvement methods of the fault reporting and signal monitoring to improve the accuracy of power system monitoring work.

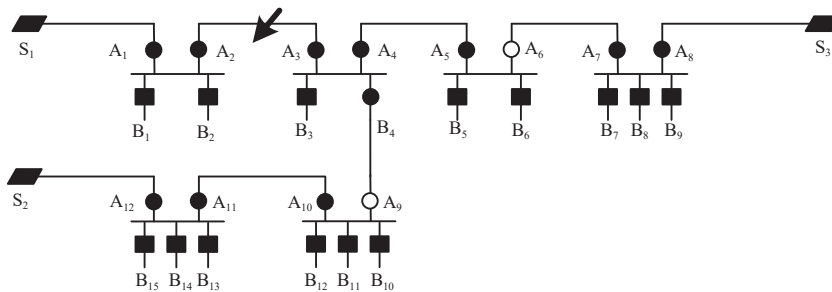
Keywords: feeder automation; distribution network; power system monitoring

随着电力需求的快速增长, 对配网的安全可靠供电要求也越来越高, FA 能够实现配电线路故障定位、故障隔离和非故障区域自动恢复以及故障信息的分析, 极大地缩短非故障区域的停电时间, 是提高供电可靠性, 保障供电安全的重要手段^[1]。

本文分析故障时 FA 动作原理, 对配置 FA 功能的配网在故障发生后的变电站开关动作情况及信号进行分析, 结合监控事件化系统, 提出相关事故事件生成方案, 改进事故汇报及信号监控方法, 提高监控汇报、分析准确性。

1 FA 基本原理

FA 指的是利用自动化装置或系统, 监视配网线路或馈线的运行状况, 及时发现线路故障, 迅速诊断出故障区域并将其隔离, 并快速恢复对非故障区域的供电^[2]。目前南京供电公司配网 FA 采用集中控制方式, 依托通信网络收集各终端信息于主站, 结合网络拓扑确定故障范围, 再由 FA 通过主站下发遥控指令实现故障隔离并恢复非故障区域的供电, 原理如图 1 所示。



收稿日期: 2023-08-17

图1 配置 FA 功能的配网故障示意图

图1中S₁、S₂、S₃为变电站开关，其余为配网开关，开关黑色实心为合位，白色空心为分位。变电站开关保护投跳闸，配网联络开关保护不投跳闸。当故障发生在图中所示区域，保护及分合闸信息包括：S₁保护动作，S₁分闸；A₁保护动作；A₂保护动作。根据动作信号，可判定A₂~A₃区域故障，主站下达指令断开A₂、A₃隔离故障区域，合上A₉或者A₆恢复下游供电，合上S₁恢复上游供电。

2 传统配网故障时的监控方法

配网线路故障跳闸分为以下：重合成功（开关分-合，重合闸动作）、重合不成功（开关分-合-分，重合闸动作，后加速动作）、重合闸未投（开关分，重合闸为未充电状态）、重合闸未动作（开关分，重合闸为充电状态但没有动作信息）。重合闸未动作情况极少发生，本文不做讨论。调度重点关注的是重合不成功和重合闸未投的跳闸情况，此时开关处于分位，可能存在负荷损失，须立即处理^[3]。

按照原有监控方法，配网线路出现故障跳闸，首先根据D5000系统推送的信号判别故障时间、范围、类别以及保护动作情况；其次与事件化系统生成的跳闸事件进行比对，对人工研判的正确性进行进一步验证，最后向调度汇报并通知运维。以上流程要严格把控时间节点，按照公司规定，向调度首次汇报的时间距故障发生时间不能超过5 min。

3 配置FA功能的配网故障信号案例

当配网发生故障，变电站开关保护动作出口跳闸，当其最后的状态是分闸时，意味着配网一侧的电源失去^[4]。当线路配有FA功能时，如果FA成功将故障隔离，则FA会通过主站下达指令合上变电站开关，恢复上游供电。此情况以甲变农贸143开关为例，其故障跳闸动作信号如表1所示。

表1中农贸143开关故障跳闸重合不成功，第二次分闸的时间是17:29:21，而FA通过主站将143开关合上发生在17:32:47，间隔3 min 26 s。这种过程时长不一，往往在监控员汇报后，调度员着手事故处理时发现开关已经合上，影响监控汇报正确性，干扰调度工作。若监控员持续关注FA有没有将跳闸开关合上，又会影响到对其他异常信号的监视。

表1 甲变农贸143开关故障跳闸信号表

时间	信号名称	状态
17:29:20	甲变农贸143线保护零序I段出口	动作
17:29:20	甲变农贸143线保护出口	动作
17:29:20	甲变农贸143线保护零序I段出口	复归
17:29:20	甲变农贸143线保护出口	复归
17:29:20	甲变/10 kV农贸143	分闸
17:29:20	甲变全站事故总	动作
17:29:20	甲变10 kV事故总	动作
17:29:20	甲变农贸143开关间隔事故总	动作
17:29:21	甲变农贸143线重合闸出口	动作
17:29:21	甲变农贸143线重合闸出口	复归
17:29:21	甲变农贸143线重合闸未充电	动作
17:29:21	甲变/10 kV农贸143	合闸
17:29:21	甲变全站事故总	复归
17:29:21	甲变10 kV事故总	复归
17:29:21	甲变农贸143开关间隔事故总	复归
17:29:21	甲变农贸143开关弹簧未储能	动作
17:29:21	甲变农贸143线后加速出口	动作
17:29:21	甲变农贸143线保护出口	动作
17:29:21	甲变农贸143线后加速出口	复归
17:29:21	甲变农贸143线保护出口	复归
17:29:21	甲变/10 kV农贸143	分闸
17:29:21	甲变全站事故总	动作
17:29:21	甲变10 kV事故总	动作
17:29:21	甲变农贸143开关间隔事故总	动作
17:29:23	甲变农贸143开关弹簧未储能	复归
17:29:31	甲变全站事故总	复归
17:29:31	甲变10 kV事故总	复归
17:32:47	甲变/10 kV农贸143	合闸（停电）
17:32:47	甲变农贸143开关间隔事故总	复归
17:32:47	甲变农贸143开关弹簧未储能	动作
17:32:48	甲变农贸143开关弹簧未储能	复归
17:33:01	甲变农贸143线重合闸未充电	复归

4 监控方法改进

目前事件化系统已深度融合监控工作，相比 D5000 系统告警窗中仅按时间排序的信号，事件化系统生成的事件按变电站、间隔、发生时段归类排序，该系统依靠相应规则，将繁杂的信号归纳、整合，生成对应事件，精简浏览条数，极大地提高了监控员工作效能。同时生成的故障跳闸事件能够以短信形式推送至供服、监控、配电、运维等相关部门班组。

4.1 短信推送改进

针对变电站开关故障跳闸推送短信，加注是否配置 FA 功能，如图 2 所示。

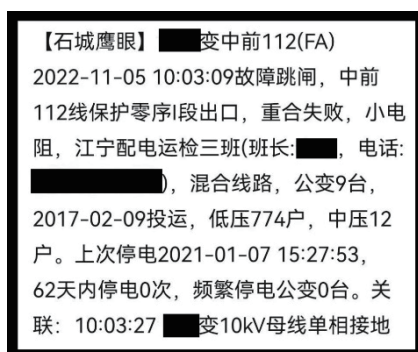


图2 变电站开关故障跳闸推送短信加注是否配置 FA 功能

通常此时 FA 还处于判断故障区间，尚未下达指令是否再合上已跳闸的变电站开关，短信加上 FA 标识后可以提醒相关班组此故障线路配置 FA 功能，变电站开关存在再一次合上的可能性，能够让各方信息更透明、对等，有利于各方更好把控事故处理。

4.2 事件化规则改进

针对 FA 合闸事件特征，制定相应事件化规则如表 2 所示。

事件由特征组成，特征由对象组成，对象来自报文信息和实时数据。表 2~3 所示中 FA 遥控预置报文与 FA 遥控执行报文组合生成开关遥控合闸 (FA 执行) 特征，断路器位置报文与断路器位置实时数据组合生成开关合闸特征，开关遥控合闸 (FA 执行) 与开关合闸特征组合生成 FA 合闸成功事件。

应用事件化系统对配置 FA 功能的跳闸线路进行智能研判，能够生成 FA 合闸事件并推送至事件

表2 FA 合闸事件规则

事件名称	事件规则表达式		
	序号	特征名称	
FA 合闸成功	@1&@2	@1	开关遥控合闸 (FA 执行)
		@2	开关合闸

表3 FA 合闸特征规则

特征名称	特征规则表达式		
	序号	对象	
开关遥控合闸 (FA 执行)	@1=1&@2=1	@1	FA 遥控预置
		@2	FA 遥控执行
		序号	对象
开关合闸	@1=1&@2=1	@1	断路器位置 (取自告警报文)
		@2	断路器位置 (取自实时库)

化窗口，不干扰监控员在 D5000 系统监视其他事故及异常信号，及时提醒监控员故障开关状态变更，避免人工反复调阅跳闸间隔，影响监控效能^[5]。

5 结束语

本文根据工作实例分析了配置 FA 功能的配网故障发生后的变电站开关动作情况及信号，结合事件化系统，对跳闸短信推送和事件化规则进行改进，进一步优化监控方法，能够提高监控工作的准确性和效能。

参考文献

- [1] 艾绍伟, 燕刚, 潘良煜. FA 馈线自动化典型故障处理分析[J]. 电工技术, 2019 (8): 73-74, 77.
- [2] 刘玉林. 浅谈几种馈线自动化技术的应用[J]. 电力设备管理, 2021 (3): 190-192.
- [3] 张卫星, 马翔. 基于多级开关同时跳闸条件下的集中式馈线自动化故障定位分析与判断[J]. 电工技术, 2021 (23): 55-56.
- [4] 李生珠. 浅析分布式馈线自动化的应用[J]. 自动化应用, 2021 (6): 116-118, 121.
- [5] 刘明祥, 蔡月明, 封士永, 等. 一种智能分布式 FA 与主站集中式 FA 协同方法[P]. 江苏省 CN107069964B, 2019-08-23.

作者简介

晓宇 (1993—), 女, 工程师, 硕士研究生, 从事电网运行监控工作。

(责任编辑: 袁航)

谈智能电力调度自动化系统

黄泗兴

(湖南郴电国际发展股份有限公司, 湖南 郴州 423000)

摘要: 随着科技的发展, 电力系统已从自动化走向无人化和智能化。相比20多年前的“三遥”, 电力调度已经过“五遥”进入了智能化阶段, 然而, 对于一个区(县)调度来说, 电力调度的可靠性还有很大的提升空间。文章针对调度系统的3大部分, 阐述智能化电力调度系统的要求, 分析了智能化电力调度发展的方向, 为设计人员和维护人员提供参考。

关键词: 智能化; 调度自动化; 通信网络

中图分类号: TM734

On Intelligent Power Dispatching Automation System

HUANG Sixing

(Hunan Chendian International Development Co., Ltd., Hunan Chenzhou 423000, China)

Abstract: With the development of technology, the power system has transitioned from automation to unmanned and intelligent. Compared to the "three remote" power dispatch more than 20 years ago, the requirements are much higher, and it has already entered intelligent mode after the "five remote". However, for a district (county) dispatch, the reliability of power dispatch still needs to be greatly improved. This article elaborates on the requirements of intelligent power dispatch systems from multiple perspectives from the components of the dispatch system, It points out the direction of intelligent power dispatch development and provides reference for designers and maintenance personnel.

Keywords: intelligentize; dispatching automation; communication network

电力调度系统主要由3部分构成: 厂站端、通信网络和主站端。目前, 电力调度系统已进入智能化阶段。结合湖南郴电国际汝城分公司调度存在的问题, 针对无人变电站下电力调度自动化系统应具备的功能和发展的方向, 按系统构成的3个部分予以阐述。

1 厂站端

目前, 汝城分公司17座变电站均是综合自动化变电站, 其中12座已实现无人值守。所有的操作由监控中心和维操队完成。现从通信机(远动机)、电源、环境温度和信息采集等方面进行分析。

1.1 通信机

数据通道: 17个变电站采用了国电南自、南瑞继保、国电南瑞、深圳南瑞、许继、优特等6个自动化厂家的设备, 有的站采用单通信机(有些称远动机), 有的站采用双通信机; 双通信机有的是主备, 也有的是双机; 汝城分公司调度已实现双通道数据^[1](即独立通信通道)(如图1改造后), 大

收稿日期: 2023-05-09; 修回日期: 2023-10-23

大地提升了调度数据采集的可靠性。

系统对时: 站端远动机通过与GPS对时, 远动机再与站端设备对时。汝城分公司全部站远动机与调度主站前置机通信均采用IEC104规约, 但均未实现全网对时。因站端设备通信协议不一致, 从调度主站直接下令各站端设备对时的难度非常大, 建议远动机软件中在接收主站命令时, 完善IEC104规约对时功能, 增加检测是否对时命令, 如果是则计算延时差, 修正后修改远动机的时间, 远动机再与站端其他设备定时对时, 从而实现全网对时。

1.2 电源

站端调度设备电源主要是指远动机、视频、通信等设备及其相关设备的电源。通信电源是电力通信系统中的“心脏”, 须能记录站端保护设备全部记录; 所以, 通信电源的可靠性是电力系统中要求最高的, 使用独立的双电源是提升调度通信可靠性的基本要求^[2]。

目前, 汝城分公司除少部分站通信设备配备独立双电源外, 大部分站都没有独立电源, 有的还是共用后台UPS(或逆变器)的电源; 按规程要求,

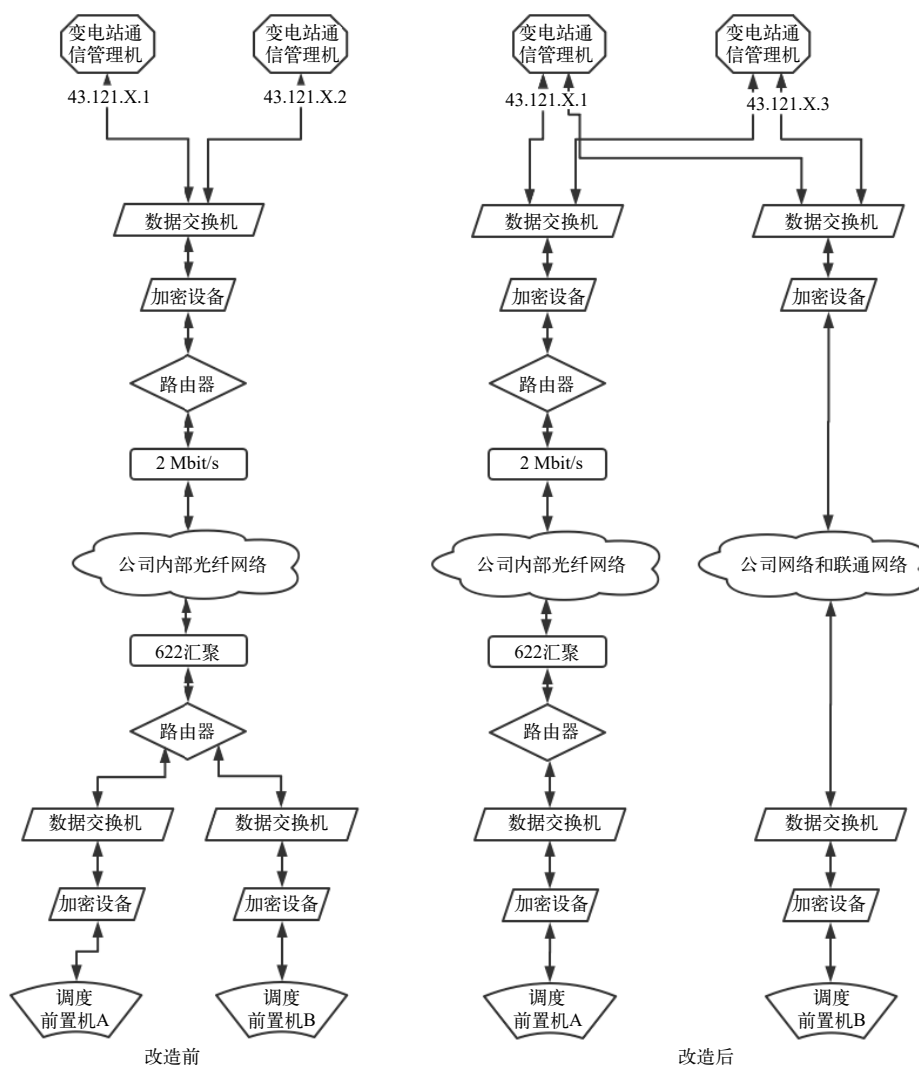


图1 汝城分公司调度通信通道改造前后对比

厂用电的保护一般只设短路保护和过负荷保护^[3]，而汝城分公司的变电站低压侧增加了过压保护，因电力网络系统电压与厂用电电压不匹配时，过压保护动作导致厂用电消失；因此经常因厂用电消失（包括全站失压）过久后，直流系统电池欠压而导致视频、通信等设备中断，调度数据中断。

视频设备在施工过程中未按标准施工，故障率比较高，为了不影响后台监视设备，建议独立使用UPS（或逆变器）。

1.3 环境温湿度

站端设备在运行中会产生大量的热量，需要温度 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $40\%\sim 60\%$ 的环境^[4]，虽然站端均会配置普通空调，但经常会因厂用电等原因关闭，导致环境温度升高，其他设备因没有温度监

测和报警，而SDH设备则可以通过管网软件发现温度过高报警。

为了确保环境温湿度稳定，建议采用远程和智能控制系统（动环系统）；对于没有实施动环系统的变电站，可在控制室、保护室和高压室等场所配置1个网关、1个万能遥控和1个温湿度监测仪，实现环境温度自动和远程控制。

1.4 智能采集

变电站除了通过SCADA系统采集实时数据外，还须采集SCADA相关的电度信息、故障录波信息、环境温湿度信息和消防火灾信息等；对于无人值守的变电站，调度除采集开关、设备的遥信、遥测信息外^[6]，还须采集厂用电、直流系统、消防等信息，让调度运行人员及时收到站端报警信息。

2 通信网络

数据传输设备。电力企业目前主要以华为和中兴等通信企业巨头的设备为主，利用 STM-1 或 STM-4 光口将不同通信企业的设备互联互通。

通信通道。电力系统通信组网方式很多，有环形也有星形，受高压线路通道的限制，更多的是混合形，有部分站只形成了单通道独立通信网络，此时可租用电信部门通道，形成互补双独立通道，既减少投资又可提升通信可靠性。汝城分公司有 5 个变电站属单通信通道，租用联通 2 Mbit/s 以太网，形成双通信通道。为了方便管理及维护，电力调度远动数据建议采用双以太网加密传输，逐步淘汰 2 Mbit/s 业务（国家电网采用双 2 Mbit/s 传输，是因为 PCM 也需要 2 Mbit/s 板，而当今的软交换电话传输可通过 SDH 音频板和以太网板代替，PCM 在电力企业将逐步淘汰）。

对于水电站或发电厂，有条件的可租用电信部门（如联通）以太网通道，也可以采用“云加密通信机”与调度主站前置机连接。

网络通道设备配置中，在条件许可的情况下可增设路由器，若不设路由器则子网掩码须配置为 255.0.0.0，通道安全在加密设备上设置^[5]。图 1 为汝城分公司通信通道改造前、后对比图。

云加密通信机。对于偏远的小水电站，还可以采用“云加密通信机”，利用专用通信设备，采取云加密方式，复用互联网底层协议，通过网络直接把数据送往主站前置机，大大降低运营成本。

3 主站端

电力调度主站是整个电网主要控制的核心部分，它是保障电力系统安全、稳定、经济运行的重要组成部分，也是电力企业的“心脏”。

3.1 主站结构

主站一般采用 AB 双网^[1]，见图 2。汝城分公司与郴电国际其他 4 个分公司共用一套调度系统，通过光纤网络和加密设备组成光纤局域网，历史服务器和 SCADA 服务器放在总部机房，前置机和工作站部署在分公司机房，因光缆通道原因，分公司网络与总部网络偶尔断网，工作站无法进行遥控操作。建议每个区（县）调度主站独立，通过转发服务器（或工作站）与总部连接，各分公司调度网络和总部调度网络独立，确保网络安全，同时也能减少因与总部通信的故障而影响各分公司的遥控操作，提高各分公司调度网络的可靠性。

3.2 主站拓展

调度主站数据网通过转发服务器、加密设备、路由器和防火墙等设备分别与上级调度网、营销内网、视频专网、MIS 信息服务器和移动调度服务器有机联合起来（见图 3），实现以下功能：与上级调度数据互联互通；转发电能信息至营销网络，降低企业营销成本；实现站端保护与视频联动，为调度员智能切换可视现场；通过小电流接地选线、故障录波等设备，通过专用软件计算，与电子地图信息系统相结合，实现故障快速定位，并利用 MIS 系统，公告停电范围；通过移动调度服务器，为调度

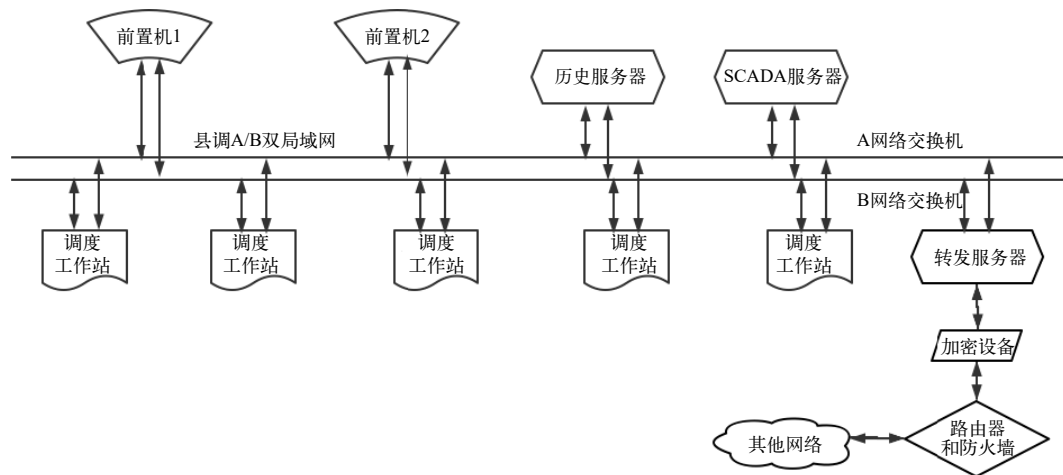


图2 主站网络结构图

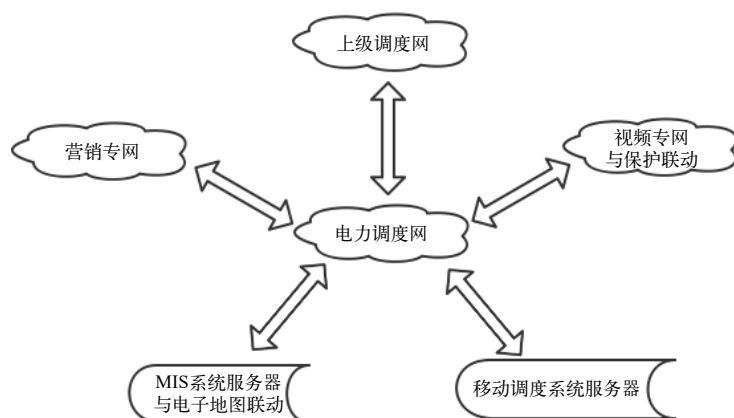


图3 网络拓展图

远程指挥者提供实时故障处理数据信息。

3.3 主要功能

主站系统应具备以下基本功能：可视化实时监控与控制（SCADA）、数据存储与管理、数据分析与预测、调度决策与优化、故障诊断与恢复、安全管理与风险预警和调度员模拟培训（DTS）等。

3.4 智能及辅助功能

故障快速定位：通过小电流接地选线^[6]，结合故障录波和保护测距等，快速计算故障点位置，并通过电子地图信息系统，标注故障可能存在的范围^[3]。

电子地图信息系统：实现对高低压线路和台区等信息参数管理，结合调度自动化实时显示电力网络状态、供用电状态和故障范围，显示故障和事故处理人员工作位置。

移动指挥系统：故障和事故处理人员佩戴智能安全帽，通过电子地图信息系统，实时显示人员工作位置和离故障或事故点的距离等信息，为安全、快速处理事故和故障奠定基础。

动环及消防火灾监控系统：是一种用于监测和管理服务器机房设备和环境的系统。它通过安装各种传感器和监测设备，实时监测、收集机房内的温度、湿度、电力负载、烟雾、水浸、火焰等关键参数，传送至远程服务器进行集中管理，提高机房、控制室等场所的安全性、稳定性和运维效率。

3.5 智能调节及监测

通过设定或监测节点电压或线路负荷，特别是近年来由于新能源的快速发展，对电力网络的影响比较大，系统可根据设置的参数要求对可控设备进行智能投切和实时提醒调度运行人员进行人工调节

（AGC/EDC），优化负荷分配，提高电力网络可靠性和电能质量。

4 结束语

智能化电力调度系统实现了电力系统的智能化、自动化和经济运行，整个系统安全、可靠、拓展灵活。整篇文章根据相关规范以及在各自动化厂家的技术支持下，通过对汝城分公司调度部分网络结构的调整，实现了独立双数据通道，大大地提升了调度自动化的可靠性。文章中的内容为电力调度自动化维护人员传授了经验，为设计人员提供了实践经验，为区（县）电力调度系统的建设及发展指明了方向。

参考文献

- [1] 电力规划设计总院. 电力系统调度自动化设计技术规程:DL/T 5003—2005[S].
- [2] 中国南方电网有限责任公司, 广东电网公司, 海南电网公司. 南方电网通信电源技术规范: Q/CSG 1203011—2016[S].
- [3] 国家电网有限公司. 35~750 kV 变电站站用电设计规范: Q/GDW 11126—2021[S]. 2021.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电工电子产品自然环境条件温度和湿度:GBT 47981—2005[S].
- [5] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 无人值守变电站监控系统技术规范:GB/T 37546—2019[S].
- [6] 黄泗兴. 巧改 SCADA 系统实现接地选线 [J]. 农村电气化, 2010(9): 25, 18.

作者简介

黄泗兴 (1971—), 男, 本科, 工程师, 从事电力系统调度自动化、电力通信自动化和软件开发工作。

(责任编辑: 耿立宏)

基于深度学习的线损异常诊断系统研究

张恒超¹, 沈秋英¹, 沈杰¹, 李苏芙^{2*}, 范彪², 王琨², 蔡嘉辉², 吕自贵³

(1. 国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司, 江苏 苏州 215004; 2. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 3. 江苏集萃智能制造技术研究所有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 为了降低台区线损、加快台区线损治理的数字化、智能化转型, 应当对供电过程中可能出现的线损异常进行及时监测并诊断。本文研究了基于深度学习的线损异常诊断技术, 从用电采集系统中获取海量的电力运行数据, 通过算法构建窃电分析模型。基于该模型, 对台区关口计量装置故障、窃电、用户计量装置异常、户变关系异常等问题进行诊断。该系统可以减少台区线损异常分析的时间, 提高台区线损分析的准确率及效率, 是实现低压台区线损管理智能化的重要举措。

关键词: 线损异常诊断; DenseNet; 深度学习; 窃电检测; 治理系统

中图分类号: TP183

Research on Line Loss Abnormal Diagnosis System Based on Deep Learning

ZHANG Hengchao¹, SHEN Qiuying¹, SHEN Jie¹, LI Sufu^{2*}, FAN Biao², WANG Kun², CAI Jiahui², LYU Zigui³

(1. Suzhou Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215004, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Jiangsu Wuxi 214122, China; 3. Institute of Intelligent Manufacturing Technology JITRI, Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to cope with the possible problem of line loss, this paper studies the diagnosis system of line loss abnormality based on deep learning and applies it to line loss management. Obtain massive line loss-related power consumption data from the power consumption collection system of the State Grid Power Supply Company. Conduct in-depth mining of the data through deep learning methods, and build a reliable power theft detection model. Based on the model, Diagnose the main transformer failure in the station area, suspected meter, suspected household transformer problem, etc. This system can reduce the time cost of line loss abnormal situation analysis, improve the efficiency of power management and management. It is an important measure to realize the intelligent management of power grid enterprises.

