

输电线路立体式运维模式与带电作业

杨文龙, 刘红霞

(青海送变电工程有限公司输变电运检分公司(应急抢修中心))

【摘要】随着电网规模不断扩大和运行环境的日益复杂,传统单一巡视方式已难以满足输电线路高效、安全运维需求。文章以立体式运维模式与带电作业协同应用为主题,重点阐述带电作业中的风险识别与评估、安全管理制度与应急预案制定、个人防护及团队管理措施,以及智能巡检与带电作业联动、无人机巡检在带电巡视中的应用与数据驱动运维决策优化方法。通过多层次、多手段联动,实现对潜在故障的精准预警和快速处置,提升运维效率并最大程度降低安全风险,为电网可靠运行提供了可行的技术与管理框架。

【关键词】立体式运维;带电作业;风险评估;智能巡检

中图分类号: TM75

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.176

Three-dimensional Maintenance Model for Transmission Lines and Live-line Operations

YANG Wen-long, LIU Hong-xia

(Qinghai Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd. Transmission and Transformation Maintenance Branch (Emergency Repair Center))

【Abstract】With the continuous expansion of the power grid scale and increasingly complex operating environment, traditional single inspection methods are no longer sufficient to meet the efficient and safe operation and maintenance requirements of transmission lines. This paper takes the synergistic application of three-dimensional operation and maintenance mode and live-line work as its theme, focusing on elaborating on risk identification and assessment, safety management systems and emergency response plan formulation, personal protective measures and team management strategies in live-line work, as well as the linkage between intelligent inspection and live-line work, the application of drone inspections in live-line patrols, and data-driven operation and maintenance decision-optimization methods. Through multi-level, multi-method coordination, this approach achieves precise early warning and rapid response to potential faults, enhances operation and maintenance efficiency, and minimizes safety risks to the greatest extent, providing a feasible technique and management framework for ensuring the reliable operation of the power grid.

【Keywords】three-dimensional operation and maintenance; live-line work; risk assessment; intelligent inspection

1 输电线路立体式运维模式概述

随着输电线路跨越地形复杂区域及电网规模不断扩大,依赖人工徒步巡线的方式逐渐暴露出效率低、覆盖面窄、隐患难以及时发现等问题。近年来,新能源并网、电压等级提升和智能化需求日益增长,对运维模式提出更高要求^[1]。立体式运维在定义上既包括地面巡检、空中巡视、地下检测,也涵盖无人机、机器人等新技术的应用。随着数字化、信息化技术的快速进步和电网安全性、可靠性的迫切需求,立体式运维在我国和国际电力行业都得到重视与推广。如欧洲利用直升机航空巡线结合地面红外检测;美国注重导入物联网与大数据,实现远程监测与预警。随着国家“智慧电网”建设的推进,政府与企业加大投入力度,发布相关技术规范与安全标准,为立体式运维模式创新奠定了基础^[2-4]。

2 立体式运维模式的关键技术

2.1 智能巡检与在线监测技术

智能巡检与在线监测技术是立体式运维的基础环节,通过在输电线路关键部位布设传感器、安装监测终端和摄像设备,实现对导线振动、局部放电、温度变化等运行状态的连续监测。基于物联网技术,将采集到的数据实时上传至云平台,通过数据清洗与预处理,应用机器学习或深度学习算法进行特征提取与异常检测,可准确识别异常行为。

2.2 无人机与机器人辅助运维技术

无人机与机器人辅助运维技术在立体式运维体系中扮演关键角色。无人机具备飞行高度灵活、机动性强的优势,可搭载高清摄像、红外热成像、激光雷达等设备,对导线、绝缘子、金具等重点部位进行

高空巡检。通过预设航线和自主避障功能,无人机可在复杂地形和高压电磁场环境中安全作业,及时采集图像和数据,并传输至运维中心。机器人辅助则主要针对塔基、基座及通道等地面区域,采用履带式或腿式结构,在AI算法引导下完成光学巡检、声波检测甚至轻量化维修作业,大幅减少人工进入高危场景的频次与风险^[6]。

