

电力输电线路运行故障排查与处理技术研究

王普赞 陈龙飞

内蒙古电力(集团)有限责任公司薛家湾供电分公司 内蒙古自治区 鄂尔多斯 010300

摘要: 输电线路是电力系统的核心组成部分,其故障会严重影响电网安全稳定运行。本文分析输电线路常见故障类型、成因机理及多维度影响;研究了在线监测、离线检测及多源数据融合诊断等故障排查关键技术;探讨处理预案库构建、数字孪生等故障处理决策与智能优化技术;最后展望5G+边缘计算、AI与专家系统融合等未来方向。研究旨在为输电线路故障高效排查与智能处理提供技术参考,提升电网供电可靠性与精益化管理水平。

关键词: 输电线路;故障排查;智能诊断

引言: 随着社会经济快速发展,电力需求持续攀升,输电线路作为电能传输的关键载体,其运行稳定性直接关系到电力系统安全与能源供应保障。当前,输电线路广泛分布于复杂地理环境中,易受自然灾害、人为破坏、设备老化等因素影响,故障频发且处置难度大。传统故障排查与处理方式存在响应慢、精度低、安全性差等问题,难以满足现代电网精益化运行需求。因此,系统研究输电线路故障类型与成因,探索高效排查技术及智能处理方案,对提升故障处置效率、保障电网安全稳定运行具有重要现实意义。

1 输电线路故障类型与成因分析

1.1 常见故障类型

输电线路常见故障类型可按故障性质、影响范围等维度划分,核心包括短路故障、断线故障、覆冰闪络故障及雷击故障等。短路故障中,单相接地短路发生率最高,约占总故障数的60%以上,多表现为线路与大地或树木等物体意外接触;相间短路危害更大,易引发线路跳闸、设备损坏。断线故障分为单相断线和多相断线,多由导线老化、外力破坏或覆冰过重导致,可能造成线路倒塔等连锁事故。覆冰闪络故障常见于低温雨雪天气,冰层累积使导线绝缘性能下降,引发间隙放电;雷击故障则集中在雷雨季节,雷电过电压会击穿线路绝缘层^[1]。还有风偏故障、鸟害故障等特殊类型,其发生与地域环境、气候条件密切相关,不同故障类型的表现特征与影响程度存在显著差异。

1.2 故障成因机理

输电线路故障成因复杂,可归纳为自然环境因素、人为因素、设备自身因素三大类。自然环境因素是主要诱因,极端天气如暴雨、暴雪、雷电、大风等会直接破坏线路结构或绝缘性能:雷击时,雷电冲击波产生的过电压远超线路额定绝缘水平,瞬间击穿绝缘层引发故障;

覆冰天气下,冰层重力使导线张力增大,同时可能产生脱冰跳跃,导致导线碰撞短路。人为因素包括外力施工破坏、盗窃线路设备、植被无序生长等,其中施工机械误碰线路是近年来人为故障的主要形式。设备自身因素涵盖导线、绝缘子、杆塔等部件的质量缺陷与老化问题,导线接头氧化、绝缘子老化失效会降低线路运行稳定性,长期疲劳运行后易诱发故障。

1.3 故障影响评估

输电线路故障会对电力系统安全稳定运行、社会生产生活及经济发展产生多维度影响,其评估需涵盖故障损失、影响范围、恢复难度等核心指标。从系统层面看,严重故障可能引发电网电压骤降、频率波动,甚至导致电网解列,破坏电力系统暂态稳定,造成大面积停电。从经济层面讲,工业用户停电会导致生产中断,产生直接经济损失,同时停电还会影响商业、民生用电,间接加剧经济损失,据统计,单次大面积输电线路故障造成的经济损失可达千万元以上。从安全层面,故障可能引发火灾、倒塔等次生灾害,威胁周边居民生命财产安全。故障还会降低电网供电可靠性,影响电力企业品牌形象。评估过程中需结合故障类型、发生时段、涉及用户群体等因素,量化损失程度,为后续故障处理与预防措施制定提供科学依据。

2 电力输电线路运行故障排查关键技术研究

2.1 在线监测技术

在线监测技术是实现输电线路故障实时排查的核心手段,通过在线路关键节点部署各类传感器与监测设备,持续采集导线温度、电流、电压、绝缘子泄漏电流及环境气象等数据。核心技术包括导线状态监测技术,采用光纤光栅传感器、红外测温传感器等,实时监测导线覆冰厚度、弧垂变化及温度分布,精准识别导线过热、覆冰等异常状态;绝缘子监测技术通过监测泄漏电流、表