Keywords: line loss abnormal diagnosis; DenseNet; experience knowledge; electricity theft detection; governance system

0 引言

引发线损异常的因素复杂多变, 高效迅捷的分析、定位并解决线损异常的技术难度大, 不能妥善处理则会降低台区运行的经济性和稳定性^[1-2]。现有的用电检查技术主要采用人工辅以部分设备作业的现场检测方式, 但往往成本高效率低, 准确率难以保证, 开发一种高效、精准的窃电侦测技术对提升电网的稳定性与安全性起着重要的促进作用。

台区线损异常处理方法有: 系统诊断、人工研判、现场排查、采集排查、窃电及违约用电排查和常态运行监控。众多研究人员对台区线损异常处理进行了研究, 施文^[3]等人探究了台区线损的形成原

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (51505190)

收稿日期: 2023-08-27

因, 提出了具体问题的解决方法, 然而在对如何进行闭环线损治理上并未提出见解。邢毓卿^[4]等人通过专家系统建立台区线损诊断模型, 实现了对台区线损的异常原因的分析, 但在线损异常诊断模型的准确性上还可以有进一步提升。

其中, 窃电作为线损异常的重要因素, 给电力行业造成了巨大损失^[5]。在美国, 每年因电力盗窃造成的损失数以亿计。传统的窃电检测方法成本过高, 为解决这个困境, 亟须研究一种迅速、精确的窃电检测方法。近年来, 深度学习作为实现人工智能的关键技术在多个领域中迅猛发展。本文依托海量的电力数据, 提出了基于 DenseNet 算法的检测模型。台区线损异常包括关口计量装置故障、窃电、用户计量装置异常、户变关系异常等问题, 采用经验知识的方法进行判断^[6-7]。

所开发的系统软件包含用电采集失败查询模块、任意或连续日期线损台区查询模块、窃电检测模块、计量系统诊断模块、户变关系错误诊断模块。从数据分析、线损异常诊断、闭环管理方面，实现全方位的线损诊断与管控。

1 系统功能结构设计

本系统以 C#和 python 作为主要的开发语言。经了解，电网业务人员和客户端多选用 Windows 系统作为操作系统，而 WinForm 框架能够为开发者提供多元美观的窗体控件，开发效率高且操作简单，且开发界面可以达到良好的可视化效果。据此，本文的系统开发将在 Windows 窗体的基础上，使用框架 WinForm，利用 C#编程语言完成。以国家电网某供电公司所提供的线损相关历史用电数据为数据来源，按照电力行业的现行标准和规范，实现供电公司要求的功能，设计开发出的线损异常诊断系统的功能结构图如图 1 所示，由台区线损异常诊断模块和闭环管理模块两个模块组成。

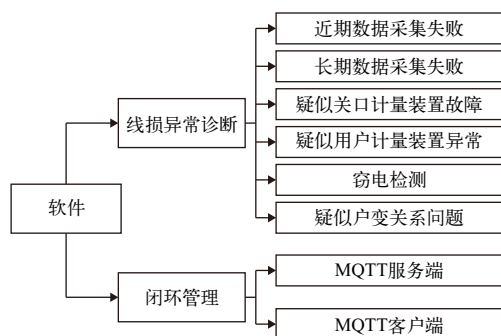


图1 功能结构图

线损异常台区查询模块由统计线损率考核阈值设置、单日线损异常台区查询以及多日线损异常台区查询 3 个部分组成。该模块的实现是基于目前收集到的台区线损与电力历史数据，在设定好并将上述数据经过相应的逻辑算法运算后，搜索并筛选出单日或多日内的台区线损异常信息，将这些台区线损异常信息加以存储。

闭环管理模块的主要功能是将诊断出的线损异常状况通过电脑客户端或者手机 App 及时发送给检修人员，以提升电力维修工作的效率。

2 基于深度学习的窃电检测模型训练与应用

为了弥补当前常见窃电诊断方式的不足，首先

在用户用电数据的基础上分析用户的用电行为，提出一种基于 DenseNet-RF 的窃电检测算法，利用供电企业提供的大量电力数据进行模型训练，将训练得到的模型与常见的用户窃电模型作比较，验证提出的窃电检测模型预测是否准确，并对除此之外的导致线损异常的原因与其相对应的线损异常情况进行分析，得到其它不同的线损异常原因，提出相应的线损异常检测方法，最终形成完整的线损异常诊断流程。

2.1 数据预处理

在电网业务场景中，很难获得学术上的标准数据集。从国家电网某供电公司收集到用电窃电数据正反样本数量比约为 10 : 1，以用户每 15 min 的采集频率记录用电量情况作为数据来源。数据集包含台区用户每日用电量、合同容量以及作为标签的用户状态。将正类 1 作为窃电用户，负类 0 作为正常用户。大量的客户用电数据，为本文研究窃电检测提供了可靠的数据保障。

不平衡的数据集会引发过拟合的问题，导致预测结果向样本占比大的类别偏移，使得模型的泛化能力弱化。为解决这个问题，首先采用文献提出的样本生成方法生成更多的窃电数据，同时采用 SMOTE 算法平衡数据集当中的正常用电样本数量和疑似窃电样本数量。

此外，为加快网络收敛，对用电数据作归一化处理。

$$e_{r(0,1)} = \frac{e_r - \min(e)}{\max(e) - \min(e)} \quad (1)$$

式中： $\max(e)$ 、 $\min(e)$ 分别为样本最大值和最小值； e_r 为总体样本里某一值。

通过数据预处理得到同等数量的正常样本和窃电样本共 10 000 个。每次训练时，随机抽取其中的 8 000 个样本数据为训练集，其中的 2 000 个样本数据为测试集。

2.2 DenseNet 算法

DenseNet 是由黄高博士等设计的一种网络结构，由 Dense Block 和 Transition Layer 两个单元组成。其中，Dense Block 的各层与之后的各层密集连接，2 个 Dense Block 之间通过 Transition Layer 连接^[8]，设 Dense Block 中有 i 层特征图，第 i 层的输出记作 X_i ，第 i 层的非线性映射记作 H_i ，Dense Block 中包含的密集连接数目为 $i \times (i + 1) / 2$ ，

$$X_i = H([X_{i-1}, X_{i-2}, \dots, X_1, X_0]) \quad (2)$$

式中： $X_i = H([X_{i-1}, X_{i-2}, \dots, X_1, X_0])$ 为将第 0 层至第 i 层的输出根据通道数作合并级联， $H()$ 得到图层经过批量标准化 (batch normalization, BN)、激活函数 (rectified linear unit, RELU)、卷积操作 (convolution, Conv) 等操作以后的输出。通过合并级联可以把卷积操作得到的特征数据合并，在进行训练时提高初始特征，进而提升图层使用率和模型分析的精度。层与层间通过 Concatenation 连接，Dense Block 结构如图 2 所示。

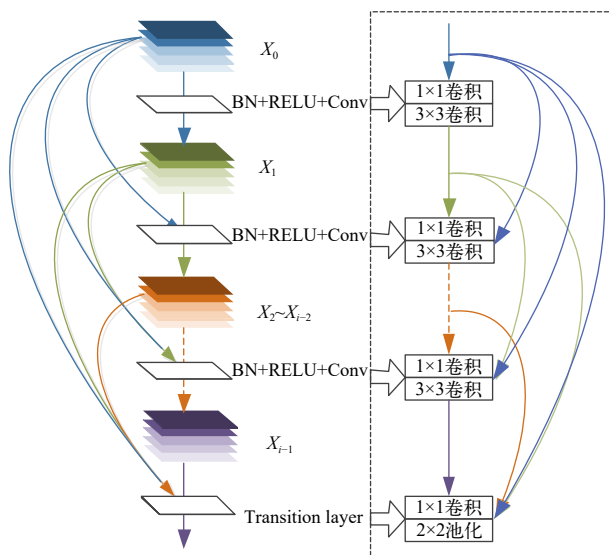


图2 Dense Block 示意图

2.3 基于 DenseNet 的窃电检测模型训练流程

窃电检测模型训练基本流程为：首先通过 DenseNet 网络，从智能电测指示仪表数据集中获取到用户的电能特性，接着再利用 RF 算法使用所获得的特性参数训练分类器，然后通过网格搜索算法对特性参数进行优选，由此实现了对随机森林分类器的最优预测选择，进而找出疑似窃电行为。模型的输入为实际用户用电数据，而输出则为疑似窃电用户。模型训练流程图如图 3 所示，其中带训练网络的配置信息如表 1 所示，其中 k 代表特征图层的的增长速率。

窃电检测模型训练的具体实现流程如下。

数据预处理：利用 SMOTE 算法，保证得到同样数量的正常样本和窃电样本，共计 12 096 个。对全部样本数据作了归一化处理，随机抽取其中的 10 000 个数据样本为训练集，抽取其中的 2 096 个

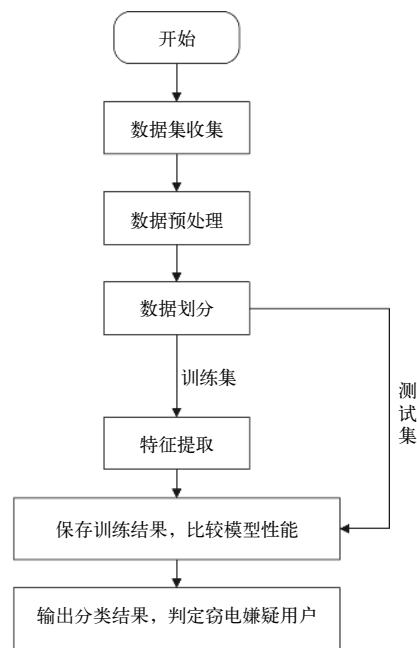


图3 模型训练流程图

表1 DenseNet 及 CNN 网络参数配置信息表

Layers	DenseNet-121 ($k=12$)	CNN
Convolution	3×3 conv, stride 2	5×5 conv, stride 2 3×3 conv, stride 2 3×3 conv, stride 2
Pooling	2×2 conv, stride 2	
Dense Block (1)		
Transition Layer (1)	1×1 conv	
	2×2 average pool, stride 2	
Dense Block (2)		
Transition Layer (2)	1×1 conv	—
	2×2 average pool, stride 2	
Dense Block (3)		
Transition Layer (3)	1×1 conv	
	2×2 average pool, stride 2	
Dense Block (4)		
Classification Layer	7×7 global average pool fully-connected, Softmax	

数据样本为测试集。所有用户电力能耗矩阵的维数均为 534×48 。

配置网络模型：分别通过 RF、XGBoost (extreme gradient boosting) 和梯度提升树 (gradient boosting

decision tree, GBDT) 等机器学习算法来训练用户窃电检测模型, 根据表 1 中的配置参数训练 WNet、自定义 CNN、DenseNet 等用户窃电检测模型。

训练过程: 利用矩阵变换, 让用户电力能耗矩阵适应于各种算法的特征输入, 包括训练机器学习模型时调用 scikit-learn 中的算法函数, 通过网格搜索算法确定最佳参数, 最终输出相应的模型; 自定义 CNN 的训练过程中首先将矩阵增维至 $1 \times 534 \times 48$, 接着再进行网络构建, 最终通过全连接层完成分类, 将分类结果通过向量的归一化分析后在 Softmax 层输出具体类别。分别构建 DenseNet-121、DenseNet-169 和 DenseNet-201 ($k=32$) 三种网络, 为更好地适应 DenseNet 网络的输入尺寸, 需要先把输入的用户电力能耗矩阵维数变换为 $1 \times 178 \times 144$, 在构建模型前应当先做一次卷积操作以提取图层特征, 做一次池化操作对图层尺寸进行压缩, 接着按照表 1 中的配置参数构造 Dense Block 和 Transition Layer 两个部分。其中, Dense Block 的作用主要是促进信息的特征重用, 在 Transition Layer 中, 1×1 卷积层的作用主要是降低矩阵维数, 2×2 平均池化层的作用主要是压缩图层尺寸, 以减少网络参数, 经过池化操作以后, 在全连接层中对图层信息完成分类, 接着再在 Softmax 层中做向量归一化, 最后输出特定类别。每个算法函数将生成 k 个特征图, k 为输入层通道数。在这一步中, 更改不同超参数 k , 以比较不同 DenseNet 模型的优劣。

存储训练结果, 选择最优模型: 向训练得到的各模型中输入事先准备好的测试集并得到训练结果, 比较不同模型生成的分类结果以及测试集标注的真实标签是否对应, 以此评判该模型的优劣, 选择最优的 DenseNet 模型。

融合模型: 在上一步模型训练中, 得到最优 DenseNet 以后, 修改优化模型参数, 接着利用随机森林算法对图层特征进行二次训练, 最终获得 DenseNet-RF 模型。

诊断疑似窃电用户: 从输出的分类结果中, 能够判断用户是否存在窃电嫌疑。其中, 窃电检测模型以智能电表指示仪表数据为输入, 以疑似窃电用户为输出。

2.4 模型训练与分类准确率比较

为验证 DenseNet 模型的可靠性, 使用数据集对

窃电检测模型开展了分析。测试设备配置为 Windows 10, CPU 为 AMD Ryzen 5 1400, 显卡为 RTX 2070, 总内存 8 GB; 采用 tensorflow 深度学习框架和 scikit-learn 机器学习框架进行研究。DenseNet 和 CNN 模型通过多轮训练获得, 其训练过程如图 4(a)(b)(c) 所示。另外本文还比较了其他常用的机器学习算法, 包括支持向量机 (SVM), 随机森林 (Random Forest, RF), 梯度增强决策树 (GBDT) 和逻辑回归 (LR), 其训练结果能够通过调用 scikit-learn 的库函数读出, 训练结果表 2 所示。

根据以上结果, 可得结论如下: 在时间成本方面, 相较于普通 CNN 算法, DenseNet-121 网络模型的迭代次数最少, 模型收敛也更快, 相应的模型训练所需时间更少; 在模型准确度方面, DenseNet-121 网络模型相较于普通 CNN、RF、GBDT、LR 和 SVM 等机器学习算法在测试集中分类准确率明显更高, 在测试集中准确率达到 95.18%, 由此可见 DenseNet 模型用于检测用户是否存在窃电行为表现出良好的准确性。

2.5 模型的部署与应用

将通过 tensorflow 训练好的模型以 H5 格式保存, 利用 flask 部署模型, 可以在系统软件中调用该模型进行预测。模型部署应用流程图如图 5 所示。

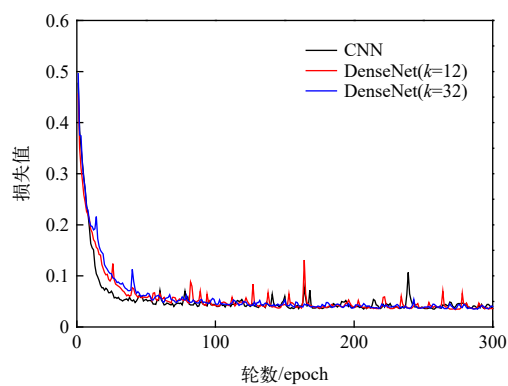
3 基于经验知识的台区线损异常原因诊断

台区线损异常原因包括用电采集失败、计量系统问题、窃电、户变关系错误等, 在本系统中采用不同的模块来实现各类功能。

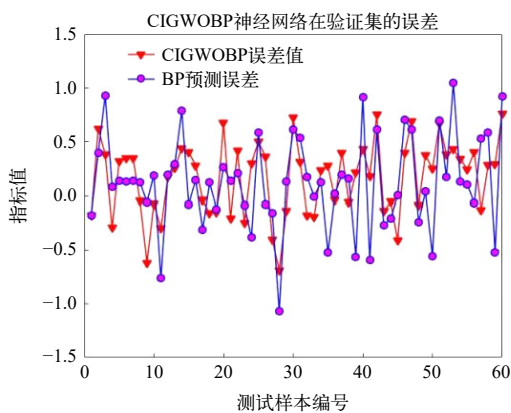
3.1 用电采集失败查询模块

该模块包括近期、长期采集失败查询与任意或连续日期线损异常台区查询。近期、长期采集失败查询是根据线损率、用户参与率以及可参照线损率来进行逻辑判断。如图 6 所示为近期、长期采集失败查询的具体判断流程, a 表示线损率阈值下限, b 表示线损率阈值上限。

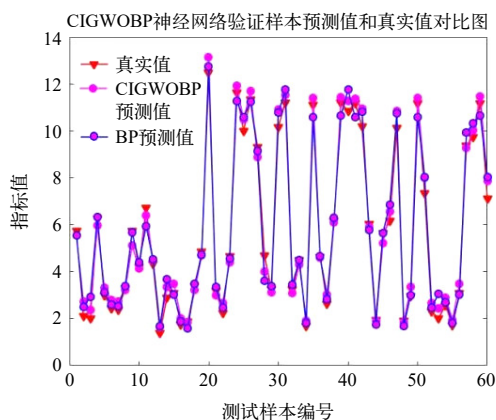
任意或连续日期线损台区查询模块包括历史日期内任意两日都存在线损异常台区查询与连续多日的线损的异常台区查询, 将查询的日期范围和阈值输入即可实现查询, 并将持续线损的台区以不同的命名方式存入数据库中, 并在列表中显示。任意或连续日期线损台区的分析过程如图 7 所示。当日



(a) 损失值变化曲线



(b) 训练集准确率变化曲线



(c) 测试集准确率变化曲线

图4 训练过程曲线

的线损异常台区信息表记为 allLoss，持续线损数据表记为 ChiX，持续负损数据表记为 ChiF，持续高损数据表记为 ChiG。

3.2 基于经验知识的诊断模块

3.2.1 关口计量装置故障诊断模块

根据当日线损异常台区信息表，可以查询到存在线损异常的台区信息，向计量系统问题诊断模块中导入台区主变当日的电流曲线数据，包含日期、

表2 算法的参数配置与测试集准确率

算法	参数	测试集准确率/%
CNN	532 040	91.44
DenseNet-121 (k=12)	1 007 620	95.18
DenseNet-121 (k=32)	6 839 490	94.62
LR	惩罚项Penalty:L2 范正规范化 强度倒数C:1.0 错误项的惩罚参数:105	84.89
SVM	内核函数(RBF)的参数: 0.0005	82.67
GBDT	评估器的个数:100	86.73
RF	树的数量:50	85.15

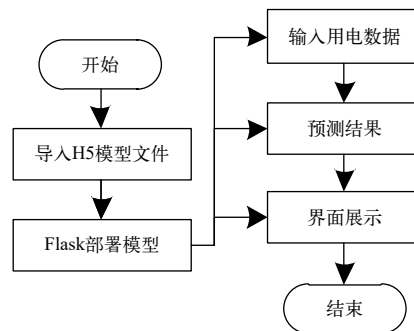


图5 模型部署应用流程图

点数、相序和每 15 min 采集的电流数据等。可通过以下方法实现对计量系统问题进行有效判断，具体过程如下。

根据技术人员提供的经验知识：任意电流相中存在连续时刻电流值为 0 时，即可判定为疑似关口连片未合或互感器故障。

台区总表中任意一相电流值高出另外两相的成倍数关系时，即可判定为疑似台区关口表互感器变比错误。

3.2.2 用户计量装置异常诊断模块

在持续高损数据表中，可以查询到系统内上传的所有历史线损持续高损的台区信息。在此模块中导入台区主变的供电损失数据。

根据技术人员提供的经验知识：当连续多日线损率高于预设阈值同时结合合格标签均为不合格时，即可判定线损异常原因为疑似用户计量装置异常或疑似户变关系异常。

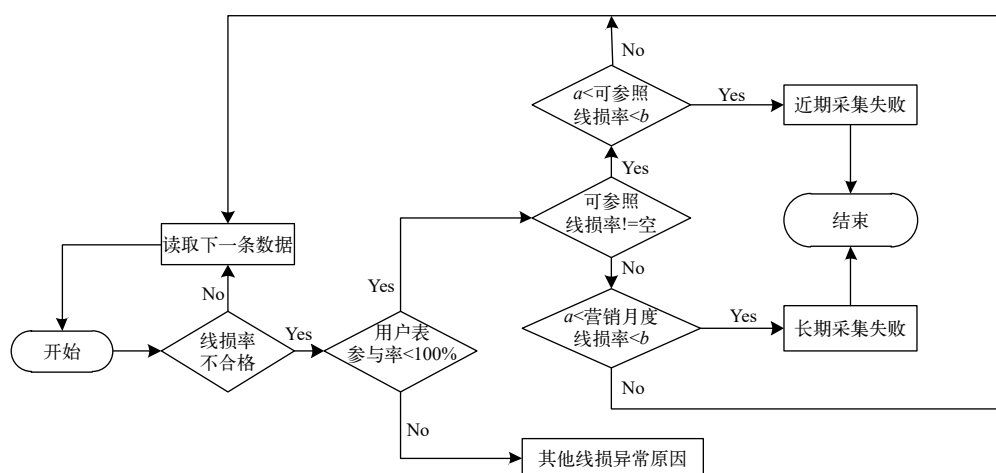


图6 GIGWOBP 预测值

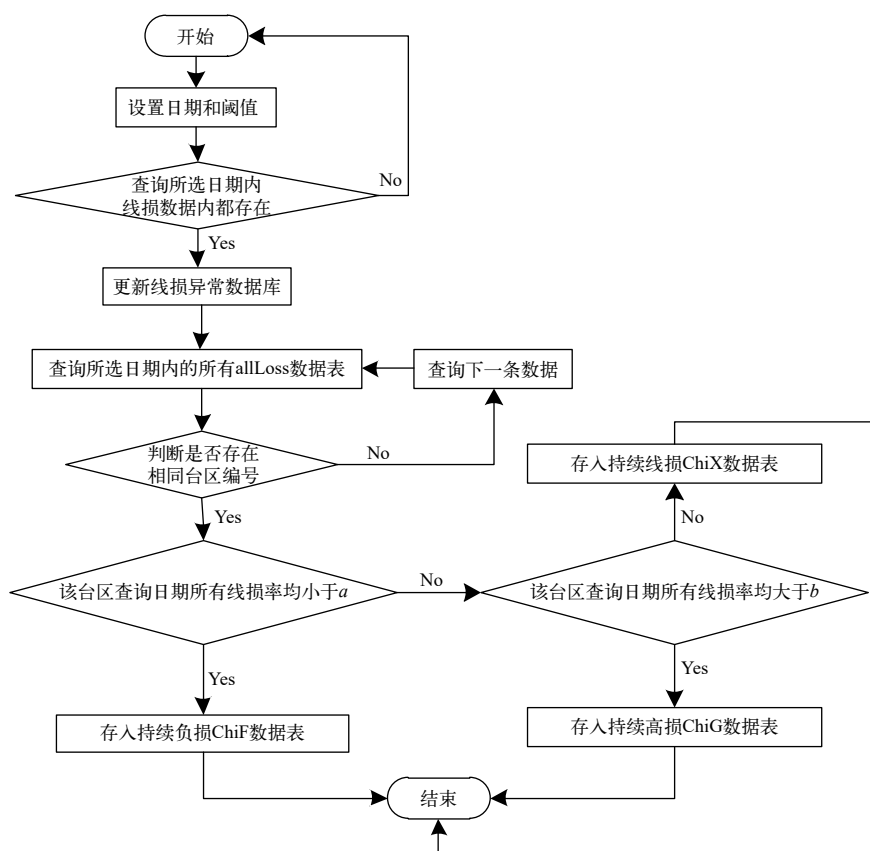


图7 任意或连续日期线损台区查询模块流程图

4 基于MQTT协议的线损异常闭环管理系统

MQTT 是一种采用二进制消息的发送/订阅编程方式的即时通信技术，也是一种基于轻量级的订阅/发送方式的消息发送物联网传输方式^[9]。MQTTnet 是一种基于 MQTT 通信协议的分布式数据库。本软件在 MQTT 服务端软件的基础上，开发了一款桌面

级的 MQTT 客户端，应用一款名为 mqtt_client 的安卓软件，通过花生壳内网穿透软件实现用户手机客户端消息的订阅和发布，可实现电脑和手机的线损异常原因的闭环接收与反馈。

5 应用效果

本文从江苏省苏州市国家电网抽取了 6000 条数

据导入到线损异常诊断系统，设定阈值 5%，查出 189 条单日线损异常数据，65 条多日线损异常数据。其中经系统监测判定 23 条数据存在窃电嫌疑。经人员现场查验，该 23 户存在窃电行为。

6 结论

本文通过分析多种线损异常情况，结合某电网公司的线损相关历史数据，提出了一种基于深度学习的线损异常原因诊断系统的研究方案，训练了基于 DenseNet 的窃电检测模型，同时比较了现有常用机器学习算法的窃电检测效果并完成了模型的系统部署。实验结果表明，基于 DenseNet 的窃电检测模型准确性较高。另外，本文提出了基于经验知识的线损异常诊断方案，配套开发了相应的诊断模块以及基于开源库的线损异常闭环管理模块。本文所研究的方法对多方面的线损异常原因进行诊断，目标降低台区线损异常状况分析的时间成本，提高监测与治理的工作效率，帮助构建智能化的电网环境。

参考文献

- [1] 滕红兵. 分析低压配电台区线损异常及对策[J]. 科技风,

(上接第 2 页)

实施质量验收实测实量。项目部负责人负责组织在工程建设过程中、各级质量验收环节采取实测实量方式验证整体质量。施工、监理单位项目部应配置实测实量设备仪器，检测人员要通过所属单位质量管理部门组织的培训考试、具备实测实量能力后方可作业；建设单位建设部门负责委托第三方开展实测实量。项目部组织开展的实测实量工作要如实填写记录，要认真分析质量管理工作存在的问题和不足，准确把握质量提升的着力点，将提升重点放在工程一线，将质量实测实量工作管理工作与其他工作充分结合，起到相互促进，互相推动的作用。

3 结束语

综上所述，架空输电线路工程高质量建设工作作为关乎到国家经济社会健康发展和安全稳定等问题的重大支撑，只有牢固树立“百年大计、质量第一”的工作认识，深入推进电网的高质量发展，依法落实质量终身责任，建立起高质量建设的全流程管控机制。只有以质量第一为抓手，把握住高质

2019(30):169.

- [2] 董志豪, 顾然. 配电网线损的原因与降损策略分析[J]. 电子技术, 2022, 51(05): 264-265.
- [3] 施文, 李牧. 台区线损异常成因分析及解决方法[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12 (4): 59-59.
- [4] 邢毓卿, 陶特伦, 蔡奇红, 等. 台区线损智能化管控模块的开发及应用[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20 (4): 56-59.
- [5] 姚诚智, 冯小峰, 周东旭. 检测低压用户窃电的计及专家经验的模糊聚类法[J]. 广东电力, 2021, 34(7): : 60-70
- [6] 吴科成, 曲毅, 陈义森, 等. 基于行业实用系数的台区线损率标杆值计算方法[J]. 广东电力, 2020, 30(7): 81-91.
- [7] 吴科成, 曲毅, 陈荃, 等. 考虑台区负载率的快速线损测算与方法[J]. 广东电力, 2020, 33 (11): 51-59.
- [8] 吴仁彪, 赵婷, 屈景怡. 基于深度 SE-DenseNet 的航班延误预测模型[J]. 电子与信息学报, 2019, 41 (6): 1510-1517.
- [9] 王少鹏. 物联网云平台消息中间件协议研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017: 9-10.

作者简介

张恒超(1989—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 线损分析。
沈秋英(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 数据分析、深度学习。

沈杰(1971—), 男, 工程师, 研究方向: 数据分析、深度学习。

李苏芙(1999—), 女, 硕士生, 学生, 研究方向: 线损设备管理。

(责任编辑: 耿立宏)

量发展方向, 才能真正提升架空输电线路建设施工水平, 真正提升质量管理工作及质量工艺水平。

参考文献

- [1] 强宁. 谈架空送电线路的设计与优化[J]. 建材与装饰, 2020 (1): 238-239.
- [2] 王伟, 黄亚璇, 郭家富. 基于全面质量管理理论的输电线路工程施工质量管理[J]. 中国设备工程, 2021(3): 191-192.