2.3 地理信息系统(GIS)与大数据应用

地理信息系统(GIS)与大数据应用是立体式运维模式的重要支撑。GIS技术可提供输电线路空间拓扑关系可视化,通过高精度的三维地图和地形模型,运维人员能够直观查看线路走廊沿线区域的植被分布、地质地貌及周边环境,为巡视路径规划和安全评估提供依据。大数据平台则整合历史故障记录、设备档案、气象数据及在线监测数据,对海量信息进行存储、处理与分析。通过构建时空数据库并运用数据挖掘与机器学习算法,可精准预测线路故障趋势和风险特点,为维护策略优化提供科学参考。

3 带电作业技术原理与流程

3.1 带电作业的基本原理

带电作业是指在输电线路正常带电状态下,对导线、绝缘子、金具等构件进行检修或维护的技术方法,其核心原理在于电场分布与电位均衡。首先,通过绝缘作业杆和绝缘梯子将作业人员与带电体保持安全距离,利用绝缘材料隔离电场影响,防止电流通过人体形成回路。其次,采用线夹式接地线或双重等电位连接,对作业点进行临时均压处理,使作业区域电位与周边带电体电位保持一致,从而消除电势差带来的电击风险。

3.2 带电作业常用工具与装备

带电作业需要配备专用的绝缘工具与防护装备,这些工具在设计上遵循绝缘强度与机械性能相结合的原则,以保证在高电压环境下使用时既能承受电场冲击又具备足够的机械操作性能。常见的工具包括:绝缘作业杆,用于在高空远距离操作带电导体,其杆体采用玻璃钢或复合材料制成,具备优异的电绝缘性能;绝缘梯子,整梯由绝缘材料制成,能够承载人体重量并保持与带电部分的安全距离;线夹式均压装置,用于在截断或修复导线前对线路进行临时均压,避免电位差产生电击;绝缘手套与绝缘

靴,采用专用橡胶材料制成,具有规定的耐电压等级,通过定期充气测试或击穿测试确保完好;绝缘护罩及金具,主要用于对绝缘子串、金具和导线交叉点进行包覆,防止作业过程中发生电弧;绝缘护具套装,包括头盔、护目镜、绝缘服等,通过多层绝缘与散热设计,提高人体防护能力。

3.3 带电作业流程与准备

带电作业前必须制定详细的作业方案与安全措施,并严格执行审批流程与技术交底。首先,由项目负责人组织技术人员对线路环境、设备现状和气象条件进行综合评估,明确作业内容、作业区域和影响范围,同时召开风险评估会议,分析可能出现的电气风险、人员风险和环境风险,并确定应急预案。其次,依据评估结果编制带电作业方案,内容包括作业目的、作业顺序、操作要领、所需工具与装备清单,以及安全保障措施与应急处理流程。在方案编制完成后,须向供电调度中心提出书面申请,说明带电作业时间、线路运行状态和倒闸操作安排,获得批准后方可实施。接下来,组织作业人员进行现场交底和技术培训,重点讲解带电作业原理、工具使用和个人防护要点,并进行模拟演练与应急演练,确保人员熟悉作业流程与逃生通道。作业前,还需对绝缘工具和接地线进行检测,确保其电气性能符合规定;检查现场电磁环境与气象条件,避免大风、雷雨等不利天气造成隐患;按照方案要求架设接地线、均压线和隔离警示标志,为带电作业区域划定安全范围。

4 安全管理与风险控制

4.1 带电作业风险识别与评估

带电作业风险识别需从电气风险、环境风险和人为因素三方面展开。首先,对线路电气参数进行分析,明确电压等级、电场强度与感应电压范围;其次,评估作业环境,包括地形地貌、气象条件和周边障碍物,判断风速、雨雪和雷电等对安全的影响;再次,识别作业人员技能水平、操作规范遵循情况及疲劳状态,防止人为失误。风险评估可将风险等级划分为“低、中、高、极高”四个层次,通过定量或半定量分析各类风险对作业安全的影响程度。

4.2 安全管理制度与应急预案

应制定涵盖组织架构、职责分工、作业流程、操作规范和检查验收等内容的规章制度,明确项目负

责人、安全员、监护人员和作业人员的职责与权限。其次,通过制度化的安全教育和培训,使每位参与人员熟悉带电作业原理、工具使用和应急操作流程,并定期开展考核。应急预案需针对常见事故类型(如电弧闪络、触电、设备故障和突发气象变化)制定详细处置流程,包括启动条件、抢险队伍组成、急救措施和应急联动机制。预案编制完成后,定期组织演练,通过模拟场景检验预案可行性和响应速度。