作者简介

王润琪(1995—), 男, 助理工程师, 现从事架空输电线路施工质量管理工作。

张心语(1997—), 男, 助理工程师, 现从事架空输电线路施工工作。

高超(1982—), 男, 高级工程师, 现从事输电线路运检、工程建设工作。

于立叁(1982—), 男, 高级工程师, 高级工, 现从事架空输电线路施工工作。

蓝睿(1983—), 男, 高级工程师, 现从事架空输电线路施工工作。

郎野村(1993—), 男, 工程师, 高级工, 现从事架空输电线路施工工作。

(责任编辑: 张峰亮)

电网主备调备份装置的研制

程站立*, 廖 兵, 代 飞

(国网安徽省电力有限公司马鞍山供电公司, 安徽 马鞍山 243000)

摘要: 电网调度是地区电网的指挥中枢, 保证电网调度业务的持续性、可靠性是保障电网安全稳定运行的基础。通过研制一种电网主备调备份装置, 利用爬虫程序定时对主备调调度业务数据进行备份。在 OMS 系统出现故障影响调度业务开展时, 及时启用主备调备份装置, 利用故障前的 OMS 数据保证调度业务的正常有序开展。

关键词: 电网调度; 爬虫程序; OMS 系统; 备份装置

中图分类号: TM734

Development of Power Grid Primary and Standby Backup Device

CHENG Zhanli*, LIAO Bing, DAI Fei

(State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Maanshan Power Supply Company, Anhui Maanshan 243000, China)

Abstract: Power grid dispatching is the command center of regional power grid, the continuity and reliability of power grid dispatching service is the basis to ensure the safe and stable operation of power grid. By developing a power grid primary and standby backup device, using the crawler program to periodically back up the business data of primary and standby scheduling. When the OMS system fault affects scheduling services, enable the primary and standby backup device in a timely manner, to ensure the normal and orderly scheduling of the service by using the OMS data before the fault.

Keywords: power grid dispatching; crawler program; OMS system; backup device

随着智能电网调度技术的不断发展, 电网调度运行工作对网络及通信设施依赖程度越来越高, 特别是调度业务开展使用的调度管理系统(简称 OMS 系统)能否稳定运行直接决定了电网调度业务能否正常开展。但是 OMS 系统无法保证一直正常运行, 一旦系统服务中断将影响调度业务的开展; 因此, 非常有必要研制一套电网主备调运行资料备份装置。一旦遇有突发情况或调度管理系统中断情况, 调度人员能够第一时间调出系统中断前的调度运行日志及正在进行的调度操作及事故处理等信息, 保证电网调度业务正常进行^[1]。

1 选题理由

目前调度基本上都是通过 OMS 系统开展正常调度业务。由于 OMS 系统服务器都是在远方布置, 在进行通信检修或更换设备等情况下, 随时可能中断 OMS 系统服务, 直接影响调度 7×24 h 持续在线业务开展^[2]。同时, 当遇有重大自然灾害或大面积停电事件须要启用备用调度时, 如何同步最新的电

收稿日期: 2023-03-13

网调度业务数据, 对电网调度的安全稳定运行至关重要。因此, 开发一套地区电网主备调运行资料备份装置, 是保证电网调度持续稳定运转的必要举措, 也是保证电网安全稳定运行的关键^[3]。

2 确定课题

基于以上分析, QC 小组通过研制一种装置, 实时备份当前电网运行数据, 并同步备份至主调和备调, 就能满足调度运行连续性工作要求。本小组成员在万方、中国知网、IEEE 期刊网、中国学术期刊网、维普资讯等文献数据库进行相关文献搜索, 发现目前国内外电网系统对地县级调度数据实时备份装置的研究成果较少, 因此本课题研究具有一定的创新性。

3 目标确定

OMS 数据备份完整率 100%, 确保调度业务 7×24 h 连续性, 将因 OMS 系统中断服务对调度业务影响的次数降为 0 次, 单次 OMS 系统服务中断对调度业务数据连续性影响时间降低到 5 min 以内。

4 对策实施

4.1 网络数据采集备份存储

安装浏览器爬虫程序，通过局域网打开 OMS 系统 URL 地址，浏览器爬虫程序模拟浏览器向 OMS 系统发送请求，将 OMS 系统网页返回的 html 源码/json 数据存储到本地，用 beautifulsoup, pyquery 对其进行解析提取 OMS 系统数据，浏览器爬虫程序对数据进行格式转换，获得需要的数据，基于保证备份数据的安全性、全面性兼顾空间利用率的考虑，采取一天进行 1 次全备份和若干次增量备份，最终数据以统一的格式存入当地 OMS 系统备份数据库，网络数据采集方案如图 1 所示^[4]。

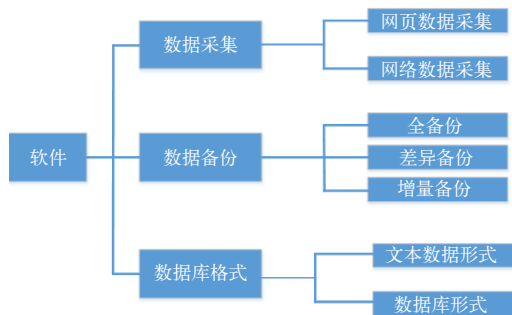
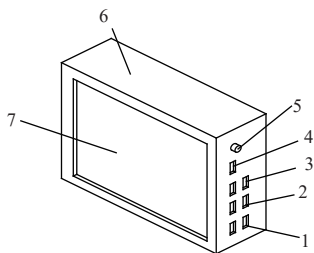


图1 网络数据采集方案

4.2 整机设计

装置硬件部分如图 2 所示，主机外壳的内部设有用于电网运行资料备份的资料备份装置^[3]。



1-外设接口；2-USB 接口；3-外设存储接口；4-网卡接口；5-启动按钮；6-主机外壳；7-主显示屏

图2 装置硬件部分

装置软硬件原理图如图 3 所示。

通过打开软件启动程序启动服务器，然后在浏览器中输入网页地址，即可进入数据备份网址进行电网运行数据的读取查看功能。

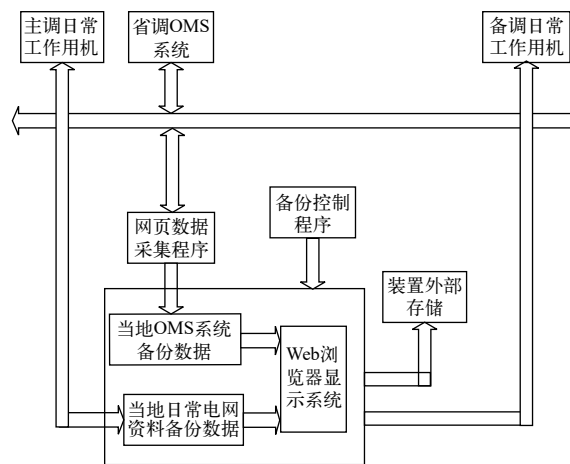


图3 装置软硬件原理图^[4]

5 效果检查

通过对策实施中整机测试，QC 小组实现了调度运行日志实时数据（包括开关跳闸、运行记事、异常处理以及调度操作票）的正常读取。

小组成员通过对 OMS 系统中调度日志每一个环节的数据备份对比发现，备份系统能够完整采集 OMS 系统中的数据并备份存储，且能够按照设定的频次实时读取。实现了在突发情况下，主备调调度人员能够及时调出 OMS 系统之前的调度运行日志及正在进行的调度操作及事故处理等信息，实现调度业务无缝对接，保证地区电网调度业务持续稳定运转。

地区电网主备调运行资料备份装置研制成功后，小组成员将之运用于实际的调控运行工作，QC 小组统计了上线运行后的 OMS 数据备份情况，OMS 系统中断服务对调度业务影响的次数，单次 OMS 系统服务中断对调度业务数据连续性影响时间，主备调运行资料备份装置实际运行情况如表 1 所示。

表1 主备调备份装置实际运行情况统计

OMS数据备份完整率	100%
OMS系统中断服务对调度业务影响的次数（全年）	0
单次OMS系统服务中断对调度业务数据连续性影响时间	平均3 min

根据表 1 可以看出，OMS 数据备份完整率 100%，因 OMS 系统中断服务对调度业务影响的次数为 0 次，单次 OMS 系统服务中断对调度业务数

据连续性影响时间降低到 3 min，达到了课题设定的目标，如图 4 和图 5 所示。

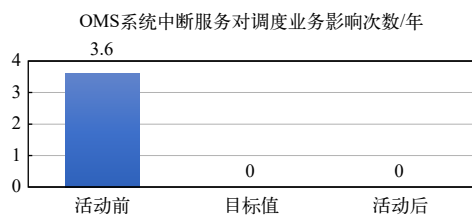


图4 OMS 系统中断服务对调度业务影响次数

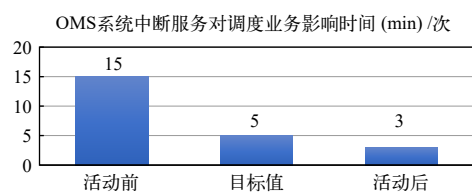


图5 OMS 系统中断服务对调度业务影响时间

6 结束语

此次 QC 活动，调度班 QC 小组围绕“研制地区电网主备调运行资料备份装置”这个目标，结合现有的 OMS 系统运行的特点，在提升调度业务系统持续稳定运行方面开展了有益的尝试。通过 QC 小组的这次活动，小组成员积极与技术专家交流，学习网页爬虫程序的编写、数据备份策略的优化、人机交互技术，并实际操作实践，提升了小组成员的动手操作能力及专业技术能力。同时，小组成员掌握了多种 QC 工具，来分析、解决工作中遇到的问题，小组成员的质量意识、成本意识、QC 知识、解决问题的能力 and 团队意识得到了很大的提升。

参考文献

- [1] 邓智广，何锡祺，余洁. 电网备用调度自动化系统的设计及其关键技术实现[J]. 电气应用, 2014 (23): 28-31.
- [2] 胡艳艳，吴莎，郭飞，等. 一种地区电网主备用调度的电网运行资料备份装置研究[J]. 黑龙江科技息, 2021 (8): 3-4.
- [3] 尹亮. 地区电网备用调度系统建设模式的探讨[J]. 宁夏电力, 2015 (4): 26-29, 34.
- [4] 柯春根，张炜，戎瑜. 一种地区电网主备用调度的电网运行资料备份装置: 202120173268.0 [P]. 2014-12-31.

作者简介

程站立 (1985—)，男，研究生，副高级工程师，主要从事电网调度管理工作。

(责任编辑:刘艳玲)

资讯

山东淄博公司：建成投运全市首个“零碳”电力彩虹驿站

2023 年 10 月 6 日，山东省淄博市市民王先生走进国网山东淄博供电公司主持建立的“淄在电”彩虹驿站，在驿站供电服务人员的指引下，享受到了峰谷分时业务办理、手机充电等便捷服务。“淄在电”彩虹驿站位于淄博花山公园内，是国网山东淄博供电公司打造的该市首个“零碳”电力彩虹驿站。该驿站在屋顶安装了 6.6 kW 光伏设备和 30 kW·h 的储能电池，日常运营用电完全实现了“自发自用”和“零碳运行”。

自 2023 年 10 月 1 日投运以来，“淄在电”彩虹驿站吸引了大批前来花山公园游玩的本地市民和外地游客。这一驿站兼具供电服务和便民服务“双重功能”，内部装有电力服务自助终端，配备供电服务值班人员，可以为来访市民和客户提供电费交纳、电量查询、用电申请等各种快捷业务办理服务，帮助大家了解安全用电知识和最新电价电费政策。驿站内配备空调、微波炉、饮水机、药箱、凳子、充电器等便民服务设施，可以供前来休息落脚的市民免费使用。驿站外还设置了充电桩，可满足电动汽车、电动自行车车主的充电需求。此外，市民和游客在此还能享受到雨伞借用、小件行李寄存、共享充电宝租借等多样化服务。

打造彩虹驿站是国网淄博供电公司深化“双网共建”服务的一项落地实践。作为供电服务网格的重要一环，电力彩虹驿站与政府服务网格深度融合，能够更好地服务市民。2023 年以来，国网山东淄博供电公司精选景区、商圈等人流密集区域，建设功能多样的电力彩虹驿站，及时满足来访客户用电需求，同时向群众提供休息、充电、饮水等公益服务。该公司还安排客户经理入驻当地政府服务网格群，担任“24 h 电管家”，第一时间响应客户用电诉求，提供咨询、抢修等“一站式”全天候服务，推动供电服务纳入政府服务网格管理，确保用电问题在网格中化解，服务质效在网格中提升。

信息来源：国网山东省电力公司

缩短变配电倒闸操作接地线装设时间

张舒怡

(国网福建省电力有限公司厦门供电公司, 福建 厦门 361006)

摘要: 传统的人工机械式安装接地线由于手动旋转操作棒费力、接地端头螺丝与地桩安装卡涩等原因, 常常导致运维人员接地线装设费时费力。目前接地线装设平均用时为 12.3 min, 不满足公司优质生产目标 10 min 的要求。QC 小组通过寻找问题症结与要因, 并制订相应对策, 使得接地线装设用时缩短至 8.73 min, 实现目标的同时提升了经济效益。

关键词: 倒闸操作; 接地线装设; 快速固定装置

中图分类号: TM645

Shorten the Installation Time of Grounding Wire for Switching Operation of Power Transformation and Distribution

ZHANG Shuyi

(State Grid Xiamen Electric Power Supply Company, Fujian Xiamen 361006, China)

Abstract: The manual mechanical installation of grounding wire is time-consuming and laborious for operation and maintenance personnel due to the laborious manual rotation of operating rod, grounding end screw and jamming of ground pile installation. At present, the average installation time of grounding wire is 12.3 min, which is not required by the high quality production target of 10 min. The QC team can shorten the installation time of grounding wire to 8.73 min by finding out the crux of the problem and working out the corresponding countermeasures, and achieve the goal and improve the economic benefits at the same time.

Keywords: reverse operation; grounding wire installation; quick fixing device

1 选题理由

倒闸操作是变配电运维人员重要业务之一。其中, 接地线装设作为倒闸操作的一个关键环节, 操作流程复杂, 花费时间多, 一直以来是影响运维人员操作效率的一个重要因素。2022 年, 据统计公司变配电运维人员开展变电站接地线装设工作的平均时长为 12.3 min, 高于公司优质生产要求的接地线装设全流程时间 10 min。为有效提高装设接地线效率和质量, 及时完成倒闸操作, 保证电网设备的安全稳定运行, 本小组针对这个问题开展了 QC 活动。

2 现状调查

为了找到问题症结, 小组绘制了变配电接地线装设全流程示意图, 如图 1 所示。

随后, 小组对 2022 年 100 次变配电运维人员倒

收稿日期: 2023-08-23



图 1 接地线装设全流程示意图

闸操作接地线装设各流程时间进行分类统计, 统计结果如表 1 所示。

表 1 接地线装设时长各流程时间占比统计表

序号	项目	平均花费时间/min	占比/%
1	现场勘察	0.96	7.80
2	工器具、地线整理	1.65	13.41
3	装设地线接地端	2.03	16.50
4	逐相装设地线导体端	7.31	59.43
5	拆卸操作棒	0.35	2.85
	合计	12.30	100.00

从表 1 中可以看出, 在接地线装设的全过程中, 逐相装设接地线导体端和装设接地线接地端

这2个流程占总平均花费时间的75.93%，用时为9.34 min，是问题的主要症结^[1]。如能解决这一项的30%，即可达到接地线装设时长降至10 min的目标值。

3 设定目标

小组统计了在2022年每个月变配电接地线装设平均时长，发现8月达到了最好水平：平均时长最短，为9.98 min，低于优质作业要求值10 min。初步分析，原因为8月是迎峰度夏时期，大型检修工作较少，倒闸操作量较小，运维人员有较好的精力完成接地线装设工作；其次进行操作均为10 kV设备，装设地线难度相对较小。小组成员进一步分析8月装设地线各步骤的时间占比，发现在导体装设这一主要症结上的花费时间为6.02 min，占比高达66%。

小组通过上述分析判定，将“变配电用倒闸操作接地线装设时长降至10 min”定为QC小组目标是可行的。

4 原因分析

小组成员从人、机、料、法、环、测6个方面切入，运用“头脑风暴法”，对变电站接地线装设时间较长的问题进行层层剥离和剖析，最后用关联图进行归纳，共得出6条末端因素，如图2所示。

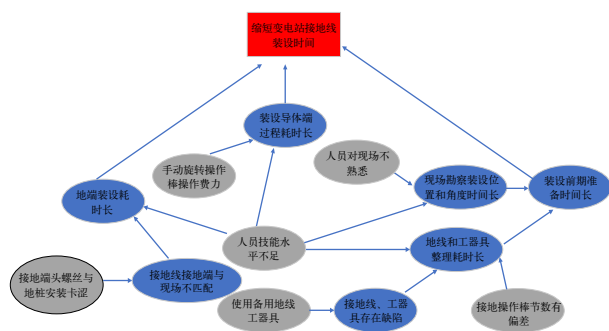


图2 原因分析关联图

5 要因确认

5.1 人员培训不到位

QC小组在实训室，检查操作人员在实训室内的实训设备装设接地线平均所用时间，并对操作

人员在实训过程中倒闸操作的规范性进行打分。从检查结果可以看出，在实训室20位操作人员装设接地线的操作时间 ≤ 10 min，同时，这20位运维人员技能考试操作部分的成绩均不低于90分，符合确认标准。因此，“人员技能水平不足”是非要因。

5.2 人员对现场不熟悉

QC小组检查运维人员对管辖变电站、配电室等设备接地线装设位置、设备高度的熟悉程度。检查结果显示随机抽取的2个变电运维班及2个配电运维班班组人员对管辖设备接地线装设位置、设备高度的熟悉程度均达到标准，该因素对问题症结影响程度较小，故“人员对现场不熟悉”为非要因。

5.3 手动旋转操作棒费力

由于地线重量重、操作杆长度长、手动旋转力矩大等原因，在手动旋转操作棒过程中，很容易疲惫，须休息过后才能继续进行导体端装设。通过统计2022年第4季度接地操作的用时，发现由于人员双手乏力导致的接地线装设期间休息次数为4.3次，且每次操作因休息导致的操作延长时间为2.26 min，大大增加了接地线装设最终的完成时长。故“手动旋转操作棒费力”对问题症结影响程度大，为要因。

5.4 接地端头螺丝与地桩安装卡涩

由于接地端头螺丝与地桩孔尺寸不匹配、地桩孔尺锈蚀、接地端头螺丝螺纹磨损等等原因，导致在手动装设接地端过程中，经常须要更换接地端端头螺丝，打磨地桩孔洞等，导致接地端装设时间的延长。通过统计2022年第4季度接地操作的用时，发现由于接地端头螺丝与地桩安装卡涩导致的地线装设时长延长1.18 min，大大增加了接地线装设最终的完成时长。故“接地端头螺丝与地桩安装卡涩”对问题症结影响程度大，为要因。

5.5 使用备用地线、工器具

目前各运维班内会定期对地线和工器具进行检查和清点，现在很少遇到由于地线或者工器具自身存在缺陷造成使用备用工器具或者地线的现象。通过统计2022年第4季度接地倒闸操作，未出现须更换备用接地线、工器具的情况。故“使用备用地线、工器具”为非要因。

5.6 接地操作棒节数有偏差

通过统计 2022 年第 4 季度接地倒闸操作，100 次接地线倒闸操作出现接地操作棒节数有偏差次数仅为 3 次，小组成员进一步针对这 3 次调整操作棒节数造成的地线装设延长时间进行了调查。3 次都是现场由于操作棒节数与现场挂接高度不匹配造成的，平均延时仅为 0.2 min。故“接地操作棒节数有偏差”为非要因。

6 制定对策

6.1 “手动旋转操作棒费力”方案的选择

须寻找一种对策，使得运维人员在装设接地线时候能够尽可能地节约体力消耗。小组成员借鉴电动螺丝刀等电动工具，决定在原先接地线安装操作机械结构的基础上，将绝缘棒机械旋转部位更换为电机旋转结构，研制出一种基于电动结构的接地线导体端快速固定装置，用电机结构取代人工机械安装结构，通过无线遥控实现电动安装接地线导体端头自动夹紧或者松开接地设备导体处，无需人工外力旋转安装，如图 3 所示。该装置能够解决传统人工安装接地线不易操作、费时费力等问题^[2-3]。



图 3 基于电动结构的接地线导体端快速固定装置

6.2 “接地端头螺丝与地桩安装卡涩”方案的选择

小组成员借鉴快速连接方式，决定研制一种新型接地线地端快速固定装置，将其采用一体化设计，快速插拔安装，具备多重紧固结构，同时具备良好的耐候性，有效地缩短现场安装地端处理时间，提高装置使用效率及安装可靠性。该装置能够节省取下/安装蝶形螺栓，更换接地端端头螺丝和打磨地桩

孔洞等多步操作用时，同时也将极大地提高现场地端安装的可靠性，降低装置的损耗率，有效解决目前的需求问题，如图 4 所示。

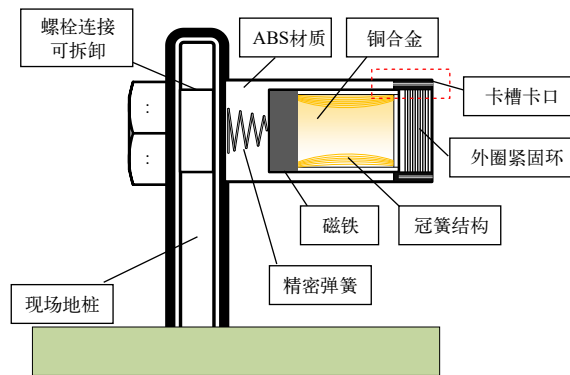


图 4 新型接地线地端快速固定装置

7 制定对策

7.1 使用基于电动结构的接地线导体端快速固定装置进行接地线装设

小组成员首先与加工厂进行联系，定制了基于电动结构的接地线导体端快速固定装置。经过与遥控控制器组装与调试后，最终形成完整的电动结构的接地线快速固定装置，并投入先期试验。经检测产品效果与设计一致且产品质量良好。

小组成员以某 110 kV 备用线路接地线装设为例，检验基于电动结构的接地线导体端快速固定装置进行接地线导体端装设的耗时。结果表明，当使用基于电动结构的接地线导体端快速固定装置时，能够完全避免由于装设接地线因工人休息导致的时间延长，将延误缩减到 0 min，对策目标实现，如图 5 所示。

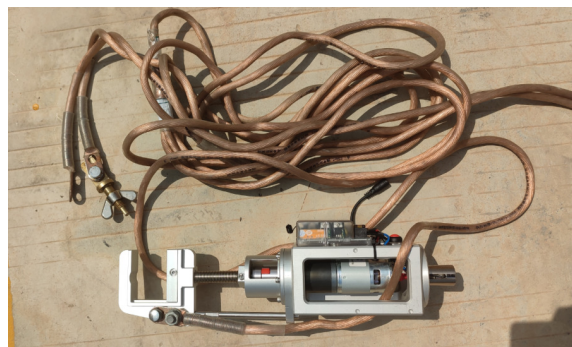


图 5 使用基于电动结构的接地线导体端快速固定装置进行接地线装设

7.2 新型接地线地端快速固定装置进行地线装设

小组成员首先与加工厂进行联系，定制了新型接地线地端快速固定装置，装置包括固定端和快速拔插头，经过组装与调试后，最终形成完整的新型接地线地端快速固定装置，并投入先期试验。经检测产品效果与设计一致且产品质量良好，如图6所示。

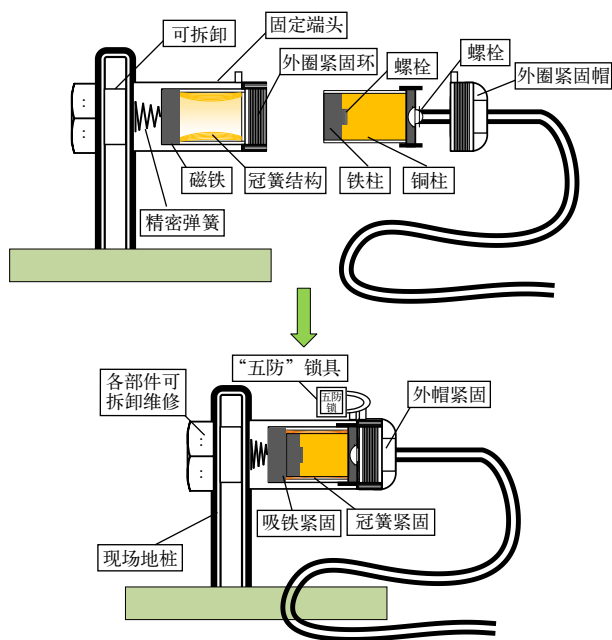


图6 使用新型接地线地端快速固定装置进行接地线装设

小组成员以某110 kV备用线线路接地线装设为例，检验新型接地线地端快速固定装置的装设接地线地端耗时。结果表明，当使用新型接地线地端快速固定装置时，能够完全避免由于接地端头螺丝与地桩安装卡涩导致的时间延长，将延误缩减到0 min，对策目标实现。

8 效果检查

8.1 活动目标值检查

小组将对策方法应用到2023年1—6月各变电班组接地线装设中，对策实施后，小组对各接地线装设平均时长进行统计，统计得出策略实施后的各班组接地线装设平均时长为8.73 min，与实施前相比缩短了3.57 min，且小于目标值10 min，达成了较好预期效果，目标值实现。

8.2 活动实施前后各关键症结耗时检查

对策实施前逐相装设导体端这一流程占装设地

线总平均花费时间的59.43%，为7.31 min，实施后占到56.13%，为4.9 min。对策实施前装设接地线接地端这一流程占装设地线总平均花费时间的16.5%，为2.03 min，实施后占到9.16%，为0.9 min，在所占时间比例上有一定幅度降低，且对策实施后各环节用时差异度减小，症结的解决程度为： $(7.31 + 2.03 - 4.9 - 0.9) / (7.31 + 2.03) = 37.9\% > 30\%$ ，达到预期值。

8.3 经济效益分析

对2023年上半年倒闸操作进行统计，对策方案应用至各接地线装设场合100次，平均缩短运行维护时长3.57 min，以人工费100元/h计算，共节省人工成本1190元。

9 制定巩固措施

小组编写《新型接地线地端快速固定装置使用说明书》，并拍摄教学视频，通过班组讲堂等形式进行学习，深化方案实施，确保运维人员掌握接地线快速固定装置使用方法和接地线地端快速固定装置的使用方法。

10 活动总结

在本次QC活动过程中，小组成员从发现问题、分析问题到解决问题，按PDCA程序进行，成功解决了现场实际问题——缩短倒闸操作接地线装设时长，有效地提高了倒闸操作效率，保证了电网设备的安全稳定运行。除此之外，在解决该问题的过程中，小组成员群策群力，充分体现了小组成员的创造性，各小组成员在专业技术、管理方法、综合素质等方面都得到了提升。

参考文献

- [1] 庄建煌, 彭健, 陈重, 等. 接地线装设效率低的原因分析及处理对策[J]. 高压电器, 2020, 56(9): 54-59.
- [2] 袁燕, 王家华, 王斐宏, 等. 用于配网接地线装设的辅助装置设计研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(5): 28-29.
- [3] 张丹. 一种接地线装设辅助伸缩装置的研制[J]. 机电信息, 2020(24): 52-53.

作者简介

张舒怡(1991—), 女, 工程师, 硕士研究生, 研究方向: 变电站运维、配电工程项目管理。

(责任编辑: 刘艳玲)

一种真空度检测装置及抽气系统

赵国航*, 齐泽力

(国网冀北北京送变电有限公司, 北京 房山 102401)

摘要: 针对500 kV 罐式断路器抽真空过程中无法精确读取真空机组进口数据, 为防止因关闭真空机组读取数据容易导致真空泵油倒入设备内部风险的问题, 提出在断路器本体侧增加一个三通、球阀、电子显示表等措施, 此方法操作简单, 数据读取准确, 降低了操作风险。

关键词: 真空泵; 罐式断路器; 抽气速率

中图分类号: TM561.1

A Vacuum Degree Detection Device and Extraction System

ZHAO Guohang*, QI Zeli

(State Grid Jibei Beijing Power Transmission and Transformation Co., LTD., Beijing Fangshan 102408, China)

Abstract: During the vacuum pumping process of a 500 kV tank circuit breaker, it is not possible to accurately read the inlet data of the vacuum unit. Closing the vacuum unit to read data can easily cause the vacuum pump oil to pour into the equipment. In response to the above issues, it is proposed to add a three-way, ball valve, and electronic display meter on the circuit breaker body side. Its operation is simple, data reading is accurate, and operational risks are reduced.

Keywords: vacuum pump; tank type circuit breaker; pumping rate

1 选题背景

在停电改造项目中, 经常需要在有限的时间内完成 500 kV 罐式断路器安装^[1], 其中一个关键环节就是对设备抽真空(真空度要求达到 50 Pa 以下为标准, 每个厂家真空度标准略有区别)、注气, 罐式断路器气室单相容积约 6 m³, 如果采用普通的真空泵(抽气速率为 64 m³/h), 根据经验单相气室达到真空度要求用时约为 10 h (很容易达到 50 Pa 真空度要求, 但需要持续抽一定时间达到极限真空 10 Pa, 且要在此真空度下持续抽真空约 10 h 以满足后续微水试验的合格要求), 三相连续施工的话, 将会占用更长的施工作业时间, 不满足施工进度需求。目前针对 500 kV 罐式断路器安装, 施工单位基本都选用抽气速率更大的真空机组来进行真空处理(抽气速率为 150~300 m³/h)^[2], 并且可以两相同时进行抽真空, 这样三相断路器的真空处理时间仅占过去的 1/3 左右, 基本满足进度要求, 但是由于真空机组抽气速率过大, 真空机组进口真空度的读数偏小(一般可以达到 8 Pa 以下), 不能反映断路器内部实际真空度, 如果要观测实际数据, 就要关闭

收稿日期: 2023-07-28

真空机组(存在真空泵油倒入设备内部风险), 所以造成不能对断路器内部真空度实际判断, 从而影响 SF₆ 气体的充注时间。

2 现有技术存在的缺点

因为真空表安装在机组的内部, 真空机组外部接口与断路器设备管路只有一个球阀断开点, 一旦球阀断开断路器就失去真空观测, 如图 1 所示。

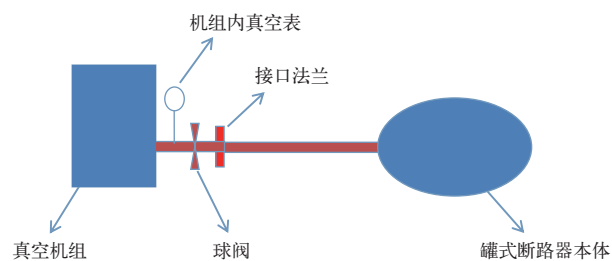


图 1 传统罐式断路器抽真空连接方式示意图

真空处理的时间没有准确数据支撑, 造成施工作业人员靠经验来判断是否具备条件。

3 解决思路

在断路器本体侧增加一个三通及球阀(三通要考虑设备接口形式), 球阀一端接真空机组, 另一

端接三通，三通分别接电阻式真空表及罐式断路器逆止阀，电阻式真空表为数显方式，接线简单，数据读取准确、稳定。须要读取数据时，关闭球阀即可，操作简便，如图2所示。

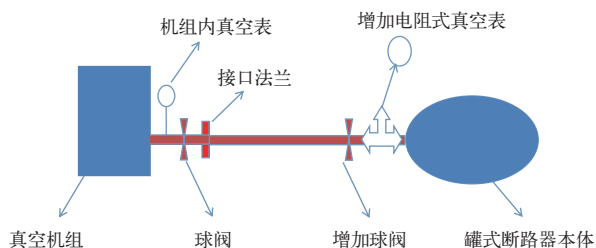


图2 创新后罐式断路器抽真空连接方式示意图

4 实施步骤

调研真空泵使用现状，收集相关资料；确定项目的研究内容和设计思路。

主要技术方案包括联通管道，联通管道的两端分别形成有第一联通口和第二联通口，且联通管道上还形成有第三联通口，其中，第二联通口用于与待抽气设备相联通；第一阀门，一端连接于第一联通口，另一端与真空泵相连接；第一真空表，真空表设置与第三联通口；在检测状态下，第一阀门关闭，将联通管道与真空泵隔绝，第一真空表用于检测所述联通管道内部的真空度。

延伸管道，延伸管道与真空度检测装置组成抽气回路，延伸管道一端与抽气口可拆卸连接，另一端与第一联通口一端相连接，抽气口包括第一抽气口和第二抽气口，抽气回路的数量为2个，且2个抽气回路各自的延伸管道分别与第一抽气口和第二抽气口相连接，2个抽气回路各自的第二联通口分别连接于待抽真空设备的两相气室。

真空度检测装置及抽气系统主要包括真空泵、设备本体、抽气管道和第一阀门，抽气管道一端联通于设备本体，另一端设置有抽气口，抽气管道上设置有第一阀门，真空表设置与抽气管道上，位于第一阀门和设备本体之间。

真空泵通过断路器真空检测装置与待抽气设备相连接，其中，待抽气设备为罐式断路器，也可延伸为其他需抽真空设备，如HGIS等组合电器，真空泵上设置有抽气口，抽气口可以通过延伸管道联通于第一阀门，在真空泵对断路器进行抽气时，真



图3 成品展示图

空泵持续工作，且第一阀门处于打开状态，此时真空泵联通于联通管道，联通管道联通于断路器真空检测装置，真空泵与罐式断路器之间形成一通路，在需要读数时，将第一阀门关闭，此时第一阀门将真空泵与联通管道隔绝，二者之间无法进行气体交换，读取的数值能够准确地反映出待抽气设备中的真空度。

完成设计方案，进行研发；进行现场试验，对装置进行持续优化；总结，推广应用，成品图如图3所示。

5 创新点及推广价值

体积小，结构简单，操作方便。

采用数字式压力表，便于读数，数据稳定。

本发明主要解决罐式断路器在进行真空处理时，能够准确地反映断路器内部真空度数据，为施工作业人员提供数据支撑，保证符合设备安装技术条件的同时，缩短设备安装时间，能够有效推进施工进度，确保安全、高效、优质完成停电期间断路器安装工作，具有一定的推广应用意义。

参考文献

- [1] 王维检. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [2] 杨乃恒. 干式真空泵的原理、特征及其应用[J]. 真空, 2000(3): 1-9.

作者简介

赵国航(1984—)，男，本科，工程师，所从事的工作方向：电网通信，变电施工。

齐泽力(1989—)，男，研究生，工程师，所从事的工作方向：变电施工，电力系统通信。

(责任编辑:刘艳玲)

适用不停电检修的支柱绝缘子固定导线金具研制

王庆泽*, 艾茂民, 张 硕, 王 佳, 卢国波

(国网山东省电力公司菏泽供电公司, 山东 菏泽 274000)

摘要: 由于绝缘子绑扎线老化、压片损坏、螺栓松动等原因, 架空导线从绝缘子脱落的缺陷时有发生, 绝缘子处空间距离狭小且电位复杂, 带电作业人员采用绑扎法或紧固绝缘子顶部螺栓法固定导线时存在作业风险高、工作效率低等问题。提出适用不停电检修的支柱绝缘子固定导线金具, 该金具结构巧妙、易于安装且导线牢固可靠, 可通过绝缘手套法或者绝缘杆作业法安装, 提高了作业效率及安全水平, 进一步保障作业人员安全。

关键词: 配网; 不停电检修; 架空线路; 固定金具

中图分类号: TM216

Development of Hardware of Wire Fixed in Insulator Suitable for Uninterrupted Maintenance

WANG Qingze*, AI Maomin, ZHANG Shuo, WANG Jia, LU Guobo

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

Abstract: Due to aging of insulator binding wire, damage of compression plate, loosening of bolts and other reasons, the defect of overhead conductor falling off from the insulator occurs from time to time. The space distance at the insulator is narrow and the potential is complex. When the live working personnel fix the conductor by binding or fastening the bolt on the top of the insulator, there are high Operational risk risks, low work efficiency and other problems. The hardware of wire fixed in post insulator suitable for uninterrupted maintenance is developed. The hardware has a clever structure, is easy to install, and the wire is firm and reliable. It can be installed using insulation gloves or insulation rods, improving work efficiency and safety level, and further ensuring the safety of operators.

Keywords: distribution network; uninterrupted maintenance; overhead lines; fixed hardware

1 选择课题

伴随经济与社会高速发展, 各行各业对供电可靠性的要求越来越高, 配电线路健康水平成为至关重要的因素。配网架空线路通常采用瓷瓶绝缘子或复合绝缘子支撑导线, 在常见的线路缺陷中, 导线脱落时有发生。绝缘子承接带电体与接地体, 电位复杂且空间距离较小, 带电作业人员通常采用绑扎导线或者紧固绝缘子顶部螺栓的方法处理该类缺陷, 作业效率及安全水平有待提高^[1]。

采用绑扎法处理该缺陷时, 绑扎线头长度不超过 100 mm, 作业人员动作幅度大时, 易侵犯空气间隙, 单相接地、相间短路的风险较高, 对作业人员及配电线路安全均构成威胁, 且绑扎效率不高。

采用紧固螺栓处理该缺陷时, 由于作业人员穿戴 3 层手套 (线手套、绝缘手套、羊皮手套) 进行

收稿日期: 2023-06-15

作业, 而绝缘子顶部螺栓较小, 穿戴 3 层手套取放细小螺栓及垫片困难, 易造成高空落物、物体打击风险, 一旦垫片或者螺栓脱落, 又会影

响作业效率。针对上述问题, 须研制出适用不停电检修的支柱绝缘子固定导线金具, 提高作业效率及安全水平, 进一步保障作业人员安全。

2 方案设计及实施

2.1 总体设计方案

2.1.1 金具本体结构设计

图 1 所示为绝缘子的实物图片, 为了设计出体积小、安装牢固的支柱绝缘子固定金具, 通过分析绝缘子的结构特征及三维建模, 确定了固定导线金具的主体结构。

针对绝缘子顶部结构特征, 固定导线金具设计有对称的两侧夹具, 两侧夹具的上部通过螺栓连接在一起, 两侧夹具的下部卡在绝缘子上, 绝缘子上



图1 绝缘子实物照片

的架空导线位于绝缘子和卡具之间，结构巧妙，安全灵活，易于安装，如图2所示；金具采用一体化结构，方便使用绝缘手套法或绝缘杆作业法安装，克服了戴3层手套取放螺栓、垫片等细小零件的困难；固定导线金具上部设置有螺纹孔，通过调节螺栓的紧固程度可以适应不同线径的架空导线，保障了固定金具的适用性；金具下部呈弧状钩形结构，弧状结构可以牢牢地固定在绝缘子上，避免固定装置沿线路方向移动。

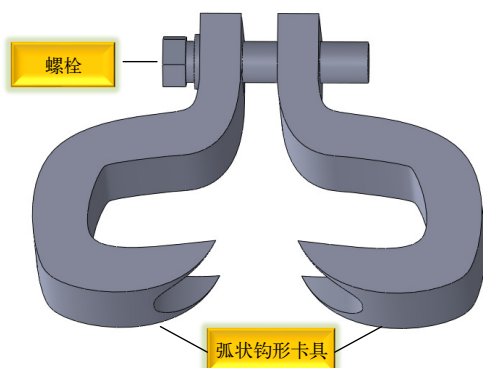


图2 固定导线金具

2.1.2 绝缘操作杆设计

为便于金具安装，设计出一种适配的绝缘操作杆，如图3所示。

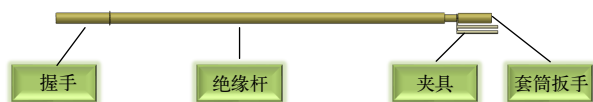


图3 绝缘杆套筒扳手

绝缘操作杆的作用是辅助作业人员与带电体、接地体保持足够的安全距离，进一步提高带电作业人员使用该金具固定导线时的安全系数和作业效率，

切实提高供电可靠性^[2]。

2.2 主要技术指标

支柱绝缘子金具的主要技术指标如下。

螺栓强度：螺栓强度等级不小于4.8。

固定金具：固定金具采用高品质铝合金加工制作，材料致密，具备良好的抗腐蚀性。

加工成品：整体尺寸误差控制在 ± 1 mm。

绝缘操作杆的有效绝缘长度不低于0.7 m。

2.3 使用方法

带电作业人员在处理导线脱落缺陷时，可结合现场作业环境采用绝缘手套作业法或者绝缘杆作业法进行安装^[3]。以绝缘杆作业法安装为例，实施方法如图4所示，关键步骤如下。

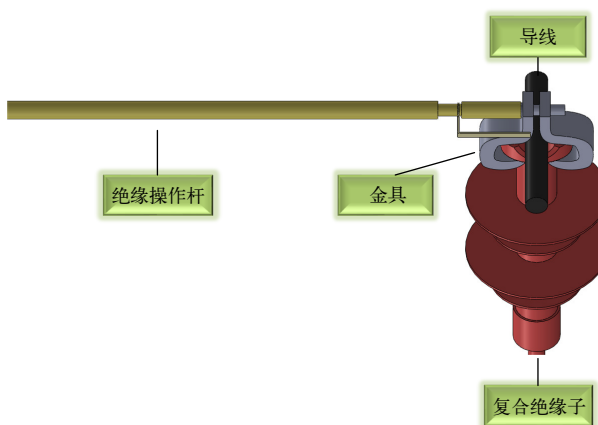


图4 绝缘杆作业法安装效果图

第一步，带电作业人员在设置绝缘遮蔽及保证安全作业距离的前提下，进入到适当工作区域，首先将架空导线放置在绝缘子顶部导线槽内。

第二步，作业人员通过固定装置与绝缘操作杆相互配合，将绝缘杆套筒扳手在固定装置螺栓上，并采用绝缘杆上的夹具夹紧固定装置。

第三步，待确认夹具夹紧后，作业人员通过绝缘操作杆将固定装置放置在绝缘子顶部，卡住导线，并旋转操作杆，拧紧固定装置上的螺栓，使卡具收紧，将架空导线牢牢地固定在绝缘子上。

第四步，确认导线固定牢固后，作业人员取回绝缘操作杆，完成作业。

3 应用效益

固定导线金具结构巧妙，安全灵活，易于安装且导线牢固可靠，图5为金具的实施效果。该金具

的使用解决了作业人员戴绝缘手套取放螺栓、螺母等小配件的难题，避免了绑扎导线时手部在狭小复杂作业空间往复穿梭的风险，降低了作业难度，提高了作业效率。从安全、经济和社会效益3个层面分析如下。



图5 实施效果

3.1 安全效益

在不停电处理导线固定作业过程中，带电作业人员使用支柱绝缘子固定导线，可避免出现绑扎导线时侵犯空气间隙或者紧固螺栓时存在高处坠物的安全风险，从根本上解决了安装灵活性差、易发生侵犯空气间隙、安全性差等问题，保障作业人员的人身安全。

3.2 经济效益

固定金具具备结构巧妙、安装方便、适用范围广、可靠性高等优势，其应用改变了现有紧固导线的方法，经测算，完成相同的紧固导线作业，作业时长由平均2.5 min降低至平均1 min，有效提升作业人员的作业效率，降低了人力、物力成本。

3.3 社会效益

固定导线金具的使用，在提高作业人员安全性和作业效率的同时，有利于减少客户的停电感知，提升供电可靠性，助力优化营商环境，具有良好的社会效益。

4 结束语

固定导线金具可以在带电处理导线脱落缺陷中，实现快速固定导线，解决了带电作业人员采用绑扎法或紧固绝缘子顶部螺栓法固定导线时存在的作业风险高、效率低等问题。其巧妙的结构既显著提高了作业效率，又提高了作业人员的安全水平。此外，该金具既适用于带电作业，提高带电作业效率，保障带电作业人员安全，同时又可适用于停电作业，可显著提高停电作业的生产效率。

参考文献

- [1] 周亚楠, 祖国强, 姚瑛, 等. 配网架空线路舞动机理与防范措施综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(4): 83-89.
- [2] 苏冰, 晁绵东. 10 kV配网不停电作业技术应用研究[J]. 农村电气化, 2023(3): 88-91.
- [3] 国家电网公司. 10 kV配网不停电作业规范: Q/GDW 10520-2016[S]. 2017, 3.

作者简介

王庆泽(1989—), 男, 工程师, 从事配网运检、配网不停电作业技术等方面研究。

艾茂民(1976—), 男, 高级工程师, 从事配网运检、配网不停电作业技术等方面研究。

张硕(1990—), 男, 工程师, 从事配网运检、配网不停电作业技术等方面研究。

王佳(1986—), 男, 工程师, 从事配网运检、配网不停电作业技术等方面研究。

卢国波(1992—), 男, 工程师, 从事配网运检、配网不停电作业技术等方面研究。

(责任编辑:刘艳玲)

资讯

浙江舟山公司：新能源汽车应急救援充电服务正式启用

2023年9月25日上午，在浙江舟山蜈蚣峙码头附近，一辆新能源汽车使用V2V移动式车对车充电设备充电，仅用30 min，车辆恢复正常行驶状态。这标志着舟山新能源汽车应急救援充电服务正式启用。

道路应急充电设备包含1台移动式储能充电车和2台移动式车对车充电设备。新能源车主通过拨打110、122、12345、95598等24 h服务热线，提出充电需求和准确定位，国网舟山供电公司收到应急工单后，立即派出道路应急充电设备前往现场充电。

为保障杭州亚运会及国庆假期新能源汽车客户道路行驶安全和应急充电需求，国网舟山供电公司在金塘高速服务区和蜈蚣峙码头部署道路应急充电设备，分别为进出舟山高速口、东西快速路及朱家尖重要景点区域的新能源汽车客户提供应急充电、车辆道路救援和临时供电服务。并积极与各政务热线单位保持信息沟通，有效配合开展新能源汽车道路应急救援保障工作。

信息来源：国网浙江省电力有限公司

农村地区“煤改电”增量负荷计算及户均配变容量配置方法研究

孙钦斐^{1*}, 王瀚秋², 李 干², 马 凯², 李香龙¹

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 丰台 100073;
2. 国网北京市电力公司, 北京 西城 100031)

摘要: 配电网规划是“煤改电”配电网可靠运行的根本保障, 但“煤改电”负荷作为一种增量负荷, 其户均配变容量目前尚无标准, 配电网规划设计缺少基本依据。针对该问题, 文章提出一种“以热定电”计算农村“煤改电”增量负荷及户均配变容量的方法, 即以采暖热负荷需求确定“煤改电”增量负荷与户均配变容量, 从而为“煤改电”配网规划和设备选型提供依据。并以北京地区典型居民住宅为例, 采用建筑环境模拟软件 DeST 仿真计算房屋采暖所需热负荷, 根据电采暖设备类型, 最终给出北京地区农村“煤改电”用户户均配变容量。

关键词: “煤改电”; 电采暖; 配电网规划; 采暖热负荷; 户均配变容量

中图分类号: TM727

Research on the Calculation Method of Incremental 'Coal to Electricity' Load and Average Distribution Transformer Capacity

SUN Qinfei^{1*}, WANG Hanqiu², LI Gan², MA Kai², LI Xianglong¹

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing Fengtai 100073, China; 2. State Grid Beijing Electric Power, Beijing Xicheng 100031, China)

Abstract: Distribution network planning is the basis to guarantee reliable operation of "Coal to Electricity"('C2E') distribution network. While, as a kind of incremental load, there is no standard about average transformer capacity for each 'C2E' consumer. As a result, 'C2E' distribution network planning and design lacks basic rules. Aimed at this problem, a method named 'Heat load to Electricity load' for calculating 'C2E' incremental load and average transformer capacity per consumer was proposed in this paper, which provides basis to 'C2E' distribution network and electrical equipment selection. With this method, 'C2E' electrical load and average transformer capacity is determined by heating load of building in demand side. An example with typical residential building in Beijing was taken in this paper. Heating load of building was calculated using DeST (Designer's Simulation Toolkits) firstly. Then, with the kind of electrical heating equipment, average transformer capacity for each 'C2E' consumer in Beijing rural area was given.

Keywords: coal to electricity; electrical heat supply; distribution network planning; heating load; average transformer capacity per consumer

0 引言

“煤改电”是指利用电能替代散煤直接燃烧的供暖方式, 是推进清洁取暖、治理大气污染的重要形式, 同时也是从消费端构建清洁低碳能源体系、加快再电气化进程的重要手段。近年来, “煤改电”在我国北方地区得到规模化推广应用。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助: 52020118000M

收稿日期: 2023-08-09

“煤改电”负荷需求及户均配变容量是其配电网规划的前提, 直接关系到“煤改电”配电网供电的可靠性和经济性, 关系到“煤改电”用户取暖的安全性。户均配变容量配置不足, 无法满足冬季取暖用电需求, 直接影响民生; 户均配变容量配置过高, 将导致电网轻载, 尤其是非采暖季电网资源闲置浪费, 经济性差。

配电网规划中, 文献 [1-2] 采用单位面积法和单位指标法, 根据区域经济水平等因素确定的负荷密

度与单位用电指标，考虑同时系数后预测负荷需求。文献 [3-4] 考虑住宅小区家用电器的同时率和负荷率，计算小区需要系数典型值，采用需要系数法预测居民住宅小区负荷。文献 [5] 考虑负荷特性和用户行为，进一步优化需要系数方法。文献 [6] 计及负荷增长风险和台区负荷特性，进行配电变压器优化选型配置。另外，也常采用自然增长率法等负荷预测方法^[7-8]进行一定时间内的负荷动态预测和电网滚动规划。

上述方法均适用于居民住宅负荷预测，但不同于传统用电负荷自然增长规律，“煤改电”负荷是一种阶跃式增量负荷，且负荷确定后呈现恒值特性，一般不再增长。因此，前述方法对于“煤改电”增量负荷预测和电力增容适用性较差。对于增量负荷预测，文献 [9] 采用自然增长负荷和阶跃负荷分别建模的方法；DL/T 5729—2016《配电网规划设计技术导则》针对新增大用户负荷比重较大地区，采用点负荷增长与区域负荷自然增长相结合的方法进行预测。“煤改电”负荷预测可借鉴上述方法，但“煤改电”增量负荷需求目前尚无参考标准，缺乏相关研究。因此，亟须开展“煤改电”增量负荷研究，并确定户均配变容量，为配电网规划提供依据。

本文首先从需求侧和供给侧分析“煤改电”用户增量负荷的影响因素；然后，重点从需求侧分析采暖房屋热负荷指标，建立房屋热过程分析模型，介绍房屋热负荷理论计算方法和动态仿真模拟软件 DeST，从而确定采暖热负荷。在此基础上，提出“以热定电”的“煤改电”增量负荷与户均配变容量计算方法。最后，以北京地区典型“煤改电”用户为例，运用建筑模拟仿真软件 DeST 仿真计算户均采暖热负荷，并依据电采暖设备类型计算户均增量负荷及相应户均配变容量。

1 “煤改电”增量负荷影响因素分析

电采暖设备制热提供热量供给，从而在需求侧维持室内温度，实现房屋采暖。因此，“煤改电”增量负荷影响因素可以从采暖需求侧和采暖供给侧 2 个层面进行分析，如图 1 所示。

1.1 需求侧影响因素

“煤改电”增量负荷根本上是由需求侧房屋采暖的热需求决定的。从建筑动态热过程分析^[10]，影

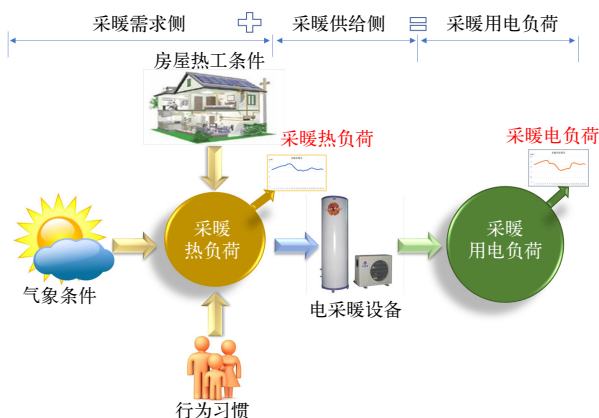


图 1 “煤改电”增量负荷影响因素与计算流程

响房屋采暖的因素即是“煤改电”负荷需求侧影响因素，主要包括以下 3 方面。

1.1.1 气象因素

不考虑供暖系统作用，气象条件是影响建筑热过程的根本因素，也是最主要室外因素，包括室外温湿度、太阳辐射强度、风向、风速等。这些因素主动作用于建筑得热、失热来影响房屋热过程和采暖热负荷。

1.1.2 房屋热工因素

建筑采暖是房屋以其围护结构为边界，实现室内外动态热平衡的过程。因此，房屋本身的热工条件，包括房屋结构、围护材料、室内发热、邻室得热、周围环境热状况等，通过不同结构的窗墙比、建筑朝向、围护材料热阻等影响房屋热过程。

1.1.3 用户行为习惯因素

用户行为习惯是影响建筑热过程的人为因素，包括采暖目标温度、采暖时段、房屋开门开窗及通风次数热扰、室内照明及设备产热等。

上述 3 方面因素综合作用，叠加供暖系统的热量供给，实现房屋热传导过程的动态平衡，维持一定的室内温度。定义维持一定室内温度所消耗的热功率为采暖热负荷，该热负荷从根本上决定了“煤改电”用电负荷。

1.2 供给侧影响因素

电采暖设备利用电能产生房屋采暖所需热量。不同设备的工作原理及性能决定了其电热转换效率各不相同。一般而言，将电能直接转换为热能的热类设备，效率小于 1；利用电能做工的热泵类设备，效率（COP）可达 3~4。

在给定房屋，即需求侧采暖热负荷一定的情况下，供给侧不同类型的电采暖设备所消耗的电功率不同。因此，电采暖设备类型是影响“煤改电”增量负荷需求的供给侧因素。

2 采暖热负荷需求计算

采暖热负荷是计算“煤改电”增量负荷的基础。供暖设计时，应以采暖季室内温度满足采暖要求为目标，确定热负荷。

2.1 房屋采暖热负荷

民用建筑的采暖热负荷可按下列公式^[11]计算：

$$Q_h = q_h A_c \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

式中： Q_h 为采暖设计热负荷，kW； q_h 为采暖单位面积热指标，W/m²； A_c 为采暖房屋采暖面积，m²。

房屋采暖面积为已知量，故计算房屋采暖热负荷需获取单位面积热指标 q_h 。根据CJJ 34—2010《城镇供热管网设计规范》，城镇典型建筑单位面积热指标 q_h 推荐值如表1所示。

表1 采暖单位面积热指标推荐值

建筑物类型	采暖热指标 $q_h/(W \cdot m^{-2})$	
	未采取节能指标	采取节能指标
住宅	58~64	40~45
居住区综合	60~67	45~55
学校、办公	60~80	50~70
医院、托幼	65~80	55~70
旅馆	60~70	50~60
商店	65~80	55~70
食堂、餐厅	115~140	100~130
影剧院、展览馆	95~115	80~105
大礼堂、体育馆	115~165	100~150

注：表中数值适用于我国东北、华北、西北地区。

但是农村住宅建筑形式多样，与城镇建筑在结构、围护材料等方面存在差异，上表推荐的通用采暖热指标直接应用于农村住宅采暖设计不够精确。

根据GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》，冬季供暖系统的热负荷主要包括下列散失或获得的热量：围护结构的耗热量，门窗缝隙渗入室内冷空气耗热量、门窗开启时进入室

内的冷空气耗热量、通风耗热量、其他途径散失和获得的热量。

其中，围护结构的耗热量是最主要因素，其基本耗热量为

$$Q = \alpha F K (t_n - t_{wn}) \quad (2)$$

式中： α 为不同围护结构温差修正系数； F 为围护结构的面积，m²； K 为围护结构的传热系数，W/(m²·K)； t_n 为供暖设计室内温度，°C； t_{wn} 为供暖室外设计温度，°C。

由式(2)可知，假设围护结构确定，其基本耗热量由供暖室内和室外设计温度确定。

对于室内设计温度，根据国家现行设计规范^[12]要求，民用建筑主要房间的室内温度范围为18~24°C，根据农村地区居民生活习惯，农村“煤改电”用户供暖室内设计温度一般取18°C。

对于室外设计温度，主要受各地气候条件影响。目前，我国使用的室外设计温度按平均或累年不保证日(时)数确定，即供暖室外设计温度应采用历年平均不保证5天的日平均温度^[12]。GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》基于现有气象站点数据，给出了各城市设计温度，如北京为-7.6°C，规范未明确给出设计温度的地区可按式确定。

$$t_{wn} = 0.57t_{ip} + 0.43t_{p,min} \quad (3)$$

式中： t_{ip} 为累年最冷月平均温度，°C； $t_{p,min}$ 为累年最低日平均温度，°C。

考虑到同一地区局地气候的差异性，简单采用同一室外设计温度，将导致某些区域不能满足采暖需求，如北京地区统一按照-7.6°C进行供暖设计，南部平原室内温度能够达标，北部寒冷山区则无法达标。故对于农村“煤改电”而言，上述采暖热负荷指标确定方法同样不够精确。

为准确表征不同地区农村住宅采暖热负荷，本文根据不同地区气候条件、房屋结构和居民生活习惯，对房屋热负荷进行动态计算，从而确定采暖热负荷设计依据。

根据建筑热环境理论^[13-14]，首先要建立建筑热过程数学模型，即所有围护结构的动态传热方程、边界条件及建筑空间内的空气温度变化方程，然后利用状态空间法对围护、家具等进行空间离散，建立所有节点的热平衡方程组，进一步在围护结构与