4.3 个人防护与作业团队管理

作业人员必须配备符合电压等级要求的绝缘手套、绝缘靴、绝缘服、头盔和护目镜,并在每次使用前进行电气强度测试和机械性能检查。团队管理方面,应根据作业任务和风险等级配置足够的专业人员,实行“一作二监护”制度,即每个作业小组至少配备一名监护员,负责远程观察和通信联络。作业前组织技能培训和交底,明确分工与协作要求,作业过程中保持队形队列与手势、语音等多种沟通方式,及时向指挥中心汇报现场情况。团队成员需遵守轮换休息制度,防止疲劳作业导致判断失误。

5 立体式运维模式与带电作业的协同

5.1 智能巡检与带电作业联动机制

智能巡检系统通过在线传感器、监测终端和边缘计算设备,对输电线路进行全天候监控。一旦系统检测到温度异常、局部放电或导线振动等告警信息,即可自动预警至运维指挥中心。指挥中心结合历史数据和趋势分析,判断隐患性质与严重程度,必要时安排带电作业团队提前介入处置。巡检系统与带电作业团队保持实时通信,作业人员可通过移动终端获取巡检点的精准位置、故障类型和环境参数,通过与GIS平台对接,可在三维地图上直观展示告警点。智能巡检与带电作业联动机制还支持动态调整巡检频率和作业周期,最大限度地减少停电检修对供电的影响,确保电网稳定运行。

5.2 无人机平台在带电巡视中的应用

在带电巡视中,经过专业调校的无人机搭载高清摄像头、红外热成像和激光雷达,可对导线、绝缘子、金具等关键部位进行远距离、高精度的检测。作业前,飞行员通过预设航线和避障系统规划巡航路径,确保在保证安全距离的前提下获取清晰图像与数据。无人机飞行过程中,实时回传图像与红外热

区分布信息,技术人员可在指挥中心快速分析识别隐患,如绝缘子局部过热或导线弧垂异常,并发出警示信号。此外,在夜间或复杂地形环境下,无人机可利用激光雷达扫描生成三维点云,实现对线路走廊的精确建模,为后续带电作业提供空间参考。对于发现的重点隐患,无人机可标记GPS坐标,为现场作业准备提供精准信息支持。

5.3 数据驱动的运维决策与优化

构建时空数据库,将传感器实时采集的电流、电压、温度和振动等运行数据与地理信息系统(GIS)数据相结合,形成线路拓扑和环境影响因素的综合模型。应用机器学习算法对设备故障模式和隐患前兆进行挖掘,提高故障预测的准确性和提前量。基于数据分析,运维决策支持系统可自动生成检修计划,将带电作业与无人机巡检、地面巡视和人工巡线等多种手段有机结合,优化作业顺序与资源分配。通过持续迭代分析与模型更新,动态调整巡检频率和作业策略,实现预防性维护与精细化管理。

6 结语

立体式运维模式与带电作业的深度融合,为输电线路安全、高效运维提供了坚实的技术支撑。通过系统化的风险识别与评估、完善的安全管理制度与应急预案、严谨的个人防护与团队管理,以及智能巡检与无人机等新技术的协同应用,能够实现对线路运行状态的实时监控和精准维护。数据驱动运维促进了电网稳定运行的预防性维护和精细化管理。

参考文献

- [1] 周虹辰. 无人机在输电线路运维检修中的应用分析[J]. 中国设备工程, 2025 (9): 159-161.
- [2] 周军力, 方钰. 基于智能监控的110kV架空线路故障检测与运维优化技术研究[J]. 自动化应用, 2025, 66 (8): 200-202+205.
- [3] 高康, 谢鹏. 自适应巡检系统在500kV超高压输电线路运维中的应用与优化[J]. 电力设备管理, 2025 (5): 139-141.
- [4] 钦伟勋, 李海思. 配网线路运维异常风险识别与评估方法研究[J]. 电力设备管理, 2025 (5): 215-217.
- [5] 李裕杰, 孙佳星. 刍议输电线路运维及检修技术的提升[J]. 中国电力企业管理, 2025 (8): 30-31.
- [6] 王耀宇, 李渊. 红外成像技术在配电网输电线路检修运维中的应用[J]. 家电维修, 2025 (3): 122-124.