物性一定、室内计算参数给定、室外气象因素已知情况下，求解房间温度和热负荷^[10,14]。

2.2 建筑热过程模拟数学模型

建筑墙体、楼板、门窗等壁体结构可简化成一维传热问题，动态传热基本方程为：

$$c_p \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial t}{\partial x} \left(k \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (4)$$

式中： t 为壁体内的温度分布， $^{\circ}\text{C}$ ； c_p 为壁体材料的比热， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； ρ 为壁体材料的密度， kg/m^3 ； k 为壁体材料的导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； x 为壁体的厚度方向。

壁体室内侧的边界条件为：

$$-k \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=1} = h_{in}(t_a - t) + q_r + \sum_j h_{rj}(t_j - t) + q_{r,in} \quad (5)$$

式中： h_{in} 为壁体内表面与空气对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ； t_a 为房间室温， $^{\circ}\text{C}$ ； q_r 为壁体内表面吸收透过窗户的太阳辐射热量， W/m^2 ； $q_{r,in}$ 为室内热源辐射至表面的热量， W/m^2 ； h_{rj} 为温度为 t_j 的表面 j 与该表面的长波辐射换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

壁体室外侧的边界条件为：

$$k \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{out}(t_o - t) + q_{r,o} + h_{env}(t_{env} - t) \quad (6)$$

式中： h_{out} 为壁体外表面与室外空气对流换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ； t_o 为室外空气温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $q_{r,o}$ 为壁体外表面吸收的太阳辐射热量， W/m^2 ； h_{env} 为壁体外表面与周围环境表面的长波辐射换热系数， $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ ； t_{env} 为周围环境表面的综合温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

壁体材料将建筑围护成建筑空间，空间内的空气热量交换来源主要包括围护结构内表面传入热量、室内物体产热与空气对流换热、空气直接吸收太阳透窗辐射热量、邻室或室外通风对流换热、供暖系统提供热量等内外热扰。上述热量叠加作用于室内空气，导致空气温度变化关系为：

$$c_{Pa} \rho_a V_a \frac{dt_a}{d\tau} = \sum_j F_j h_{in}(t_j(\tau) - t_a(\tau)) + q_{cov} + q_f + q_{vent} + q_{hvac} \quad (7)$$

式中： $c_{Pa} \rho_a V_a$ 为建筑空间内空气热容， $\text{kJ}/^{\circ}\text{C}$ ； F_j 为建筑空间壁体内表面 j 的面积， m^2 ； t_j 为建筑空间壁体内表面 j 的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； n 为建筑空间壁体内表面个数； q_{cov} 为室内热源对流传给空气的热量， W ； q_f 为室内家具放出的热量， W ； q_{vent} 为室内外或邻室空气交换带入室内的热量， W ； q_{hvac} 为供暖系统送

入建筑空间的热量， W 。

2.3 总热平衡方程组及热负荷求解

由状态空间法对房间内所有围护、家具进行空间离散，并将室内空气温度集总为单一节点处理，根据式(4) - (7)可建立所有空间离散点的热平衡方程组。

求解方程组得到表征房屋热特性的系数和各种热扰作用下的室温，进一步根据室内供暖设计温度，即可得到房屋的采暖热负荷。

以上述理论模型为基础，清华大学建筑技术科学系开发了建筑环境模拟软件^[14]DeST (designer's simulation toolkits)，能够动态模拟计算建筑在各种热扰因素下的采暖热负荷。DeST基于Auto-CAD开发了图形化用户界面，可以直接进行建筑建模和描述定义，同时以气象站逐时气象数据为基础选取典型气象年数据作为外界气象参数，对房间热过程进行动态模拟，大大简化了热负荷计算过程。该软件是最常用的建筑模拟工具。

3 “以热定电”计算“煤改电”增量负荷及户均配变容量

“煤改电”增量负荷及配变容量需求根本上是由房屋采暖热负荷决定的，即“以热定电”，同时与电采暖设备类型相关。

3.1 “煤改电”增量负荷

令采暖需求侧房屋热负荷为 Q_h ，则“煤改电”增量负荷为：

$$P_e = Q_h / \eta \quad (8)$$

式中： P_e 为“煤改电”增量负荷， kW ； η 为电采暖热源电热转换效率。

对于蓄热设备，其效率除了与热源形式相关外，还要考虑到设备仅在谷电时段制热的运行特性，得到考虑谷电时长 T_v 的等效效率。因此，直热、蓄热、空气源热泵3类电采暖设备对应的增量负荷可描述为：

$$P_e = \begin{cases} Q_h / \eta, & (\text{直热}), \\ 24 Q_h / \eta T_v, & (\text{蓄热}), \\ Q_h / \text{COP}, & (\text{空气源热泵}). \end{cases} \quad (9)$$

式中： η 为电采暖热源电热转换效率； T_v 为谷电时长， $T_v = 0$ 时， $P_e = Q_h$ 。

3.2 “煤改电”户均配变容量

户均配变容量是配网规划设计的基础。“煤改

电”户均配变容量应考虑“煤改电”负荷和传统用电负荷对应的配变容量，即：

$$S_T = S_{T1} + S_{T2} \quad (10)$$

式中： S_{T1} 为“煤改电”负荷对应的配变容量； S_{T2} 为传统用电负荷对应的配变容量。

其中，“煤改电”负荷对应的户均配变容量为：

$$S_{T1} = \frac{a \times b \times P_e}{\beta \times \cos \varphi} \quad (11)$$

式中： a 为“煤改电”设备同时系数； b 为“煤改电”设备使用率； β 为配变负载率，一般取0.7； $\cos \varphi$ 为补偿后配变功率因数，一般取0.95。

传统用电负荷配变容量包括现有负荷水平和未来负荷增长两部分：

$$S_{T2} = S_{ex} + S_{inc} \quad (12)$$

式中， S_{ex} 为现有传统用电负荷对应的配变容量； S_{inc} 为传统用电负荷自然增长对应的配变容量，须根据不同规划年进行负荷预测。

传统用电负荷增长可采用成熟方法进行预测计算，本文不再赘述。“以热定电”计算“煤改电”增量负荷及户均配变容量的流程如图2所示。

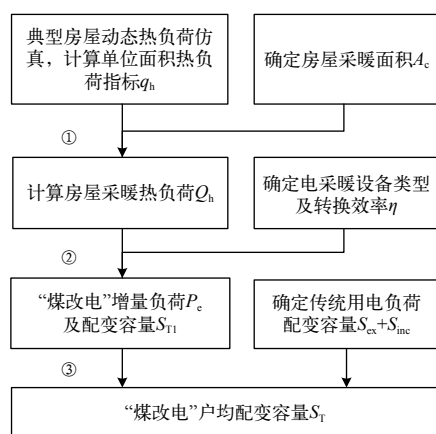


图2 “以热定电”计算“煤改电”增量负荷及户均配变容量流程

4 北京地区“煤改电”算例

图3所示北京南部平原地区农村传统砖瓦结构、瓦楞坡面房顶的平房民宅，木梁下沿平面距地面3 m。以该典型房屋为例，给出房屋采暖动态热负荷仿真、“煤改电”增量负荷及户均配变容量计算过程与结果。

首先采用挤塑聚苯板对房屋外墙进行保温节能改造，围护材料及门窗如表2所示。

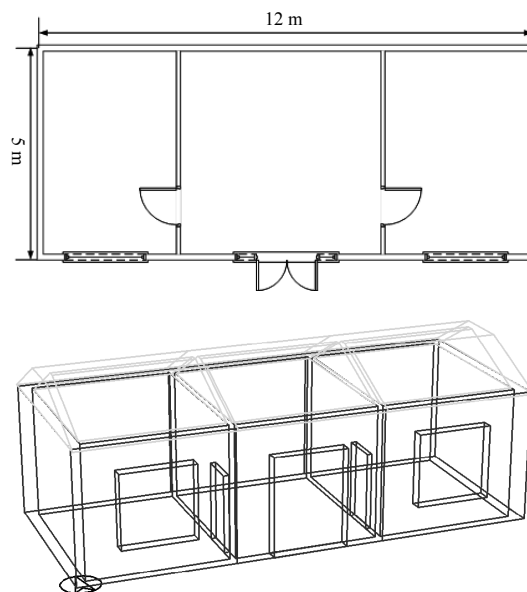


图3 北京农村典型民居结构图

表2 房屋主要围护结构材料

构件	材料
外墙	240 mm实心黏土烧结砖 + 60 mm挤塑聚苯板
内墙	120 mm普通砖内墙
屋顶	瓦材钉挂型（坡面）
地面	40 mm混凝土
天花板	硬质矿棉板
外门	断桥铝阳台外门
内门	单层木质内门
外窗	断桥铝阳台外窗

采用 DeST 建筑环境模拟分析软件，并选用北京南部平原地区历史气象数据，以18℃为室内设计温度，对图3所示北京典型民居采暖季热负荷进行逐时动态仿真模拟，得到单位面积热负荷指标如图4所示。

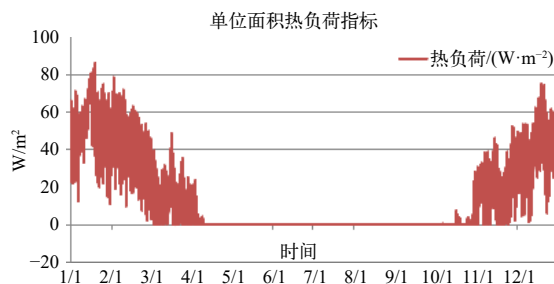


图4 北京南部平原农村民居单位面积热负荷指标

根据 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》中选取供暖室外计算温度时，采用历年平均不保证 5 天的日平均温度，一般不会影响民用建筑的供暖效果。因此，本文同样选用供暖季供暖不保证 5 天来确定热负荷设计指标。

筛选仿真结果，得到供暖不保证的 5 天，分别为 1 月 16、17、18、19 日及 2 月 2 日，采暖季其他时间热负荷统计如表 3 所示。

表 3 房屋采暖热负荷统计

统计项目	统计值
建筑空调面积	60.00 m ²
建筑最大热负荷	4.69 kW
建筑最大热负荷指标	78.08 W/m ²

房屋最大热负荷指标即设计热负荷指标为：

$$q_h = 78.08 \text{ W/m}^2. \quad (13)$$

按户均采暖面积为 100 m² 计算，则户均采暖热负荷为：

$$Q_h = q_h A_c \cdot 10^{-3} = 7.808 \text{ kW}.$$

北京南部平原地区采暖设备选用空气源热泵，假设其电热转换效率 COP = 2.5，则对应的增量负荷分别为：

$$P_e = 3.123 \text{ kW}.$$

考虑到空气源热泵设备一般具有确定的功率等级，因此应按照制热功率不小于 7.808 kW、电功率不小于 3.123 kW 的原则选配合适功率的空气源热泵。

假设户间设备同时系数取 0.8，设备使用率为 100%，配变负载率取 0.7，功率因数取 0.95，则“煤改电”增量负荷对应的户均配变容量为：

$$S_{T1} = 3.76 \text{ kV} \cdot \text{A}.$$

5 结束语

从采暖需求侧和供给侧分析了“煤改电”用户增量负荷的影响因素，提出了一种“以热定电”计算“煤改电”增量负荷与户均配变容量的方法，给出了详细的计算流程，并以北京“煤改电”用户进行算例分析。

“煤改电”增量负荷根本上由需求侧房屋采暖热负荷决定，同时受供给侧电采暖设备类型影响。

不同地区“煤改电”增量负荷计算首先要仿真模拟该地区典型房屋采暖热负荷指标，根据户均采暖面积计算采暖热负荷。

“煤改电”户均配变容量包括“煤改电”增量负荷和传统用电负荷对应的配变容量，传统用电负荷需考虑现有负荷水平和未来负荷增长。

在“煤改电”户均配变容量基础上，仅需统计该地区“煤改电”户数即可快速确定配网容量需求，指导配电网规划设计。

该方法能够准确计算“煤改电”增量负荷与户均配变容量，从而为“煤改电”配电网规划设计提供依据。

参考文献

- [1] 郝晓晓. 住宅小区用电负荷及配变容量的测算[J]. 华北电力技术, 2011(8): 16-18.
- [2] 马振东, 王录. 住宅小区配变容量的合理选择[J]. 农村电气化, 2003, 25(5): 14-15.
- [3] 张静, 王主丁, 张代红, 等. 配电网规划中负荷预测实际问题探讨[J]. 华东电力, 2014, 42(2): 384-390.
- [4] 邢建旭. 基于需要系数法的住宅小区配变容量配置[J]. 浙江电力, 2004(2): 46-50.
- [5] 全少理, 李应闯, 张永斌, 等. 基于负荷特性的户均配变容量分析[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(3): 11-16.
- [6] 寇凌峰, 梁英, 王金丽, 等. 计及负荷增长风险的配电变压器选型方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1384-1389.
- [7] DL/T 5729—2016, 配电网规划设计技术导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [8] 王庆, 周名煜, 王承民等. 考虑用户行为及户均容量优化的配变容量规划[J]. 电气自动化, 2016, 38(6): 44-46.
- [9] 顾天天. 统筹自然增长与跃变增长的区镇负荷预测研究[J]. 电气技术, 2015, (12): 91-93.
- [10] 谢晓娜, 宋芳婷, 燕达, 等. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第 2 讲—建筑动态热过程模型[J]. 暖通空调, 2004, 34(8): 35-47.
- [11] 住房和城乡建设部. CJJ 34—2022, 城镇供热管网设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.4. 29.
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 18883—2022, 室内空气质量标准[S]. 北京: 中国质检出版社, 2022.7.11.
- [13] 住房和城乡建设部, 中国建筑科学研究院. GB 50736—2012, 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.1.21.
- [14] 清华大学 DeST 开发组. 建筑环境系统模拟分析方法—DeST[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 27-50.

作者简介

孙钦斐(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为配用电技术、电力负荷管理等。

(责任编辑:张峰亮)

高供低计分布式光伏用户功率因数调节 电费分析研究

廖涛^{1*}, 张欲晓¹, 张书仓¹, 罗辉勇¹, 曾信义¹, 张卿瑜²

(1. 国网河南省电力公司营销服务中心, 河南 郑州 450051; 2. 国网河南省电力公司
南阳供电公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 用户装有自发自用分布式电源时, 其功率因数调节电费通常较高, 特别是高供低计用户, 其计算较为复杂, 用户难以通过简单判断后制定措施以降低功率因数调节电费, 针对此问题, 文章以某企业电费为例分析功率因数调节电费的组成和计算方法, 阐述了建立功率因数调节电费可采取的措施, 结果表明功率因数调节电费可通过合理的方法进行优化, 为自发自用分布式光伏用户优化计量方案和降低整体电费提供有效参考和理论支撑。

关键词: 分布式光伏; 高供低计; 功率因数调节电费; 正向有功; 正反向无功

中图分类号: TM93

Analysis and Research of Power Adjustment Charge for Distributed PV Users with High Voltage Power Supply and Low Voltage Metering

LIAO Tao^{1*}, ZHANG Yuxiao¹, ZHANG Shucang¹, LUO Huiyong¹, ZENG Xinyi¹, ZHANG Qingyu²

(1. Marketing Service Center of State Grid Henan Electric Power Company, Henan Zhengzhou 450051, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company Nanyang Power Supply Company, Henan Nanyang 473000, China)

Abstract: When the user is equipped with self-generated distributed power supply, the power regulation charge is usually higher. In particular, the calculation of high supply and low metering users is more complex, and it is difficult for users to formulate measures to reduce power factor adjustment electricity charges after simple judgment. In order to solve this problem, this paper analyzes the composition and calculation method of power adjustment charge by taking the electricity charge of an enterprise as an example, and expounds the measures that can be taken to establish power factor adjustment charge. The results show that power regulation electricity charges can be optimized by reasonable methods, which provides effective reference and theoretical support for optimizing metering schemes and reducing overall electricity charges for self-used distributed PV users.

Keywords: distributed photovoltaic; high supply low count; power factor adjustment charge; positive active work; forward and reverse reactive power

专变用户安装自发自用分布式光伏电源后, 一方面能满足企业自身用电需求, 另一方面剩余电量上网后, 可赚取发电上网电费^[1]。然而部分高供低计用户却存在功率因数调节电费居高不下的情况, 企业通常会采取一定措施降低功率因数调节系数, 进而减少功率因数调节电费, 但其计算较为复杂, 难以有针对性地进行调整, 且采用静态无功补偿等方式效果甚微^[2]。针对上述问题, 本文以某企业2023年某月电费为例, 阐述其电费的组成和计算方法, 分析了降低功率因数调节电费和总电费可采取

收稿日期: 2023-09-04

的措施。

1 含自发自用分布式光伏专变用户电费组成

企业电费包含电度电费、基本电费和功率因数调节电费, 其中功率因数调节电费根据用户类型, 可执行的功率因数标准为0.90、0.85或0.80^[3]。电度电费由电度电价和正向有功电量计算获得, 其中电度电价包含输配电价、上网环节线损电价、系统运行费电价、保障居民农业用电稳价新增损益电价和政府基金及附加工商业电价。若用户由电网企业代理购电, 则电度电价还包含代理购电电价。

当用户执行分时电价政策时，输配电价和代理购电价格须细分为尖峰段电价、峰段电价、平段电价和谷段电价。用户用电量一般指有功电量，包括尖峰、峰、平、谷的抄见电量，当用户计量方式为高供低计时，还须考虑变压损耗^[4]，以 250 kV·A 变压器为例，月有功空载损耗为 450 kW·h，月无功空载损耗为 2 190 kvar·h，有功负载损耗为实际用电量的 0.9%，无功负载损耗为实际用电量的 2.8%。

此外，对于分布式光伏自发自用的用户，计算实际功率因数时，不仅须要考虑变压器的无功损耗，同时须要考虑Ⅱ象限无功和Ⅲ象限无功，即用户处于光伏发电余量上网状态时的无功功率也须要考虑在实际功率因数的计算中。

2 企业电量电费计算理论分析

根据电费组成，企业电费计算公式如下：

$$F_{合} = F_{电量} + F_{功率因数调节} + F_{基本} \quad (1)$$

式中： $F_{合}$ 、 $F_{电量}$ 、 $F_{功率因数调节}$ 和 $F_{基本}$ 分别为总电费、电量电费、功率因数调节电费和基本电费。因主要考虑功率因数调节电费，假定用户变压器容量低于 315 kV·A，因此基本电费为 0，电量电费的计算公式如式 (2) ~ (4)。

$$F_{电量} = F_{电度} + F_{附加} + F_{基金} \quad (2)$$

$$F_{电度} = F_{尖} + F_{峰} + F_{平} + F_{谷} \quad (3)$$

$$F_{附加} = F_{线损} + F_{运行} + F_{保障} \quad (4)$$

式中： $F_{尖}$ 、 $F_{峰}$ 、 $F_{平}$ 、 $F_{谷}$ 分别为为尖、峰、平、谷输配电价和代理购电电价的电费和， $F_{线损}$ 、 $F_{运行}$ 、 $F_{保障}$ 、 $F_{基金}$ 分别为上网环节线损电费、系统运行费、保障居民农业用电稳价新增损益和政府基金及附加工商业电费。参加功率因数调节的电费和功率因数调节电费的计算公式如下：

$$F_{参加功率因数调节} = F_{电度} + F_{附加} \quad (5)$$

$$F_{功率因数调节} = F_{参加功率因数调节} \times \beta_{功率因数调节系数} \quad (6)$$

式中： $\beta_{功率因数调节系数}$ 可查询功率因数调节电费计算

表获取。功率因数计算如式 (7) 所示。

$$\varphi_{功率因数} = \frac{P_{抄见} + P_{变损}}{\sqrt{(P_{抄见} + P_{变损})^2 + (Q_{正} + Q_{反} + Q_{变损})^2}} \quad (7)$$

式中： $P_{抄见}$ 为抄见电量尖峰平谷有功电量的和， $P_{变损}$ 为变压器有功损耗，具体计算电价时须要将其分摊至尖峰平谷各段的有功电量中。 $P_{变损}$ 由空载损耗和负载损耗构成，其计算如式 (8)。

$$P_{变损} = P_{变损空载} + P_{变损负载} \quad (8)$$

式中： $P_{变损空载}$ 为跟变压器容量相关的定值，可通过查询获得， $P_{变损负载}$ 与实际用电量相关。式 (7) 中 $Q_{正}$ 、 $Q_{反}$ 、 $Q_{变损}$ 分别为正向无功，反向无功和变压器无功损耗，变压器无功损耗如下：

$$Q_{变损} = Q_{变损空载} + Q_{变损负载} \quad (9)$$

式中： $Q_{变损空载}$ 和 $Q_{变损负载}$ 计算方法可参照有功。

3 企业电量电费实例计算分析

以某企业 250 kV·A 变压器，采用高供低计计量方式为例说明^[5]，企业安装自发自用分布式光伏电源，功率为 200 kW，该企业 2023 年某月电费为 1 708.89 元。

用户抄见电量 $P_{抄见} = 1\ 002$ kW·h，尖峰平谷电量分别为 82、142、326 和 250 kW·h。变压器容量为 250 kV·A，查询空载损耗表可知， $P_{变损空载}$ 和 $Q_{变损空载}$ 分别为 450 kW 和 2 190 kvar，负载损耗比例分别为 0.9%，2.8%。进而可计算得到变压器有功变损为 459 kW，无功变损为 2 218 kvar。尖峰平谷下变压器有功变损须要尖峰平谷抄见电量进行分摊^[6]，可计算得到尖峰平谷的变压器有功损耗分别为 38、65、150 和 206 kW·h，附加变压器损耗后的尖峰平谷电量分别为 120、207、478 和 656 kW·h。

设该月输配电尖峰平谷电价、代理供电尖峰平谷电价、上网环节线损电费电价、系统运行费电价、保障居民农业用电稳价新增损益电价和政府基金及附加费电价分别为 $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ 、 $D4$ 、 $D5$ 、 $D6$ 、

表1 该月各类电价情况

元

类型	D1	D2	D3	D4	D5	D6
电价	0.330 624	0.287 280	0.168 000	0.078 960	0.892 094	0.775 143
类型	D7	D8	D9	D10	D11	D12
电价	0.453 300	0.213 051	0.023 306	0.004 722	0.010 002	0.028 889

D7、D8、D9、D10、D11 和 D12，各数值如表 1 所示。召测该企业计量点电能表无功电量数据得正反向无功分别为 533 kvar·h 和 1 685 kvar·h。将抄见电量、变压器损耗和正反向无功代入式 (7) 可求得功率因数为 0.31，查询功率因数调节系数表可知该月功率因数调节系数为 0.83。由 $F_{\text{电量}} = F_{\text{电度}} + F_{\text{附加}} + F_{\text{基金}}$ 可知，其电量电费可由附加变压器损耗的尖峰平谷电量和表 1 中各类电价的乘积计算得到。将各数据代入式 (2)、(3)、(4) 可求得该月电量电费为 952.95 元。

将该月电量电费去除政府基金及附加费，综合式 (5) 可得到参加功率因数调节电费为 910.77 元，功率因数调节系数为 0.83，因此该月功率因数调节电费为 755.94 元，最终该月总电费为 1 708.89 元。

4 企业电费分析及措施

根据计算过程和结果进行分析。

企业该月功率因数低至 0.31，导致功率因数调节系数达到 0.83，进而在电量电费的基础上增加了近 83% 的功率因数调节电费，从而导致总电费较高。

进一步分析功率因数计算过程可知，导致功率因数偏低的主要原因为参与计算的无功功率过大，其中正向无功为 533 kvar，反向无功为 1 685 kvar，变压器无功损耗为 2 218 kvar，而参与计算的变压器有功损耗仅为 459 kW，故而须采取措施降低反向无功和参与计算的变压器无功损耗。

由于参与计算的变压器无功损耗变化定值部分较大，为 2 190 kvar·h，而变化部分仅占用电量的 2.8%，其下降空间很小，因此考虑降低反向无功。查光伏发电上网关口表可知该月光伏有功发电量为 14 995 kW·h，进而计算出实际功率因数为 0.993 7。功率因数已接近 1，因此反向无功也无太多下降空间。

进一步分析发现，参与功率因数调节电费的实际功率因数之所以偏低，是因为反向无功和变压器无功损耗参与计算^[7]。若须去除计算中的反向无功，

根据功率因数的要求，只有全量上网的光伏用户可以不考虑反向无功，此种情况与用户实际不符。

若须去除参与计算的变压器无功损耗，则须更改计量方式，可将用户高供低计计量方式变更高供高计计量方式。若采用高供高计计量方式，须将计量点从变压器低压侧移至变压器高压侧，其具体分析计算如下。

若不考虑参与计算的变压器损耗，则以尖峰平谷电量为基础计算的电费均无须考虑变压器损耗，仅计算各抄见电量即可。根据尖峰平谷的抄见电量和表 1 中的各类型电价值，可求得： $F_{\text{电度}}$ 为 585.07 元， $F_{\text{附加}}$ 为 38.11 元， $F_{\text{基金}}$ 为 28.95 元， $\varphi_{\text{功率因数}}$ 为 0.412。

查功率因数调节系数表， $\beta_{\text{功率因数调节系数}} = 0.63$ 。可求得功率因数调节电费和总电费为 392.6 和 1 044.74 元。

须要说明的是，由于采用高供高计方式，变压器损耗将由用户承担，变压器损耗包含铁耗和铜耗。由于该用户晚上用电较少，变压器长期处于轻载状态，因此其变压器损耗基本为空载损耗。参考某 250 kV·A 变压器自发自用分布式光伏高供高计用户轻载时 2022 年全年正向无功具体数值如表 2 所示。

该变压器型号为 S11，其有无功空载损耗理论值为有功空载损耗理论值的 4.866 72 倍，可求得有功损耗近似为 327 kW·h。将其按比例分配到尖峰平谷电量时，损耗电量分别为 27，46，107，147 kW·h。各电量数据结合表 1 中的电价数据，计算可得： $F_{\text{电度2}}$ 为 776.34 元， $F_{\text{附加2}}$ 为 50.54 元， $F_{\text{基金2}}$ 为 38.39 元。

将有功、无功电量各数据代入式 (7)，可求得功率因数为 0.33，其功率因数调节系数为 79%。可求得功率因数调节电费和总电费为 653.24 元、1 518.51 元。

$$\Delta F = 1\ 708.89 - 1\ 518.51 = 190.38 \text{元} \quad (10)$$

式中： ΔF 为采用高供高计计量方式节省的电费。综合考虑该企业从 2022 年 8 月至 2023 年 7 月的电

表2 某用户 2022 年正向无功各月电量值

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
正向无功	2 116	1 980	1 252	1 616	1 100	988	1 972	2 228	640	1 500	2 184	1 672
无功电量平均值	1 589											

量和电费数据,可求得全年可节省电费2468元。

高供低计、高供高计考虑损耗和高供高计不考虑损耗的月电费如图1所示。不考虑损耗时电费降低较多,但实际变压器存在损耗,这部分损耗会计入变压器高压侧关口表中,因此计入损耗的高供高计计算结果更合理。须要说明的是,采用高供高计计量方式后,须要对计量设备进行一定的改造,若投运组合式互感器和相应的开关及考虑现场施工,须要投入一定的成本资金。从长远考虑,进行高供高计计量方式变更和设备改造,有一定的经济效益。

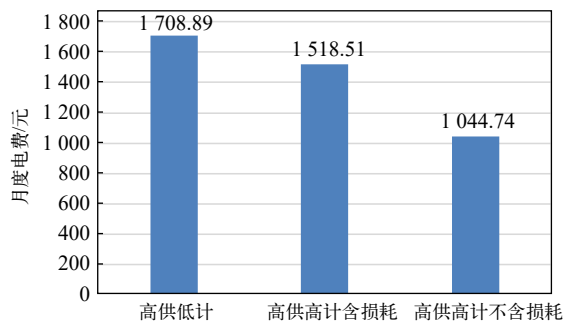


图1 各计量或计算方式下电费情况

5 结束语

分布式光伏用户采用自发自用、余量上网方式接入电力系统时,部分用户存在实际功率因数降低,功率因数调节系数增大,从而产生较大功率因数调节电费的情况,究其原因一方面是因为自发自用用户计算功率因数调节电费时须考虑反向无功电量,另一方面是采用高供低计计量方式时,须将变压器

(上接第5页)

的在线监测技术,对输电线路的运行状态信息参数进行实时采集并分析,及时掌握输电线路的情况,能极大降低线路的故障率,提升特高压输电线路的运行稳定性和可靠性。目前使用较多的监测技术包括环境参数监测技术、杆塔倾斜监测技术、线路覆冰监测技术、图像视频监测技术等。本文主要对当前常见的状态监测技术进行了介绍,分析了在特高压输电线路中的应用。

参考文献

- [1] 冯强强,何宁安,樊长海.南方区域超、特高压输电线路耐张引流板发热原因分析及对策[J].红水河,2023,42(1):

有功和无功损耗叠加在电量和实际功率因数的计算中,而采用高供高计计量方式时可在一定程度改变参与计算的损耗值^[8]。基于此,本文对光伏自发自用用户的电费组成和两种计量方式下的电费情况进行了详细对比,结果表明通过更改计量方式可优化电费方案,为类似专变用户电费计算和成本节省提供有效参考。

参考文献

- [1] 王华伟,程小虎,赵蒙蒙,等.面向分布式光伏消纳的中压配电网储能规划模型和求解方法[J].电力建设,2023,44(9):58-67.
 [2] 徐琼.分布式光伏接入用户侧对功率因数的影响[J].电力与能源,2022,43(1):65-68.
 [3] 车渔汀,冯霞,车丽萍.智能电量电费退补程序的开发和应用[J].农村电气化,2022(6):93-94.
 [4] 魏子翔.试论降低变压器损耗技术措施[J].农村电工,2022,30(2):44-45.
 [5] 杨仕军.投切低压无功补偿装置进行高供低计错误接线检查[J].云南电力技术,2016,44(S2):115-116.
 [6] 黄剑平.基于用户响应行为的峰谷分时电价优化策略研究[D].华南理工大学,2022.
 [7] 倪少军,李双良.煤矿井下供电系统无功补偿和功率因数调节方法[J].煤矿机械,2022,43(3):139-142.
 [8] 孙文达.自发自用分布式光伏项目综合效益评价[D].中国科学院大学(中国科学院大学工程科学学院),2019.

作者简介

廖涛(1988—),男,硕士研究生,高级工程师,技师,一级注册计量师,河南省电机工程学会电测专委会委员,从事新能源、碳计量、碳核算、新型电力系统、营销服务和电能计量检测技术研究,对“双碳”和电能计量研究较为深入。

(责任编辑:张峰亮)

- 105-108,117.
 [2] 魏寅孔,李振华,李振兴,等.特高压直流输电线路合成电场的天气影响因素及预测模型[J].科学技术与工程,2023,23(9):3769-3778.
 [3] 郝亚斐.超特高压输电线路无人机巡检的安全技术研究[J].电力设备管理,2023(9):199-201.
 [4] 程杰,李吉鹏.特高压输电线路状态监测分析[J].光源与照明,2023(1):210-212.
 [5] 马波,季世超,王一帆,等.基于分布式监测的特高压输电线路故障定位方法[J].内蒙古电力技术,2022,40(4):85-90.

作者简介

李程(1989—),男,本科,工程师,现主要从事特高压输电方面的工作。

(责任编辑:张峰亮)

含高比例分布式电源的自愈型配电单元 构建方法研究

施天成¹, 杨欣¹, 李志伟¹, 种亚林¹, 王蕊¹, 王磊^{2*}

(1. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230031; 2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 现有需求响应等相关技术方案并不能较好解决高比例分布式电源并网所造成的问题, 还需要充分考虑负荷的特性, 对基于源荷之间匹配特性的配电网组网的形态进行改进。为此, 文章提出了基于分布式电源互补特性、多元化负荷互补特性和电源-负荷匹配特性的自愈型配电单元的概念, 对自愈型配电单元的分类及构建的方法原则等开展了理论研究, 仿真验证了自愈型配电单元的效果, 为智能配电网规划提供借鉴。

关键词: 分布式电源; 自愈型配电单元; 源荷匹配

中图分类号: TM727

Construction of Self-consistent Power Distribution unit with High Ratio Distributed generation

SHI Tiancheng¹, YANG Xin¹, LI Zhiwei¹, CHONG Yalin¹, WANG Rui¹, WANG Lei^{2*}

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Anhui Hefei 230031, China; 2. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Anhui Hefei 230031, China)

Abstract: With the development of demand response technology, the technical solution proposed only from the standpoint of distributed generation is not well adapted to the current form, and it is necessary to fully consider the characteristics of the load and improve the shape of the network. To this end, the concept of self-consistent distribution unit is proposed, and the definition of self-consistent distribution unit is elaborated, and the methods, principles and indexes of its classification and division are studied, and the final division is based on simulation. Finally, the development objectives and future research directions of related technologies are discussed and prospected to provide some thoughts and references for the development of smart distribution network planning theories and technologies under the new situation.

Keywords: distributed power supply; self-consistent distribution unit; division method

0 引言

在“双碳”目标的指引下, 我国分布式电源装机得到了爆发式增长。然而, 出力具有随机性和间歇性的分布式电源大量并网将给电网的安全稳定运行带来了系列问题^[1-3]。虽然, 现有文献对接入配电网中的分布式发电的选址定容等规划问题开展了深入研究, 一定程度上解决了高比例分布式发电对配电网造成的不利影响^[4-5]。但是, 随着分布式发电并网比

基金项目: 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院基金 (B6120922000B)

收稿日期: 2023-10-03

例的进一步提升以及需求响应激励政策的推广, 含高比例分布式电源的配电网的运行特性将变得异常复杂。为此, 需要在配电网的规划阶段, 开展运行特性研究^[6-7]。针对高比例分布式电源并网的配电网, 可将配电网按照电压的不同采用分层规划方法, 针对集中控制过程的复杂性, 可采用集群控制方法^[8-10]。

因此, 本文在充分计及新型配电网中高比例可再生能源与负荷在时空上的互补耦合特性, 通过集群方式解决可再生能源能源并网和消纳问题^[11]。从分布式电源互补特性、多元化负荷互补特性和电源-负荷匹配特性 3 个角度展开分析, 以集群结构为切入点, 提出自愈型配电单元的概念, 然后对分布式

可再生能源发电特性及需求响应机制下的负荷特性进行充分的分析，依据源、荷特性进行自治型配电单元的构建，结合仿真分析进行佐证。

1 自治型配电单元的概念

当前，为解决高比例分布式电源接入新型配电网所造成的一些列问题，电力系统中主要采用集群、微电网、虚拟电厂等新技术。微电网（micro-grid, MG）主要由一定空间范围内的分布式发电、储能装置和负荷等共同组成的小型发配电系统^[12-13]。虚拟电厂（virtual power plant, VPP）是一套高度智能的能源管理系统^[14-15]，可以很好的实现其内部的分布式资源的聚合和协调优化，使其可以作为一个特殊电厂参与电力市场和电网运行的电源协调管理系统。分布式发电集群（distributed generation cluster, DGC）并没有一个明确的定义，但是一般多针相同类的单元设备所组成的一个集合体。可理解为地理空间或电气上相互接近或形成互补关系的若干分布式发电单元集合所构成，易于实现运行控制的垂直化、扁平化，其划分的依据更侧重于分布式电源之间的聚合^[16-17]。

自治型配电单元（self-consistent power distribution units, SCPDU）是本文在 DGC 的基础上构建的一种新型的配电单元形式。所谓自治，就是在空间和时间上便于源荷的平衡，减少因负荷过高而停电或冗余电源的一个概念。当负荷过高时，对电源、需求侧的负载进行平衡计算，多方达成共识，自动降低非重要负荷（如空调降低温度），达成平衡，保障可靠性；当负荷过低时，加大生产或储能，减少电力损失。自治是更敏感的，在负荷过高或不平衡时，能够协同供需侧多点达成用电“智能合约”，自我形成平衡。类似虚拟电厂关注点在储能、微电网关注点在自治电网，而 SCPDU 关注点聚焦与分布式发电和用电终端的智能交互响应。

显然，SCPDU 仍然属于“集群”的范畴。相比传统集群仅考虑分布式发电特性的构建方法，SCPDU 的集群构建则不仅仅关注分布式发电的特性，还要更多的考虑负荷的特性，尤其在需求响应发展迅速的当下。某种意义上也可以将自治型配电单元称为“源荷集群”或“集群”。另外，从某种程度上而言，也可将其视为大量接入分布式电源的智能

电网。实现了物理空间和逻辑上大量分散资源接入和汇集的分布式智能电网。可见，SCPDU 更加强调“分布式+智能”：分布式能源靠近负荷，利于实现就地平衡和就近消纳；用户将从刚性电力消费者变为具有负荷调节能力和需求弹性的“产销者”；形成“源网荷储”灵活互动的一体化系统。其特征是：小型、分散、自平衡。所谓自平衡，指能源平衡范围是弹性的、可伸缩的，没有“微电网”的物理边界特征和“增量配网”的产权特征，资源调节的范围更广、程度更深、灵活性更强。从覆盖的对象看，无论是“增量配电网”试点还是各类“微网”或综合能源示范项目、需求侧响应试点项目，都是以大工业用户作为参与主体，调节对象数量有限。“自治型配电单元”不仅仅强调大用户的调节能力，还要更加着力提高配网中的中小型用户负荷调节能力。从技术上而言，对配电网主动感知能力和调节能力提出了更高的要求，尤其是连接用户的低压配电网，促使“配电”和“用电”的联系更加紧密，提高配电网对分布式新能源的主动响应和服务能力。自治型配电单元与其他相关技术比较方案如表 1 所示，其构成示意图如图 1 所示。

2 基于源荷特性匹配的自治型配电单元构建

配电网中的多元化分布式电源和负荷之间存在一定的关联性，电源之间、负荷之间存在互补特性，电源-负荷之间存在匹配特性，关联程度的大小对供需双侧的运行和协同产生差异化的影响。同时，由于可再生能源的渗透不断增加，基于集群模式的自治型配电单元可实现不同电压等级及不同区域内分布式电源和负荷的最佳匹配。通过聚类划分所得到的集群分成物理集群和虚拟集群 2 种，因后者不存在实际集群管控装置的集群，具有灵活、适应性好的优点，将成为未来电力系统发展的方向。

2.1 源荷互补匹配理论

在电力系统中，不同类型的电源出力、负荷用电规律不同，其在时间尺度上的形态可以用典型日源荷曲线来描绘。不同特性的电源出力曲线、负荷曲线叠加之后，得到的新的曲线或许会比两者各自的曲线都要平滑，因为它们在出力、用电时间上具有一定的互补性。因此，为了定量的研究电源与电源、负荷与负荷之间的这种互补性，定义互补度为

表1 自治型配电单元与相关技术解决方案比较

名称	主要构成要素	特征	地理范围	运行方式	接入范围	接入形式
微电网	多类型元件（分布式发电、储能、负荷等分布式资源）	源-储-荷构成完整的小型电力系统，实现内部自我控制和自治管理。	接近	并网/离网	配电网	物理集群
虚拟电厂	多类型元件（分布式发电、储能、负荷等分布式资源）	不同分布式资源的聚合，具有调度控制功能。	分散	并网	配电网/输电网	物理集群
分布式发电集群	同类型元件（如：光伏集群、风电集群）	同类型元件的聚合，解决分布式发电并网运行和管理调控的难题	接近	并网	配电网/输电网	物理/虚拟集群
自治型配电单元	多类型元件（分布式发电、储能、负荷等分布式资源）	异类元件的聚合，尽量实现内部能量的平衡。即使无法完全平衡，也要使功率差额尽可能稳定。	接近	并网	配电网	物理/虚拟集群

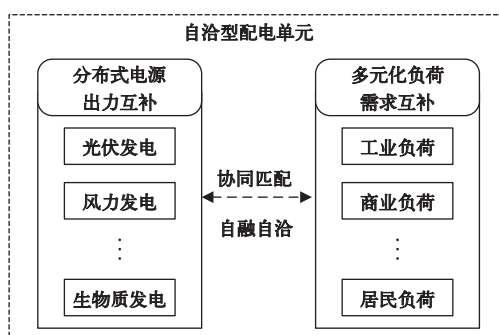


图1 自治型配电单元构成示意图

不同电源、用电设备的典型日出力曲线、负荷曲线之间的互补程度。不同源荷曲线的互补程度越低，互补度越小；互补程度越高，互补度越大；当源荷曲线能够峰和谷互补时，互补度最大。以负荷互补度的计算方法为例，电源互补度计算方法类似。电力源荷有功互补评估指标包含纵向互补度 P_V 及横向互补度 P_H ，纵向互补度是指各时刻不同源荷大小之和的平均值与和的最大值之比，反映的是不同源荷曲线叠加后，新源荷曲线整体的平滑程度。横向互补度是指各时刻不同源荷大小之和的最小值与和的最大值之比，反映的是不同源荷曲线叠加后新源荷曲线的峰谷差大小。互补度综合评估指标由纵向互补度 P_V 及横向互补度 P_H 2 个指标组成，从而更加准确全面的描述源荷有功功率曲线间的互补程度。其计算公式为：

$$\varphi_P = P_V P_H = \frac{\sum_{t=1}^n \sum_{x=1}^m P_{x,t}}{n \cdot P_{\Sigma, \max}} \cdot \frac{P_{\Sigma, \min}}{P_{\Sigma, \max}} \quad (1)$$

式中： n 为统计周期内的时刻数； m 为各时刻参与匹配计算的源荷数目； $P_{x,t}$ 为 t 时刻源荷设备 x 的有功功率； $P_{\Sigma, \max}$ 和 $P_{\Sigma, \min}$ 分别为统计周期内源荷联合有功输出的最大值和最小值。

同理，类似源荷有功功率曲线互补度的定义，也可以定义源荷无功功率曲线互补度 φ_Q ，其计算公式为：

$$\varphi_Q = \frac{\sum_{t=1}^n \sum_{x=1}^m Q_{x,t}}{n \cdot Q_{\Sigma, \max}} \cdot \frac{Q_{\Sigma, \min}}{Q_{\Sigma, \max}} \quad (2)$$

式中： $Q_{x,t}$ 为 t 时刻源荷设备 x 的无功功率； $Q_{\Sigma, \max}$ 和 $Q_{\Sigma, \min}$ 分别为统计周期内源荷联合无功输出的最大值和最小值。

2.2 自治型配电单元的构建原则

自治型配电单元的构建需遵循如下原则。

自治型配电单元构建对象依照电气距离的大小进行集群构建，一个自治型配电单元内的各构建对象必有电气联系，且各对象的电气距离相近，以便进行功率互补交换；可通过各构建对象之间的无功电压灵敏度体现各构建对象的距离远近程度。

自治型配电单元内部的各元件的空间距离相近，利于进行线路扩展来增加元件间功率交流。

自治型配电单元内部的各构建对象的净负荷特性尽量具有互补功能，对外特性相对较为平坦，实现自治型配电单元内部有功供需平衡，从而增强各自治型配电单元之间的功率协调能力。

自治型配电单元内部各节点的无功供需应尽量维持平衡，避免出现过电压情况。

可采用基于源荷互补特性的模块度指标 ρ_0 评价自治型配电单元构建效果，该指标能够反映网络构建的最优分区数目及网络的结构强度，其具体定义如下：

$$\rho_0 = \frac{1}{m} \sum_{i \in \Phi} \sum_{j \in \Phi} \left[\left(A_{ij} - \frac{A_i A_j}{m} \right) \delta(i, j) \right] \quad (3)$$

式中： A_{ij} 为两个节点 i 和 j 之间边的权重； A_i 、 A_j 分别为节点 i 、 j 的权重，表示与节点 i 、 j 相连的所

有边的权重之和； $m = \sum_{k \in \Phi} A_k$ 为网络中所有节点的权重之和， A_k 为任一节点 k 的权重； Φ 为网络中的节点集合； $\delta(i, j)$ 采用基于源荷互补特性的修正邻接矩阵表述，即：

$$\delta(i, j) = \frac{\varphi_{P,i} \cdot \varphi_{P,j}}{\sum_{i,j \in \Phi} (\varphi_{P,i} \cdot \varphi_{P,j})} \frac{\varphi_{Q,i} \cdot \varphi_{Q,j}}{\sum_{i,j \in \Phi} (\varphi_{Q,i} \cdot \varphi_{Q,j})} \quad (4)$$

3 自治型配电单元的构建方法

为解决基于复杂网络理论中的自治型配电单元构建，可采用近年来发展比较迅速的社团发现算法。该算法在人工智能、模式识别各领域都取得了广泛的应用和成果，并且已被逐渐引入到电力网络的复杂行为研究中。社团就是网络中部分顶点的集合，但该集合内部顶点之间具有紧密的耦合关系，对外则相对稀疏，即不同社团之间的为较为松散的耦合关系。基于上述分析，将电力系统构建为若干社团结构，如图2所示。

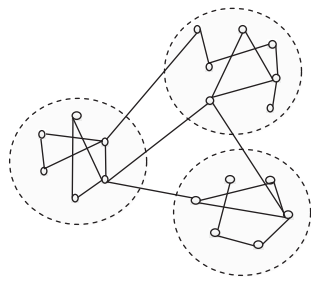


图2 虚拟集群示意图

则基于 Fast-Newman 算法的网络集群构建步骤如下所示：

步骤 1，对具有 n 个节点的网络集群进行初始

化构建，将每一节点当作一个集群，则初始集群有 n 个；

步骤 2，依次将具有边连接关系的两个群进行合并，计算合并后的模块度增量 $\Delta\rho$ ；

$$\Delta\rho = A_{ij} - \frac{A_i A_j}{\sum_{k \in \Phi} A_k} \quad (5)$$

根据贪婪算法的思想，每次应沿使着 $\Delta\rho$ 最大的方向合并；

步骤 3，更新操作，重复执行步骤 2，直至网络成为一个群；

步骤 4，选择对应 ρ 最大的集群个数进行分解，得到的自治型配电单元构建结构就是基于此方法的最优结构。

4 仿真分析

利用本文所提出的方法对某 10 kV 线路进行自治型配电单元构建仿真分析，选用社团构建算法 Fastnewman 算法进行集群构建演示，通过模块度指标对集群构建的质量以及自治型配电单元个数进行衡量，所得自治型配电单元划分结果如图3所示。

选择空间距离和基于电压无功耦合程度的电气距离为依据进行自治型配电单元构建并与基于本文所述方法的自治型配电单元构建结果进行对比，计划将空间距离与电气距离综合较近的节点划入同一集群。对两距离进行归一化处理各取 0.5 权重相加，所得集群结果如表2所示。

从指标上可以看出，采用计及源荷匹配特性并考虑电气距离和空间距离耦合的自治型配电单元模块度显著提高，说明集群在结构上更加合理，内部

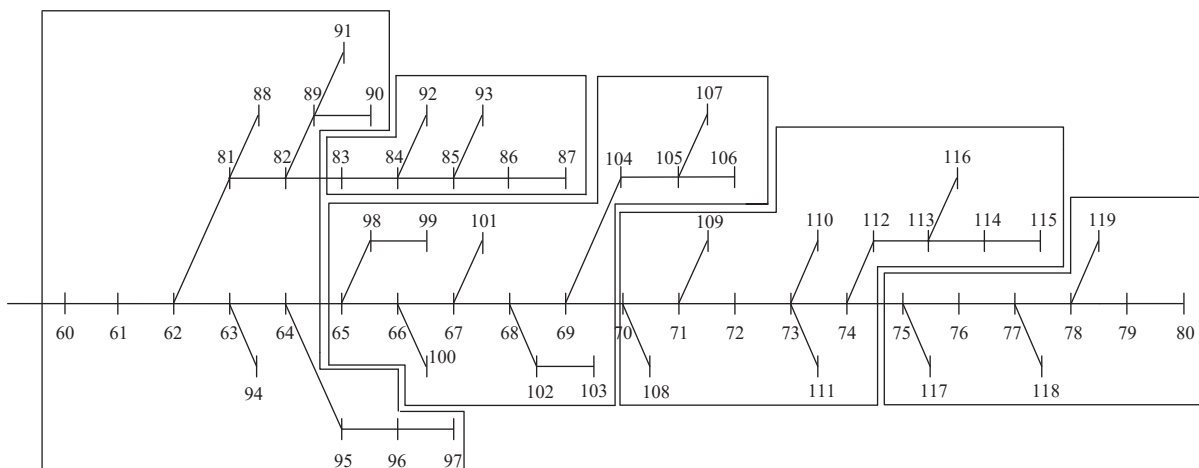


图3 基于源荷匹配的自治型配电单元构建结果示意图

表2 自洽型配电单元构建指标

	空间距离	电气距离
不计源荷匹配特性	0.405 0	0.394 5
计及源荷匹配特性	0.491 1	0.498 0
计及源荷匹配特性+综合指标	0.523 7	

联系上更为紧密。综合构建结果与单一依据构建结果进行比较,将有变动的节点对展示如表3所示(为便于比较,表中对电气距离进行了归一化处理)。

表3 变动节点间数据

节点对	空间距离	电气距离
68-69	582.47	0.388 9
69-70	1 117.88	0.573 4
81-82	876.95	0.689 7
82-83	2 491.13	0.953 9
74-112	1 292.05	0.206 6

从表3可以看出,节点对68-69、81-82的空间距离以及电气距离比节点对69-70、82-83的要小,因而将68-69节点对、81-82节点对划入同一自洽型配电单元,将69-70、82-83节点对划入不同自洽型配电单元;节点对74-112,虽然其空间距离较远,但是其电气距离很近,综合比较,将它们划入同一自洽型配电单元较为合理。

5 结束语

本文将自洽型配电单元定义为考虑源荷特性匹配的源荷集群,相比微电网、分布式发电集群及虚拟电厂等现有技术手段,其具有更高等级的自治能力,能够促使“配电”和“用电”的联系更加紧密,显著提升配电网对分布式新能源的主动响应和服务能力。在传统分布式发电集群的基础上,充分考虑到负荷之间的特性匹配、分布式电源之间的特性匹配以及分布式电源与负荷特性的匹配,本文提出了基于源荷特性匹配特性及综合评价指标的自洽型配电单元构建方法,通过算例分析,验证了本文所述方法的有效性,为智能配电网的规划建设典型理论基础。

参考文献

- [1] 姜涛,张东辉,李雪,等.含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制[J].电力自动化设备,2021,41(9):

102-109.

- [2] HOOSHYAR H, BARAN M E. Fault analysis on distribution feeders with high penetration of PV systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(3): 2890-2896.
- [3] RIZWAN M, HONG L, Waseem M, et al. Sustainable protection coordination in presence of distributed generation with distributed network[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019,30(E1): 1-23.
- [4] 丁明,刘先放,毕锐,等.采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J].电力系统自动化,2018,42(15): 47-52, 141.
- [5] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等.双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J].高电压技术,2021,47(9): 3036-3046.
- [6] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1): 1-8.
- [7] XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(1): 2-8.
- [8] 叶林,张慈杭,汤涌,等.多时空尺度协调的风电集群有功分层预测控制方法[J].中国电机工程学报,2018,38(13): 3767-3780.
- [9] JIAO Tianli, ZHANG Jianmin, LI Xiong, et al. Spatial clustering method for large-scale distributed user photovoltaics based on spatial correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019,43(21): 97-102.
- [10] 路朋,叶林,裴铭,等.风电集群有功功率模型预测协调控制策略[J].中国电机工程学报,2021,41(17): 5887-5899.
- [11] 卓振宇,张宁,康重庆,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9): 171-191.
- [12] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1): 57-70.
- [13] SAWLE Y, GUPTA S C, BOHRE A K. Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018,81: 2217-2235.
- [14] 卫志农,余爽,孙国强,等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力系统自动化,2013,37(13): 1-9.
- [15] MAVROTAS G. Effective implementation of the E-constraint method in multi-objective mathematical programming problems[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009,213(2): 455-465.
- [16] 盛万兴,吴鸣,季宇,等.分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J].中国电机工程学报,2019,39(8): 2175-2186.
- [17] 丁明,方慧,毕锐,等.基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J].电机工程学报,2019,39(8): 2187-2201.

作者简介

施天成(1990—),男,博士,工程师,主要研究方向为电网规划设计。

杨欣(1985—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网规划设计。

(责任编辑:张峰亮)

基于单防区振动光纤的高压电缆防外破 监测预警装置研发

冯忠奎*, 李 阳, 车俊儒, 张 哲, 赵彦龙

(国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 外破电缆线路故障跳闸的重要原因, 针对目前外破盯防依赖人工的问题, 研制了基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置, 利用分布式光纤振动传感器的机械振动传感能力, 结合信息传输和告警技术, 能够有效识别出多种型号的外破风险源, 并将告警信息推送至外破盯防人员微信, 将电缆外破被动盯防转为主动预警, 有效预防外力破坏事件, 提高供电可靠性。

关键词: 单防区振动光纤; 高压电缆; 防外破监测预警

中图分类号: TM757

Development of a Monitoring and Warning Device for External Damage Prevention of High-voltage Cables Based on Single Zone Vibration Optical Fiber

FENG Zhongkui*, LI Yang, CHE Junru, ZHANG Zhe, ZHAO Yanlong

(State Grid Shandong Electric Power Company Zibo Power Supply Company, Shandong Zibo 255000, China)

Abstract: In view of the current problem of uninterrupted staring and defensive relying on the tactics of the sea of people, this paper develops a high-voltage cable anti-external breaking monitoring and early warning device based on the vibration optical fiber of the single defense area, using the mechanical vibration sensing capability of the distributed optical fiber vibration sensor, combined with information transmission and alarm technology, can effectively identify a variety of types of external breach risk sources, and push the alarm information to the external breach and defense personnel WeChat, turn the passive monitoring of the cable into active early warning, and effectively prevent external damage incidents. Improve power supply reliability.

Keywords: single defense zone vibrating optical fiber; high voltage cables; anti-external breach monitoring and early warning

随着城市现代化建设步伐的加快, 现代的城市要求是地上空间无电力电缆, 架空线路入地是电力线路发展的重要趋势。但是城市施工的增加, 工程建设单位在施工过程中, 对电力设施的保护意识比较薄弱, 外力的破坏一直威胁配电网的安全运行, 频繁造成电缆故障而停电, 电缆受外力破坏的次数越来越多, 而且逐年增加, 对配电网的安全供电造成极大的影响^[1-2]。传统的人员盯防的巡检方式以及加装电缆标示桩的方法, 须要耗费大量人力进行不间断盯防, 也无法实现主动预警, 因此不能从根本上解决外破跳闸事故的发生^[3-4]。针对存在的问题, 本文开展利用基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置研发, 从而代替人工盯防, 既能提高工作效率, 又可以节约大量人力物力。

收稿日期: 2023-09-07

1 监测预警装置的原理

光纤作为信息传输通道, 还能作为传感器。将光纤敷设在电缆通道中, 便可以借助光信号获取电缆的应力、应变等数据, 达到实时监测工况的目的。光波在光纤中传输时, 光波会产生散射, 光纤振动传感技术便是利用光时域反射的干涉机理, 来对电缆工况开展实时监测, 当电缆附近产生外部扰动, 便会在光纤附近产生振动, 造成光纤散射光的相位发生变化, 光相位变化会导致光强变化。光纤附近存在振动时, 线芯会形变, 导致线芯长度和折射率发生变化, 造成光纤中光的相位变化。根据变化关系建立数据关系对应模型, 对外破信号识别判断, 从而对同沟敷设高压电缆外破进行监测。

2 监测预警装置的结构

国网山东淄博供电公司列支群创项目资金，开展基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置研发（编号 2023Q-3），成功研制出基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置，由 8 部分组成：振动光纤主机、终端包、光纤尾纤、报警主机、总线报警键盘、声光警号（室外）、电源、振动光缆。

2.1 振动光纤主机

根据电缆安装位置和安装方式的不同，振动光纤主机安装方式可以选择为挂网、地埋、嵌墙 3 种方式。安装完成后，监控区域为 1 台设备可同时设置 4 种介质。采用网络通信方式，报警方式有振动、断纤、防拆 3 种形式，设备供电采用 DC 12 V 供电方式。使用环境为温度 $-40\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，适用于绝大多数地区的电缆，如图 1 所示。



图1 振动光纤主机

2.2 终端包

每个防区配置终端包 1 个，终端包可承受 $16\text{ N}\cdot\text{m}$ 的冲击，环境温度为 $-20\sim+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，能承受 $>1000\text{ N}$ 的轴向拉伸力，耐受 2000 N/cm 压力 1 min ，抗压扁能力强，能承受 $16\text{ N}\cdot\text{m}$ 冲击 3 次；沉入 1.5 m 深的水中浸泡 24 h ，盒内绝缘电 $\geq 2\times 10\text{ M}\Omega/500\text{ V}$ （DC），绝缘电阻满足要求。使用环境为温度 $-40\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，适用于绝大多数地区的电缆。

2.3 光纤尾纤

每个防区配置光纤尾纤 1 条，光纤尾纤接口类型为 FC/APC，长度 1.5 m ，工作波长 1550 nm 。

2.4 报警主机

中文液晶操作键盘，采用高速数字通信方式，兼容 Contact ID 数字通信协议；主机具有看门狗功能，可以防止死机；智能语音提示，内置语音模块，进行语音报警；可对系统进行各种编程设置，如报警声方式、防区类型、远程控制、报警电话号码、电话线检测等。可自定义外破报警延时及鸣笛时间。主机具有充电电路，可内置 DC 12 V 密封铅酸电池，停电不停机。电池低压自动断电功能，避免电池因电压过低无法充放电而报废，如图 2 所示。



图2 报警主机

2.5 振动光缆

选取单模光纤作为信息通道，将信号发送至主机，对电缆外力破坏开展实时监测，基于阈值大小对告警级别开展设置，由此分辨大型挖掘机、机械打桩机、拖管机、手持机械、施工勘探机。采用 4 芯单模通信光缆，允许弯曲半径为静态 10 倍光缆外径、动态 20 倍光缆外径，纤芯为国标 G652D 纤芯。

3 应用效果

为验证系统能否对外破异常信息准确告警，以 xx 供电公司在建道路维修路径的光缆为对象，在 xx 供电公司的 20 条线路加装基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置，并对应用基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置情况进行了跟踪、记录，如表 1 所示。可以得出结论，根据施工类型的不同，施工点距离光纤 $0.5\sim 0.6\text{ m}$ 时，

表1 用新型仪器实施后正确率对比表

序号	线路名称 (电缆)	发送 微信 / 条	接收 微信 / 条	报警 时间 / s	报警 距离 / m	施工类别
1	辉源线	12	12	1.93	0.55	手持机械
2	消防线	10	10	1.78	0.56	拖管机
3	铝厂线	19	19	1.94	0.54	大型挖掘机
4	瑞景线	17	17	1.93	0.56	手持机械
5	高创线	16	16	1.91	0.53	拖管机
6	南师线	14	14	1.84	0.55	机械打桩机
7	中石线	13	13	1.86	0.53	手持机械
8	化北线	15	15	1.81	0.52	拖管机
9	南村线	10	10	1.81	0.55	施工勘探机
10	开元1线	9	9	1.78	0.51	手持机械
11	学东线	12	12	1.94	0.52	大型挖掘机
12	区府线	12	12	1.85	0.51	大型挖掘机
13	闫桥线	8	8	1.87	0.54	手持机械
14	海信线	4	4	1.84	0.56	大型挖掘机
15	世纪线	7	7	1.90	0.51	机械打桩机
16	开发1线	5	5	1.89	0.55	手持机械
17	化机线	13	13	1.75	0.55	大型挖掘机
18	小庄线	17	17	1.81	0.56	拖管机
19	盛安线	7	7	1.91	0.53	手持机械
20	纤维线	9	9	1.89	0.55	大型挖掘机

在2 s以内全部触发报警信号，正确报警率100%。

检测到存在外破风险的施工后，系统可向外破盯防人员微信推送报警信息，实现主动预警，如图3所示。



图3 基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置的微信信息推送

4 结束语

本文设计并构建了基于单防区振动光纤的高压电缆防外破监测预警装置，该装置能够有效识别出拖管机械、挖掘机、打桩机等多种类型的振动源，在短时间内上传后台，并将告警信息推送至外破盯防人员微信，将电缆外破盯防转为主动预警，有效预防外力破坏事件，实现电缆通道的智能化监测，避免了电缆外破事故的发生，提升了电缆精益化运维水平，提高供电可靠性。

参考文献

- [1] 陈太艺, 曾繁祎, 周川, 等. 基于光纤测振与视频监控的区间电缆防外破系统[J]. 电力与能源, 2023, 44 (3): 247-249, 286.
- [2] 汤向华, 施雄杰, 虞晓磊, 等. 基于无线智能振动传感器的地理电缆防外破监测预警系统设计[J]. 电工技术, 2023 (7): 109-111, 114.
- [3] 徐涛. 基于分布式光纤振动传感的高压电缆防外破监测预警系统应用[J]. 东北电力技术, 2020, 41 (6): 30-33.
- [4] 杨纯, 李垠韬, 宋伟, 等. Φ -OTDR 光纤传感电缆防外破监测数据预处理方法[J]. 激光与红外, 2021, 51 (4): 486-492.

作者简介

冯忠奎(1988—), 男, 硕士研究生, 长期从事配电运检管理。

(责任编辑: 刘艳玲)

资讯

山东威海公司：深挖数据价值 推动一码办电

2023年9月25日，国网山东威海供电公司通过深挖“鲁通码”等政务共享数据价值，对网上国网云终端完成适应性改造，推动身份三要素“一码认证”，并开发“一码交费”应用场景，实现了在全市范围内各营业厅“亮码交费”。

在“鲁通码”办电模式下，客户可以通过营业厅的自助服务终端、云终端等8类设备，使用“手机亮码”完成身份认证，系统即可自动获取客户的姓名、身份证号、手机号等基础信息，同步获取电子证照，实现新装增容、更名过户等各类临厅办电业务即时受理，实现了无证明办电，大幅提高办电效率。

信息来源：国网山东省电力公司

输电铁塔防误登智能脚钉研究与应用

王磊*, 许建清, 金桂如

(国网江苏淮安供电分公司, 江苏 淮安 223001)

摘要: 为避免误登带电杆塔引起的触电伤亡事故, 设计了一种新型输电铁塔防误登智能脚钉, 主体结构包括脚钉主体、主控制箱、数据后台3部分, 若误登带电杆塔, 脚钉上安装的传感器发出信号, 随即发出警告声音并后台提醒, 避免误登塔事件的发生。

关键词: 输电铁塔; 防误登; 脚钉

中图分类号: TM752

Research and Application of Intelligent Foot Pins for Preventing Mistaken Climbing of Transmission Towers

WANG Lei*, XU Jianqing, JIN Guiru

(State Grid Jiangsu Huaian Power Supply Branch, Jiangsu Huaian 223001, China)

Abstract: The polarity detection of transformers is an important task to ensure the accuracy of electrical energy measurement. This article designs a new type of intelligent foot nail for preventing accidental climbing of transmission towers. The main structure includes three parts: the foot nail body, the main control box, and the data background. If a live tower is accidentally climbed, the sensor installed on the foot nail emits a signal, and then sends out a warning sound and the background reminds to avoid the occurrence of accidental climbing events.

Keywords: transmission tower; anti misregistration; foot nail

随着电力行业的快速发展, 输电铁塔的建设和使用数量不断增加, 确保这些设施的安全运行至关重要^[1]。然而, 由于输电铁塔分布广泛、外形相似, 有时工作人员会登上错误的铁塔, 这不仅浪费了时间和资源, 还可能引发安全隐患。此外, 非法攀登铁塔的情况也时有发生^[2]。这些误攀登事件不仅可能引发安全事故, 还可能对整个电力供应产生严重影响, 目前, 尚无误登输电杆塔预警装置的研究。本文开展输电铁塔防误登智能脚钉研究, 在出现误攀登时, 后台系统能够快速感知, 并防止未经授权的人员非法攀登并迅速采取措施。该脚钉集状态感应、防误登实时报警、后台感知、警示设备、联网管理于一体, 若误登带电杆塔, 检修人员脚踩脚钉, 脚钉上安装的传感器发出信号, 随即发出警告声音并后台提醒, 避免误登塔事件的发生。

1 输电铁塔防误登智能脚钉结构框架

智能脚钉由脚钉、传感器、电源、报警设备等装置组成, 各装置功能如下:

收稿日期: 2023-09-13

脚钉内置的高精度多功能压力、震动传感器可实时感知是否人员登塔;

采用超低功耗设计, 利用太阳能电板为内置蓄电池;

误登塔时, 报警设备作用, 及时提醒作业人员; 前端脚钉和后端终端采用无线通信技术, 后台设置线路是否停电, 是否可登塔作业, 如误登杆塔, 前端脚钉收到信号后报警并后台实时收到提醒。

装置的总体框架如图1所示。

2 输电铁塔防误登智能脚钉各部件设计方案

2.1 脚钉主体

采购电容传感器原器件, 设计并绘制传感器控制电路, 根据传感器的特性和控制电路的要求, 编译控制程序, 以实现传感器信号的处理和控制。

设计脚踏图纸, 绘制L型塑料脚踏的图纸。图纸详细标注脚踏的形状、尺寸、材料以及制作细节等。在获得了详细的设计图纸后, 采用3D打印技

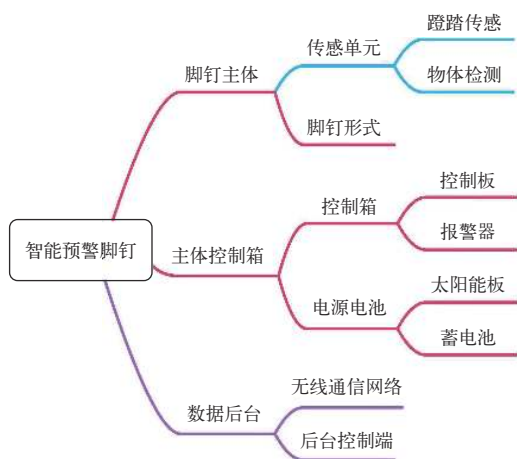


图1 输电铁塔防误登智能脚钉结构框架

术进行脚踏的制作。3D 打印技术不仅可以快速制作出脚踏原型，还能精确地按照设计图纸进行制作，保证了制作的质量。在打印完成后，小组成员进行了毛边的修剪，确保脚踏的平滑，以便后续的组装工作。最后进行脚踏的组装和紧固，按照设计图纸组装，确保脚踏的稳定性和坚固性。对防护结构的承重能力进行测试，具体数据如表 1 所示，承重能力均高于 250 kg，满足人员体重要求。

表1 L 型塑料脚钉承重能力测试 kg

项目	1	2	3	4	5
承重能力	350	250	280	340	320

2.2 主体控制箱

控制器方面，选择 8051 单片机作为主控芯片，绘制电路图时，充分考虑 8051 单片机的特性和项目需求，将所有外设、存储器和扩展接口合理布局，进行电路板的制作和测试。在主控电路板测试通过后，编写包括初始化、输入输出控制、数据运算等在内的主程序。在编写过程中，借助了 Keil C51 等开发工具，对程序进行编译、调试和优化，确保程序的正确性和可读性。

声光报警器方面，设计控制模块，将各个控制模块按照预设的连接方式和顺序进行连接。在连接过程中，小组成员注重线路的耐压和抗干扰能力，以确保系统的稳定运行。对不同的场景，开展有效距离测试，如表 2 所示。夜间农田位置，装置的告警能力最好。自动声光告警装置的灯光信号有效传

表2 输电铁塔防误登智能脚钉报警信号有效距离测试

距离/ m	白天 农田		白天城 镇街道		夜间 农田		夜间城 镇街道	
	灯光 信号	声音 信号	灯光 信号	声音 信号	灯光 信号	声音 信号	灯光 信号	声音 信号
10	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮
20	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮
30	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮
40	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮
50	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮	清晰	响亮
60	清晰	略差	清晰	略差	清晰	响亮	清晰	响亮
70	略差	略差	略差	略差	清晰	略差	清晰	略差

输距离在白天阳光充足时，仍可以达 60 m；声音信号在白天城镇道路等噪音较大的地方，有效传输距离仍可以达到 50 m，满足现场需要。

电源方面，因为单晶硅光伏板转换效率高、性能稳定，选择其作为供电电源，考虑输电铁塔的结构和环境条件，为光伏板设计专用固定支架，将其与输电铁塔的供电线路连接起来。将组装好太阳能电池板进行测试，测试其在同一天内不同时刻下供电能力，并根据测试结果绘制了折线图。查阅气象资料，xx 地区的平均日照强度在 500~2 000 lx 之间，选择 500 lx、1 000 lx、2 000 lx 3 种情况下的光照强度进行实验，测试结果如表 3 所示，最低输出功率为 104 W，能满足设备最大功率的要求。光伏板配合锂电池，为系统提供电源。

表3 不同时刻供电能力测试统计表 W

日照 强度 /lx	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
2 000	262	252	257	267	262	252	257	262	252	257
1 000	178	173	183	173	168	183	178	173	183	168
500	124	104	114	129	124	114	104	129	119	114

2.3 数据后台

通信方面，NB-LoT 是一种窄带物联网技术，具有低功耗、大连接、广覆盖等特点。将 NB-LoT 模块与后台服务器连接，开展协议配置和网络调试。

在这个步骤中，须在输电铁塔上安装智能脚钉，并将脚钉与已连接的后台服务器进行配置。同时，对脚钉进行测试，确保其能够准确无误地接收和发送信息。

前后端方面，开发物联网后端控制平台，满足实时监控和远程控制需求，并且可以与各种传感器和执行器进行无缝连接。编写数据传输代码，将传感器采集的数据从前端设备传输到后端服务器，并进行必要的解析和处理。完成数据传输代码的编写之后，编译前后端程序。

3 应用效果

对脚钉开展整体调试，测试控制信号的传输、电源的稳定性以及系统的整体性能，如图2所示。

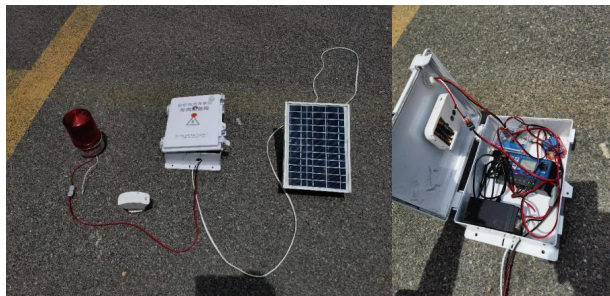


图2 新型输电铁塔防误登智能脚钉整体调试

测试异常攀爬告警时间，共计试验50次，并记录耗时情况，具体数据如图3所示，经过测试，最长时间为17s，该时间足以确保攀爬人员接近安全距离前便发出告警信号。

(上接第9页)

电流和电压等参数，计算设备负荷需求；计算电流负荷，根据设备负荷需求和电路中其他负载的额定参数，计算电流负荷；确定导线规格，根据电流负荷和电缆的导体材料、敷设方式以及电线的长度等因素，选择合适的导线规格，以确保电流载荷不超过导线的额定承载能力；考虑电压降，根据导线的长度和材料，计算电线电阻和电流通过时的电压降，并确保电压降不超过允许范围；确定保护装置参数，根据设备的特性和需要，选择合适的保护装置，如断路器、熔断器或过流保护器，并设置合适的触发电流或过载保护等参数。

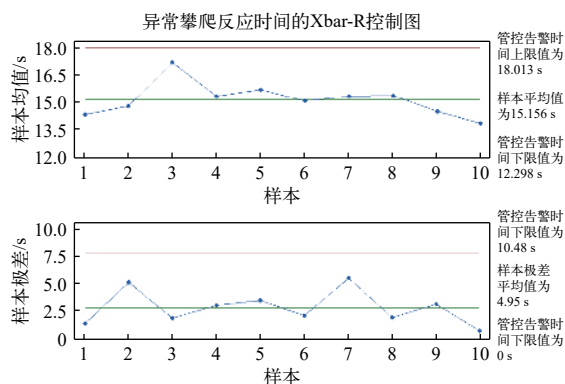


图3 异常攀爬告警时间分布图

4 结束语

本文设计并构建了一种新型输电铁塔防误登智能脚钉，脚钉集状态感应、防误登实时报警、后台感知、警示设备、联网管理于一体，后台系统能够快速感知误攀登行为并声光告警，防止未经授权的人员非法攀登，并迅速采取措施，避免误登带电杆塔等安全事故。

参考文献

- [1] 陈莹. 强台风环境下电网结构安全性评估与应急调控策略研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [2] 洪行军, 梁加凯. 停电检修人员误登同杆(塔)架设多回带电线路的原因分析及防范措施[J]. 机电信息, 2013,(33): 168-169.

作者简介

王磊(1993—),男,研究生,从事输电线路运行管理。

(责任编辑:刘艳玲)

参考文献

- [1] 张壮飞. 高压开关柜电气控制回路设计标准化研究[J]. 冶金丛刊, 2017(7): 80, 97.
- [2] 尹春燕. 35 kV高压开关柜结构优化分析[J]. 电力与能源, 2023, 44(4): 401-405.
- [3] 李天仲. 水电工程高压开关柜电气二次标准化设计[J]. 红水河, 2017, 36(6): 4.
- [4] 盛浩. 高压开关柜电气控制回路设计标准化分析[J]. 市场周刊: 商务营销, 2020(55): 1-2.

作者简介

毛志恒(1990—),男,本科,中级电气工程师,高级技师,研究方向:数据中心电气系统管理。

(责任编辑:刘艳玲)

台区线损治理典型经验

杜颖

(国网河北省电力有限公司阜城县供电分公司, 河北 阜城 053700)

摘要: 台区线损治理是供电所的一项重要工作, 同时也是影响公司经营效益的重要指标。现行供电所台区线损管理模式是基于抄表数据计算台区购售电量和线损率, 台区线损异常主要包括高损和负损²种, 文章从台区线损异常的原因分析和台区线损异常管理方法²个方面介绍台区线损治理经验, 以期提升台区同期线损经济运行率。

关键词: 线损; 高损; 负损; 营配数据

中图分类号: TM714.3

Typical Experience in Line Loss Management in Power Supply Station

DU Ying

(State grid Hebei Province electric power Co., Ltd. Fucheng county power supply branch, Hebei Fucheng 053700, China)

Abstract: Line loss management in the power supply station is an important task and also an important indicator that affects the company's operational efficiency. The current management mode of line loss in power supply substations is based on meter reading data to calculate the purchased and sold electricity and line loss rate in the substation area. The abnormal line loss in the substation area mainly includes two types: high loss and negative loss. The article introduces the experience of line loss management in substation areas from two aspects: the analysis of the causes of abnormal line loss in the substation area and the management methods of abnormal line loss in the substation area. In order to improve the economic operation rate of line loss in the same period in the power supply station.

Keywords: line loss; high loss; negative loss; business distribution data

1 台区线损异常原因分析

造成台区线损率过高的原因主要有管理和技术因素。管理因素包括 SG186 系统档案不一致, 即变户不一致, 指系统中台区用户与实际现场真实用电户数不一致; 台区存在窃电、漏电情况; 表计终端故障或采集不上线, 造成用电量无法统计; 互感器配置不合理, 量程过大造成计量不准确。技术因素包括台区三相负荷严重不平衡; 变压器距离负荷中心较远, 供电半径过大; 台区线路线径过小等。

台区出现负损说明供电量小于售电量, 主要原因为光伏档案错误。光伏用户表计采集不在线, 造成此光伏发电量未参与线损计算, 造成负损。营配数据的准确性能够直接变更营销系统用户档案中的所属电源信息, 从而影响到线损。当用户在营销系统中的台区信息错误且此错误用户用电量较大时, 就会出现正确台区高损、错误台区负损的情况。表

收稿日期: 2023-09-02; 修回日期: 2023-10-17

计倍率不正确或误差过大、计量不准确等, 也会产生负损的情况。

2 台区线损异常管理方法

2.1 核查台区档案信息

核查营销 SG186 系统与同源系统是否有系统档案不一致、变户不一致情况。某供电区域台区较为集中时, 很容易出现变户不一致的情况, 从而导致线损统计错误, 此种情况须加强营销 SG186 系统线路、台区、用户对应关系的清理, 确保线路、台区档案与同源系统保持一致。

由于营配数据的准确性直接影响营销 SG186 系统用户档案的准确性, 从而影响线损, 所以现场用户发生台区切改时, 应严格执行下面 2 种操作:

整合整组变压器切改。由供电所营销员、技术员确定系统图形、台账等切改时间, 确定切改时间后由采集运维人员在采集系统中维护数据; 营销部计量班同步修改计量关口台账中所属的台区信息,

保证在最短的时间、最小的影响下，完成台区档案的异动更新。

单户或小范围内多户切改台区。现场台区经理完成切改后，应及时将切改用户信息上报，由同源系统维护人员及时进行档案调整，再由用电信息采集人员进行采集信息调试。上述操作必须同一天完成，以保证线损受到的影响降至最低。

2.2 检查台区总表集中器

线损异常原因可能是台区总表集中器统计错误造成，须检查集中器是否存在失流、分流、断压的现象；检查表计接线情况，是否存在各个元件电流极性是否反向造成计量失准。对于接线有问题的表计应该尽快改正，确保正确计量。

2.3 核查台区有无漏电、窃电以及表计故障情况

定期开展跟踪抄表、用电普查、反窃电活动，严格查处违约和窃电行为。加强台区电量异动管理，通过用电信息采集系统筛选用电量大幅波动或同比大幅下降、无用电户、电压或电流数据异常的用户，进行现场检查，查看是否存在窃电或表计故障情况。

2.4 检查技术线损

经过检查与整改后综合线损率如果依然偏高，其高损原因应归属于技术线损，主要查该台区有无长距离向大负荷供电的情况，检查是否存在裸导线、线径过小、功率因数偏低、三相负荷严重不平衡等问题。

随着清洁能源的发展，分布式电源业务迅猛增长，越来越多的光伏用户并网。光伏发电容量的增大代表着分布式电源向电网输送的电量也越来越多；这会造成变压器过载或重载运行，影响台区线损。较大容量的光伏用户并网点距离变压器较远，也会造成台区线损异常。

3 2起典型案例分析

案例一：通过系统数据比对分析表发现 B1704 台区采集与一体化线损率不一致，一体化出现负损。经过比对核查档案信息，发现 SG186 系统与采集系统用户档案数量不一致，SG186 系统 234 户，采集系统 225 户，通过系统间关联关系，判定存在户变关系问题。

对比 2 种系统用户明细，发现有 10 个差异用户，

同源系统检查差异用户台户关系，用户所在表箱挂在 B1704 台区上，SG186 系统档案电源与同源一致。采集系统检查用户所在台区为 B1703 台区，且稳定正常采集。根据经验台区错带后用户采集情况会受到影响，出现长期或阶段性采集失败情况。10 个差异用户在 B1703 上正常采集，判定 10 个差异用户采集系统所在台区正确，同源系统户变关系挂接错误，导致 SG186 档案错误。确定户变关系错误后，同源系统内调整表箱挂接位置，线损恢复正常。

案例二：某台区日损骤降，核查近期该台区电量，发现其供电量曲线骤降，售电量曲线无明显变化。首先通过用电信息采集系统初步判定该台区是否存在失流、失压及接线错误。经核查，该台区三相电流正常，三相电压分别为 232 V、232 V、0 V，初步排除失流以及接线错误情况。随后现场检查，查看总表集中器实时电流与电压，发现电流无异常，电压分别为 232 V、232 V、0 V。然后打开台区总表尾盖，发现表尾外观接线完好，无烧糊异味，用钳形万用表测量三相电压，测量值与电能表显示的实时数据一致。结合以上情况分析，最有可能是台区总表集中器内部故障造成失压，经现场核查，台区总表存在欠压故障。更换台区总表集中器后，台区线损恢复正常。

4 结束语

台区线损是营销管理水平的重要体现，也是影响公司经营效益的重要指标。将台区线损管理纳入同业对标范畴，建立月度通报制度，包括未使用总表采集数据、台区线损率出现负线损率、低压台区线损率大于 10%、营销系统与同源系统数据不一致。对线损指标超标率较高的单位实行“说清楚”制度，对指标长期落后的供电所进行同业对标考核。各单位应结合自身实际，参照公司制定的阶段性目标，分别制定落实到台区的线损考核指标，进一步加大对台区线损考核力度，促进台区管理水平的提升。

作者简介

杜颖（1991—），女，本科，中级工程师，主要工作方向：供电所营销及 0.4 kV 线损管理。

（责任编辑：袁航）

变电工程中变压器安装调试的注意事项

麻强磊

(河南中分仪器股份有限公司, 河南 商丘 476000)

摘要: 变压器是变电工程的核心装置, 其安装调试效果直接影响着输变电质量。文章从某110 kV变电站运行过程中变压器的故障缺陷出发, 研究变电工程中变压器本体吊装流程及附件安装操作, 在安全标准及技术规范基础上, 优化安装技术及调试流程, 以保障110 kV变电工程主变压器安全、可靠、稳定运行。
关键词: 变压器; 问题分析; 安装调试; 优化方案 **中图分类号:** TM421

Precautions for Transformer Installation and Debugging in Substation Engineering

MA Qianglei

(Henan Zhongfen Instrument Co., Ltd., Henan Shangqiu 47600, China)

Abstract: Transformers are the core devices of substation engineering. The installation and debugging effect directly affects the quality of power transmission and transformation. The article starts from the fault defects of a transformer during the operation of a 110 kV substation, and studies the lifting process and accessory installation operation of the transformer body in substation engineering. Optimize installation techniques and debugging processes based on safety standards and technical specifications. To ensure the safe, reliable, and stable operation of the main transformer in the 110 kV substation project.

Keywords: transformer; problem analysis; installation and debugging; optimization plan

由于安装技术不规范及调试操作不科学引起的变压器漏油漏气、接线松动、绝缘损坏等屡见不鲜, 直接影响了变压器试运行的安全效益和可靠性能, 严重时甚至造成变压器损毁; 因此, 在主变压器安装调试过程中, 必须严格依照工作规程及技术方案的有序操作, 逐项检查, 阶段调试, 以确保其外观性能、关键装置和保护配置达标, 为变电工程顺利投运奠定基础^[1]。

1 变电工程中变压器运行缺陷分析

某110 kV变电站位于我国南部沿海地区, 其地理环境复杂, 暴雨台风天气相对频繁, 变压器运行风险系数较高。为满足区域用电需求, 2021年该变电站改用笔者公司生产的最新型号110 kV变压器, 但在投入使用后, 1#变压器共发生故障9起, 其中3起为外部因素导致, 6起均为变压器安装不规范、油位异常、绝缘放电导致, 存在的问题如下:

振动异响。2022年4月13日, 新装110 kV变压器运行中发出“嗡嗡声”, 后开关闪络跳闸, 系统显示开关跳闸告警。到现场检查后确认, 新装变

收稿日期: 2023-09-04

压器时开关触头安装不到位, 开关接触不良, 造成变压器运行电压持续波动, 引起变压器异响。

油位异常。变压器存在严重漏油情况。现场检查时发现, 该变压器安装过程中油管存在明显松动, 且密封垫规格尺寸不达标, 在安装调试过程中须全面重视。与此同时, 变压器油箱存在轻微灼烧痕迹, 底部有明显黄锈, 给变压器安全运行埋下了隐患。

绝缘放电。变压器出现3次放电故障, 其中2次为绕组局部放电, 1次为绝缘护套放电。现场检查中发现, 变压器安装时绕组S弯处未做好绝缘、铁芯处未增加保护装置, 造成长久使用后变形, 引起匝间短路; 变压器安装时二次接线及接地保护设计不合理, 导致护套带电击穿。

2 变电工程中变压器安装施工技术

2.1 工艺流程

110 kV变电站1#主变安装流程较为复杂, 涉及冷却装置、套管及其配件、油枕、联管、瓦斯继电器等。同时, 还要抽真空注油试验, 工艺流程如图1所示。

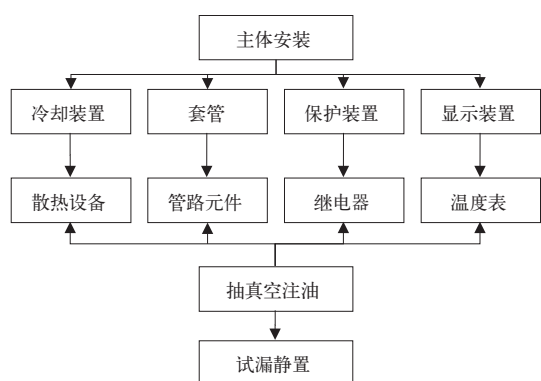


图1 110 kV 变压器安装工艺流程

变压器安装过程中应严格依照南方电网的安全标准和技术规范展开，根据 Q/CSG 510001—2015《南方电网有限责任公司电力安全工作规程》、Q/CSG 11105—2008《南方电网工程施工工艺控制规范》及 GB 50169—2006《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》中的各项要求，对安装操作及施工技术进行调整和优化，以全面保障 110 kV 变压器投运后的安全性、可靠性和稳定性。

2.2 主体吊装

在 110 kV 变压器主体吊装环节，应严格检查变压器本体外观性能，避免其存在磕碰、损坏等情况。确认变压器基础中心线和设备中心线完全重合后，将变压器缓慢吊装就位，平稳放置到底座上，其具体操作如表 1 所示^[2-3]。

表1 110 kV 变压器本体吊装技术

项目	安装操作
环境条件	环境温度 $>0^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 75\%$
安装流程	起吊：吊索与铅垂线夹角 $<30^{\circ}$ ，不可出现器身与箱壁碰撞现象
	就位：放置过程中水平误差应在 $\pm 2\%$ 以内，垂直误差应在 $\pm 1.5\%$ 以内
	固定：使用木棒对铁芯绕组进行固定，绝缘围屏绑扎牢固，螺栓固定拧紧
清理检查	清理水滴、油泥、金属屑末等，检查本体的安全性能及绝缘性能

2.3 附件安装

2.3.1 安装储油柜

该变压器采用的胶囊式储油柜，安装时先检查胶囊是否完好，测定胶囊性能，在缓慢充气后观察是否存在漏气现象。确定胶囊无问题后，将胶囊

与柜体平行，连接波纹管，待储油柜就位后，将管道用螺栓固定连接。最后连接浮子、连杆和油位计。

2.3.2 安装冷却装置

检查散热器上下油管开关是否打开，连接法兰表面是否清洁；确定管路通畅后方可进行吊装操作。将上下油管法兰与散热器法兰对齐，再套入胶垫上下均匀拧紧螺丝，直至油箱稳固。安装风扇，检查风扇是否可靠灵活转动。

2.3.3 安装套管元件

安装套管升高座。安装前须先打开升高座上封板、下封板和 TA 出线封板，检查 TA 外观，测量 TA 变比、直流电阻和绝缘电阻、伏安特性、极性。确定无误后，更换新的胶垫，将新变压器的套管升高座缓缓吊装至指定位置，再上下均匀拧紧螺丝。上述安装过程应逐个进行，避免造成变压器器身受潮。同时，安装过程中应确保铭牌朝向油箱外侧，便于现场检查^[4]。

安装套管。高、中压套管与低压套在安装操作时存在一定差异。现场施工过程中应注意先按照技术规范进行高、中压套管的安装，再固定低压套管。

高、中压套管安装操作：（1）小心拆开套管箱，拆下铜套、防雨罩，挂好尼龙吊带和麻绳，缓缓吊起，检查瓷套应无裂纹，无破损，无油垢；检查套管油位是否达到要求；（2）用白布抹拭上下瓷套，并做好内部清洁，拧紧均压罩；（3）将变压器高、中压套管竖起，测量套管及末端小套管对地绝缘电阻（一般不低于 1000 M Ω ）、电容型套管的介损值（一般不大于 1%），达标后方可吊装固定；（4）固定时要有专人扶持套管，避免套管与升高座碰撞，并设专人监视引线，引线不能打结，根部不能有受扭、拉及弯曲等现象，确保引线竹接头必须完全进入套管均压球内；吊装完毕后拆除钢丝绳，套入密封胶圈，拧上防雨罩，穿入销钉，拧上引线头定位螺母，拧上铜套^[5-6]。

低压套管安装操作：（1）拆开低压套管箱，取出低压套管，检查套管瓷套应无裂纹，无破损，无油垢；（2）拆开低压升高座套管和配套法兰，更换套管法兰胶垫，安装低压套管；（3）从手孔处连接低压引线，接线时要注意物件管理，任何螺丝、垫圈等不得掉入油箱内，工具必须用白布带绑实，另

一端绑在油箱外面；(4)引线接好后应检查引线是否连接牢固，螺丝、螺帽是否紧固，引线有无扭曲现象，是否遗留物件，确定无异常后更换手孔法兰胶垫，封上手孔封板。

2.3.4 安装保护装置

变压器安装过程中应注意油枕、瓦斯继电器、二次接线及接地线等保护装置。其中，油枕吊装至支架后应用螺栓拧紧，并检验油位信号与油枕变化是否一致；继电器安装完毕后应分别进行标记，在调试时重点关注其动作情况；接线时应注意 TA、油面温度计、绕组温度计、气体继电器、油位计、压力释放阀、散热风机等的二次接线，并按照要求连接主体接地线。

2.3.5 安装显示装置

安装变压器温度显示装置时，应将油面温度计和线圈温度表置于相应位置；拆开油箱顶部塞子，注满变压器油，安装温包。

2.3.6 抽真空注油

操作过程中首先打开主联管和散热器上蝶阀，对胶囊和主体抽真空，这个过程不少于 8 h。监视箱壁的弹性变化，其最大值不得超过壁厚的 2 倍；对主体注油阀补充附件油，到距箱 20 cm 左右位置时，改用油枕注油阀持续注油，直至油位指示计显示为“7”或“8”，此时停止注油，继续抽真空，这个过程不少于 4 h；缓缓打开胶囊进气阀，使胶囊自然膨胀；最后打开变压器高点的排气阀，持续排气直至变压器油溢出，关闭阀门，试漏静置 24 h。

3 运行调试

3.1 设备检查

变电工程中变压器安装调试要形成完整的机制规范，由负责人牵头，选取安装调试人员及安全监理人员，形成 3 级组织，进行安装统筹、调试检查和现场监理。明确人员工作职责和工作内容，使其能够严格依照要求展开工作，减少由人员问题引起的安装调试风险。依照 110 kV 变电站变压器安装方案对主体外观及接口情况进行确认，分析是否与安装方案中的要求一致；对现场安装情况进行检查，分析是否存在螺栓松动、管路弯折、接线错接等情况；对设备元件性能进行检查，分析是否存在动作异常、挡位异常等情况，若检查确认均达标，方可

进行试运行调试。

3.2 运行调试

变压器调试时应先进行空载投入冲击试验。操作过程中由高压侧投入，全压冲击合闸，使变压器受电试运行 10 min 以上，观察是否存在异常声响、是否出现爆裂闪络等情况。若运行正常，持续空载运行 24~28 h，观察变压器情况。

空载投入冲击试验无异常后，可进行半负荷状态下的调试。操作过程中将变压器负荷侧逐渐投入，直到半负载时止，观察变压器温升、一二次侧电压和负荷电流变化情况，每 2 h 记录一次。

若上述数据无异常，则可进行全负荷状态下的调试。操作过程中满负荷投入，持续运行 48 h 后，检查变压器温升、油位及漏油情况、冷却器、一二次侧电压和负荷电流变化等情况，检验变压器运行性能是否达标。

4 结束语

变电工程中变压器安装流程较为复杂，调试操作风险较高，应做好安装调试方案的设计，明确安装流程及技术操作，做好现场调试安全防护，使人员能够在规范指导下可靠安装、有效检查、安全调试。同时，还应做好技术的拓展与革新，对变压器安装调试操作进行优化，减少不必要的施工周期和成本投入，从根本上改善变压器安装调试的经济效益，推动我国变电工程又好又快发展。

参考文献

- [1] 许建雄. 110 kV 变电工程中电力变压器安装调试[J]. 中国新技术新产品, 2019 (11): 64-65.
- [2] 吴国成, 王金生, 李永振, 等. 大中型整流变压器的安装与调试[J]. 设备管理与维修, 2021 (16): 104-106.
- [3] 陈惠雄. 110 kV 变电站电气安装调试技术要点及对策探析[J]. 中国设备工程, 2021 (13): 209-210.
- [4] 姜世桐. 电力变压器安装与保护调试要点探究[J]. 中国设备工程, 2023 (6): 134-136.
- [5] 李鹏. 输配电工程中变压器的安装及调试解析[J]. 电器工业, 2022 (7): 44-47.
- [6] 段运鼎. 电气工程安装中的变压器调试问题研究[J]. 电器工业, 2022 (6): 58-60.

作者简介

麻强磊 (1983—), 男, 本科, 电气工程及其自动化专业工程师, 变电工程专责, 主要从事变电工程的施工及调试工作。

(责任编辑:袁航)

220 kV 双母线带旁路接线变电站代路操作比较

王 婷^{1*}, 申俊龙², 王志松¹

(1. 国网北京电力公司检修分公司, 北京 丰台 100021; 2. 北京京电电网维护集团有限公司, 北京 西城 100079)

摘要: 通过梳理双母线带旁路接线方式下旁路2246开关转代线路运行操作的注意事项, 对比所代线路配置纵联距离或纵联方向保护(高频保护)和纵联电流差动保护(光纤保护)的代路操作, 强化不同保护配置线路代路操作方法, 便于变电运维人员掌握2种代路的差异。

关键词: 旁路; 代路; 高频保护; 光纤保护

中图分类号: TM7211

Comparison of Substitution Operation for 220 kV Double Bus Substation with Bypass Connection

WANG Ting^{1*}, SHEN Junlong², WU Zhisong¹

(1. State Grid Beijing Electric Power Company Maintenance Branch, Beijing Fengtai 100073, China; 2. Beijing Jingdian power grid Maintenance Group Co., Ltd., Beijing Xicheng 100079, China)

Abstract: In this paper, comb the operation precautions of transmission through the bypass 2246 switching under the double-bus with bypass connection mode, and compare the operations of transmission through by-pass between lines with longitudinal distance or longitudinal direction protection (high frequency protection) and longitudinal current differential protection (optical fiber protection). Strengthening the operation methods of different protected configuration lines through comparation, and facilitating the power special staff to master the differences between the two routing methods.

Keywords: bypass; transmission through by-pass; high frequency protection; optical fiber protection

早期较为大型、重要的变电站, 220 kV 电压等级常采取双母线带旁路的接线方式, 变电运维人员进行线路用旁路代路倒闸操作时, 不仅需要操作一次设备, 还要考虑相应继电保护的配合, 确保代路期间线路的继电保护装置可靠动作, 防止出现保护配置不合理造成开关跳闸或拒动。

1 旁路代路通用管理规定

按照变电站现场运行通用规程 220 kV 旁路断路器进相线路代路时的操作规定^[1]: 线路配置有纵联方向、纵联距离保护, 须先将代路断路器的纵联方向、纵联距离保护及重合闸停用, 将被代路断路器的纵联方向保护由本路切换至停止, 再切换至旁路。用旁路断路器进行代路操作完毕后, 测试旁路断路器的纵联方向保护通道无问题, 方可将旁路断路器的纵联方向保护及重合闸投入。

线路配置有纵联差动保护, 须先将代路断路

器的纵联差动保护及重合闸停用, 将被代路断路器的纵联差动保护通道由本路切换至旁路。用旁路断路器进行代路操作完毕后, 检查旁路断路器的纵联差动保护无异常告警信号, 方可将旁路断路器的纵联差动保护及重合闸投入。

本文选取了有代表性的 220 kV 双母线带旁路变电站, 通过对 2 种旁路代路实际操作过程中的方法进行总结和对比, 帮助运维人员进一步了解 220 kV 双母线带旁路代路的操作方法和注意事项。

2 220 kV HR 站

2.1 保护配置情况

220 kV HR 站 220 kV 保护配置如下: 2212、2213 配置 RCS-901 纵联方向保护和 CSC-101 纵联距离保护; 2214、2215 配置 RCS-901 纵联方向保护和 PSL-602 纵联距离保护; 2217、2218 配置 RCS-931 纵联电流差动保护和 WXH-803 纵联电流差动保护。旁路 2246 配置 RCS-901 纵联方向保护和 WXH-

收稿日期: 2023-08-08

803 纵联电流差动保护。220 kV 母线配置 RCS-915 母线保护和 CSC-150 母线保护。

2.2 旁路代路特殊规定

当旁路 2246 由热备用转代 2212 (2213、2214、2215) 开关运行时, 虽然 2212 (2213、2214、2215) 开关保护配置为纵联方向、纵联距离的高频保护, 但并不意味着旁路 2246 开关带其运行后只投入 RCS-901 纵联方向保护, WXH-803 纵联电流差动保护只是不投入“纵联电流差动保护投入”压板(主保护), 其后备保护仍然投入; 故在执行“检查 XXXX、2246 保护投入应一致”操作步骤时, 必须确认旁路 2246 开关 RCS-901 纵联方向保护和 WXH-803 纵联电流差动保护的定值区均应切换至被代路开关所对应的定值区。

同理, 当旁路 2246 由热备用转代 2217 (2218) 开关运行时, 虽然 2217 (2218) 开关保护配置为纵联电流差动的光纤保护, 并不意味着旁路 2246 开关带其运行后只投入 WXH-803 纵联电流差动保护, RCS-901 纵联方向保护只是不投入“高频保护”压板(主保护), 其后备保护仍然投入; 故在执行“检查 XXXX、2246 保护投入应一致”操作步骤时, 须确认旁路开关 RCS-901 纵联方向保护和 WXH-803 纵联电流差动保护的定值区均应切换至被代路开关所对应的定值区。

2.3 CHY2215 开关由旁路 2246 开关代路实例

操作前须将旁路 2246 开关的定值区切换至被代路开关所对应的定值区, 切换后打印旁路 2246 开关 RCS-901、WXH-803 2 套保护装置定值单, 与旁路 2246 开关保护屏后柜的保护定值单进行核对。核对无问题后方可进行代路操作, 具体操作步骤如下: CHY 2215 开关单相重合闸停用; CHY 2215 RCS-901 开关纵联方向保护退出; CHY 2215 PSL-602 开关纵联距离保护退出; 旁路 2246 开关由热备用转代 CHY 2215 开关运行; CHY 2215 开关由运行转冷备用(母线保护跳 2215 出口); 将 2215 RCS-901 收发讯机电源切换手把由本路改投停用; 将 2215 RCS-901 收发讯机通道切换手把由本路改投停用; 将 2215 RCS-901 收发讯机通道切换手把由停用改投旁路; 将 2215 RCS-901 收发讯机电源切换手把由停用改投旁路; 对试通道无问题后, 投入旁路 2246 开关 RCS-901 纵联方向保护投入; 旁路 2246 开关单

相重合闸运行; CHY 2215 开关由冷备用转检修。

2.4 BHE 2218 开关由旁路 2246 开关代路实例

操作前须将旁路 2246 开关的定值区切换至被代路开关所对应的定值区, 切换后打印旁路 2246 开关 RCS-901、WXH-803 2 套保护装置定值单, 与旁路 2246 开关保护屏后柜的保护定值单进行核对, 核对无问题后方可进行代路操作, 具体操作步骤如下: HBE 2218 开关单相重合闸停用; HBE 2218 WXH-803 开关纵联电流差动保护退出; HBE 2218 RCS-931 开关纵联电流差动保护退出; 旁路 2246 开关由热备用转代 HBE 2218 开关运行; HBE 2218 开关由运行转冷备用(母线保护跳 2218 出口); 将 2218 WXH-803 光纤收由本线改投旁路; 将 2218 WXH-803 光纤发由本线改投旁路; 给上 2246WXH-803 2218 光纤收; 给上 2246 WXH-803 2218 光纤发; 检查 2246WXH-803 通道异常灯应灭; 旁路 2246 开关 WXH-803 纵联电流差动保护投入; 旁路 2246 开关单相重合闸运行; HBE 2218 开关由冷备用转检修。2246 保护屏光纤切换装置如图 1 所示。

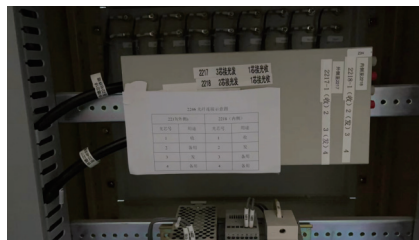


图1 2246 保护屏光纤切换装置

3 结束语

通过对 2 种旁路 2246 开关代路规定的比较, 结合生产过程中实际代路核心操作步骤的对比, 不同类型旁路代路的操作存在较大差异。这就需要运维人员在操作前熟悉所辖各站代路流程, 并明确实际操作过程中关键点(配置光纤保护线路代路是如何插拔光纤), 确保操作步骤正确, 实现安全生产。

参考文献

- [1] 国网北京市电力公司. 变电站现场运行通用规程[Z]. 京电设备[2022]62号. 2022.

作者简介

王 婷(1993—), 女, 工程师, 主要从事变电运维工作。

(责任编辑:袁航)

备用电源自投装置在县级电网中的应用

王留长

(国网河北省电力有限公司阜城县供电分公司, 河北 阜城 053700)

摘要: 在电力系统中, 应用备用电源自投装置(以下简称备自投装置), 是为了保证电网安全、稳定, 满足电网经济运行及可靠供电的技术措施。文章对备用电源自投装置在县级电网应用中存在的问题及解决办法进行总结, 为同行提供参考。

关键词: 备用电源自投装置; 县级电网; 故障自愈

中图分类号: TM762.1

Backup Power Supply Automatic Switching Device in County-level Power Grid Application

WANG Liuchang

(State grid Hebei Province electric power Co., Ltd. Fucheng county power supply branch, Hebei Fucheng 053700, China)

Abstract: In the power system, the application of backup power automatic switching devices is to ensure the safety, stability, and economic operation of the power grid. This article summarizes the current problems and solutions of county-level power grids. I hope to play a positive role in encountering and handling this situation.

Keywords: backup power automatic switching device; county level power grid; self-healing ability

0 引言

当前, 多数县公司 110 kV 及以下电网为辐射形供电方式, 为保证电网可靠持续供电, 在 $N-1$ 故障时不间断给用户供电, 电网接线一般采用主供电源 + 备用电源的双电源模式。当变电站主供电源出现故障引起跳闸后, 备用电源自动投入, 迅速对用户恢复供电, 切实提升用户的供电可靠性, 保障电网安全。

备自投装置具有很强的实用性, 一旦主供电源故障跳闸, 备自投装置启动, 备用电源将自动投入, 保证用户的正常供电。然而, 在实际应用中备自投装置会出现一些问题, 本文介绍邯郸供电公司阜城供电分公司备自投装置应用中存在的问题及其解决办法。

1 备自投装置的作用

由于电磁环网需要开环, 双电源或多电源的变电站通常只有一次电源, 供电可靠性降低。而备自投可以实现以下目标:

提高供电可靠性, 迅速恢复失压变电站持续供电;

收稿日期: 2023-09-08

降低不必要资金投入(减少手拉手式环网供电和增加多台变压器的投资);

简化继电保护整定配合的多重复杂性(电网开环运行方式下继电保护整定更简单、方便)。

2 备自投工作原则

当工作电源失压后, 备自投装置启动, 经“跳进线延时”装置跳开进线开关, 确认运行开关在跳位后, 备自投逻辑才能继续。故障不应由备自投切除, 所以“跳进线延时”应大于有关故障动作和重合闸的最长动作时间, 以防止备自投装置动作合闸到故障线路、备用电源倒送电的情况发生。

若备自投备用线路出现故障, 备自投装置应闭锁, 如以下几种情况: (1) 引起主变压器后备保护动作, 切除主变压器而造成母线电压消失, 这是由于低压线路故障而出线保护拒动造成的, 低压侧分段备自投应闭锁, 变压器主进线开关备自投动作; (2) 主变压器保护全部跳闸, 若是因为主变压器故障引起的, 这时应当闭锁分段备自投高压侧, 即桥开关备自投动作。

备自投装置设置延时, 是为了避免误操作, 加快备用电源的投入。备自投动作于故障后, 合理设置延时既避免误动又加速合备用电源。备自投“跳

进线延时”应大于外部故障排除的最长时间，才能有效避免母线电压的短时间下降，如果进线没有重合闸装置或功能时，当母线的进线开关跳开、母线电压消失时，应立即跳开断路器，投入备用电源，缩短停电时间。

如果手动切除工作电源，备自投不应动作。一种方式是没有合后接点，通过闭锁信号对备自投装置设备放电，以确保备自投不动作。另一种方式是引入工作开关断路器的合后接点，当断路器就地或遥控跳开时，合后接点应断开，退出备自投。若须人工手动切除（包括就地或遥控跳）断路器，应在退出备自投且动作不能完成时，方可手动切除。

如果备用电源不符合有压条件，备自投应不动作。备自投装置获取备用电源线路电压，并确定备自投装置是否启动，如果未满足，则不调用备自投逻辑。

3 县级电网中备自投的3种基本方式

阜城 110 kV 及以下电网主要采用以下 3 种备自投方式。

3.1 进线备自投

阜城电网采用进线备自投方式的共有 10 个变电站。

动作原理：运行线路失去电压，与其相关的开关处于合闸位置，在备用电源线路有电压、母联分段开关处在合闸位置的情况下，跳开运行线路断路器，如图 1 所示，启动条件为：I、II 段母线均失压，2DL 处电流小于定值电流，且进线处有压，2DL 在跳闸位置作为闭锁条件，延时跳开 2DL，合闸倒至

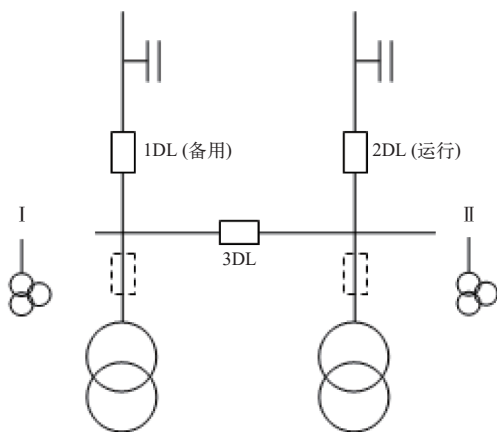


图1 进线备自投

备用电源线路断路器。

3.2 桥接线备自投

阜城电网采用桥接线备自投方式的共有 24 个变电站。

动作原理：运行线路失去电压，与其相关的断路器处在合闸位置时，当备用线路有压、桥开关处在合闸位置时，运行线路断路器跳开，备用线路断路器开关闭合，如图 2 所示。

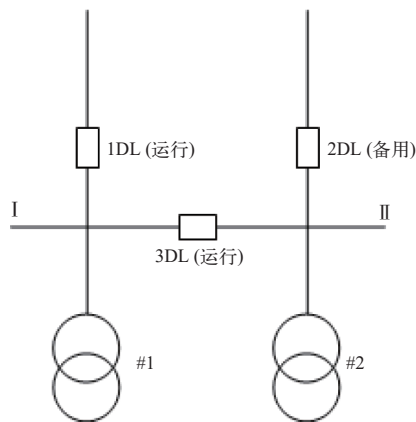


图2 桥接线备自投

当桥开关在 3DL 在分开位时，应闭锁备自投装置，桥开关 3DL 在合闸位置时，如备自投开始启动后，3DL 发生合—分的动作变位，备自投应动作，也就是说当变压器差动保护动作跳开运行电源线路开关及 3DL 时，备用电源线路开关可正确动作。

取线路电流值作为线路失去电压的闭锁依据，防止电压互感器断线时设备误动作。

3.3 母联开关备自投

阜城电网 220 kV 站的低压侧母线均采用母联开关备自投方式，如图 3 所示。

动作原理：在母联开关在断位的情况下，两段母线不论哪条失压，备自投都会跳开故障母线上的电源开关，再合上母联断路器。为防止电压互感器断线时误动作，取主变压器低压侧母线主进线断路器开关电流，作为母线是否失去电压的闭锁依据。

存在问题：当母线发生故障时，备自投也会动作，从而将故障母线再次投入系统，使系统再次受到冲击，还有可能造成母线全部停电。为避免这种情况的发生，应采用母差保护闭锁备自投的方式。另外当线路发生故障开关拒动造成主变主进线开关越级跳闸时，如果备自投动作，也会造成备自投带

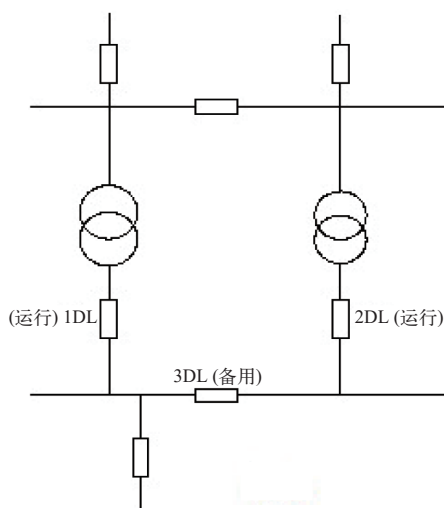


图3 母联开关备自投

故障合闸，为避免这种情况的发生，应采用主变后备保护闭锁备自投的方式。

4 网络备自投系统的应用情况

传统的备自投装置，可在线路发生故障后马上恢复送电，但是资金投入很大，也无法快速排除高电压等级电源发生故障造成的低电压等级电源失电。为弥补变电站现场未安装备自投的不足，邯郸供电公司推广网络备自投系统，在 D5000 系统部署网络备自投系统，该系统综合电网拓扑校核、备自投定值设定等重点技术，将网络备自投程序纳入 D5000 系统网络模型，匹配网络备自投隔离故障、恢复送电顺序和时间，编制适用于 35 kV 变电站电源线路的网络备自投程序。邯郸供电公司在 D5000 系统上成功部署网络备自投程序，实现了 35 kV 变电站电源线路故障 s 级自愈。

该系统可实现分析故障信号、智能定位故障范围、自动隔离故障点、快速自愈等功能，避免因高电压等级电源发生故障而影响低电压等级的正常供电，提升了电网故障处置效率。

为进一步验证网络备自投功能的实用化能力，在运行环境下完成网络备自投的实时传输验收工作，实现故障点故障设备自动隔离、非故障区域 s 级复电，2023 年 5 月，邯郸供电公司率先在河北南网实现了电网故障时自愈功能的测试。

设定网络备自投充电、放电闭锁及定值参数，强化 D5000 系统图模拓扑校核，加强测试验收过程

双监护全流程闭环管控。为确保测试验收顺利开展，提前对电网运行方式、影响遥控操作等因素进行排查，针对试验中可能遇到的各类问题，采用不同方案确保网络备自投功能的实时传输验收。

网络备自投试点成功应用，能够实现未配置备自投的变电站设备发生故障时，快速隔离故障，实现 s 级复电，同时采用级差配置作为现场备自投装置双重化配置，提升了电网自愈能力，缩短了停电时长。

5 结束语

由于目前网络备自投装置已经在县级电网的 110 kV 新站建设和旧站改造中应用，实际运行中出现各种问题是不可避免的，因此在技术协议、设计、安装中尽量考虑全面，为了正确使用备自投，对备用自投操作流程进行规范管理，这是保证电力系统安全、稳定、可靠运行的有力手段。总之，提升各种技术措施和组织措施，对保证电力供应、提高电网可靠性具有重要作用。

作者简介

王留长（1983—），男，本科，中级工程师，主要工作方向：调控运行管理。

（责任编辑：袁航）

资讯

浙江衢州公司：零距离服务特色农业电气化生产

2023 年 10 月 16 日，在浙江衢州龙游县小南海镇未来农业园区草莓种植基地的电气化智能大棚内，园区技术负责人向前来义务开展用电检查的国网衢州供电公司供电员工介绍育苗情况。

相较人工大棚草莓种植，该园区采用了电气化、智能化的玻璃大棚管理种植模式，每个大棚都配备了棚顶遮阳布、棚内暖风机、一体化水肥灌溉设备，通过智能物联管控系统实现草莓种植过程中的温度控制精准化、水肥灌溉自动化。

智能化大棚对供电可靠性要求很高，国网衢州供电公司配合该园区做好线路的建设改造工作，并成立供电服务专班，定期进行线路巡视，为园区提供优质的电力服务和可靠的供电保障。

信息来源：国网浙江省电力有限公司



中国电机工程学会 《农村电气化》 《农电管理》 2024 年订阅单

【订单获取】

- 1.农村电气化或农电管理期刊微信公众号；
- 2.农村电气化官网 <http://www.chinarein.com>；
- 3.微信小程序“国字出版”；
- 4.期刊2023年第10期至2024年第3期最后一页。



【联系方式】

- 1.期刊订阅专用邮箱：guoyu@csre.org.cn；
- 2.国家电网公司内网邮箱：ndzwh@bj.sgcc.com.cn。

【订单邮寄地址】

北京市大兴区地盛北街2号院17号楼101，发行部，电话010-63231636/38，邮编：100176。

【合订本订阅】

订阅两刊过刊合订本可扫描右侧微信二维码下单。

订阅数量	农村电气化		全年12期定价	192.00元		两刊共计 册 期刊款总额 元
	()	册	书款合计	()	元	
	农电管理		全年12期定价	144.00元		
	()	册	书款合计	()	元	
收书单位					邮政编码	
收书地址	省 市 县(区)					
收书人	联系电话					
如需发票，请提供贵单位以下各项信息。信息请务必完整，以免发生退票或重开票等情况						
发票类型	<input type="checkbox"/> 增值税专用发票 <input type="checkbox"/> 增值税普通发票				发票收件人	
单位名称					税号	
开户行					账号	
地址					电话	
北京国宇出版有限公司收款账户信息：						
收款户名	北京国宇出版有限公司					
银行汇款	工商银行账号：0200 0414 0920 1503 351					
	开户行：工行北京会城门支行					
注意事项	汇款转账时请务必注明汇款人单位（或姓名）及电话，以免影响后续对账					