面污秽程度, 预判绝缘失效风险; 杆塔状态监测则借助倾角传感器、振动传感器, 实时掌握杆塔倾斜、沉降及微风振动情况^[2]。监测数据通过无线通信模块传输至后台系统, 经数据预处理与分析, 实现故障的早期预警与定位, 其优势在于无需停电、监测范围广、响应速度快, 能有效提升故障排查的及时性与准确性, 为线路精益化运行提供数据支撑。

2.2 离线检测技术

离线检测技术是在线监测技术的重要补充, 主要针对线路停电检修场景, 通过专业设备与人工协同作业, 对输电线路关键部件进行全面检测。核心技术包括红外热成像检测技术, 利用红外热像仪捕捉导线接头、绝缘子等部件的温度场分布, 精准定位隐性过热缺陷; 超声波检测技术用于检测绝缘子内部裂纹、杆塔焊缝缺陷等, 通过超声波反射信号判断部件损伤程度; 绝缘电阻测试技术通过测量绝缘子、电缆等部件的绝缘电阻值, 评估其绝缘性能。还有导线无损检测、杆塔接地电阻测试等技术, 离线检测的优势在于检测精度高、缺陷识别全面, 能发现在线监测难以捕捉的隐性故障。但该技术需占用线路停电时间, 检测效率受地形环境、检测人员专业水平影响较大, 通常与在线监测技术配合使用, 形成“实时监测+定期检修”的排查模式。

2.3 多源数据融合诊断方法

多源数据融合诊断方法通过整合在线监测、离线检测、气象预警、历史故障等多维度数据, 利用数据融合算法实现故障的精准诊断与定位, 解决单一数据源存在的信息片面、误差较大等问题。其核心流程包括数据预处理、特征提取、融合诊断与结果输出: 数据预处理阶段对不同来源、不同格式的数据进行清洗、标准化转换, 剔除异常数据; 特征提取阶段采用小波变换、主成分分析等方法, 从多源数据中提取与故障相关的核心特征; 融合诊断阶段借助贝叶斯推理、神经网络等算法, 对多维度特征进行融合分析, 综合判断故障类型、位置及严重程度。该方法能充分挖掘各数据源的互补价值, 提升故障诊断的准确性与可靠性, 有效降低单一检测方法的误判率。目前已在复杂地形输电线路故障排查中得到应用, 尤其适用于多因素复合故障的诊断, 为故障快速处置提供精准依据。

3 故障处理决策与智能优化技术

3.1 处理预案库构建

故障处理预案库构建是提升输电线路故障处置效率的基础, 通过系统梳理历史故障案例、结合线路运行特性与技术规范, 建立涵盖各类故障场景的标准化处理预

案体系。构建过程需遵循全面性、针对性与动态性原则, 首先收集不同地域、不同气候条件下的输电线路故障案例, 对故障类型、成因、处置流程及效果进行分类汇总与深度分析; 其次, 基于故障特征构建预案分类框架, 按短路、覆冰、雷击等故障类型划分预案模块, 每个模块明确故障判定标准、处置流程、人员配置、设备需求及安全注意事项^[3]。同时, 结合电网拓扑结构、负荷分布等动态信息, 为不同区段线路定制差异化处置方案。预案库需建立动态更新机制, 定期融入新的故障案例与处置经验, 借助大数据分析优化预案内容, 确保预案的时效性与可操作性, 为故障发生后的快速响应提供标准化指导。

3.2 数字孪生仿真技术

数字孪生仿真技术通过构建输电线路物理实体的虚拟映射模型, 实现故障处理过程的可视化仿真与决策优化, 为故障处置提供精准的虚拟验证环境。该技术以输电线路全生命周期数据为基础, 整合线路设计参数、运行数据、环境数据等多源信息, 采用三维建模、数值仿真等技术构建高保真虚拟模型, 实现物理实体与虚拟模型的实时数据同步。在故障处理中, 可通过虚拟模型模拟不同故障场景下的处置方案, 如导线更换、杆塔修复等作业流程, 预判作业过程中可能出现的风险, 优化作业步骤与人员设备配置。借助数字孪生模型可开展故障演化过程仿真, 分析故障蔓延路径, 为故障隔离与止损提供科学依据。该技术打破了传统故障处理的经验依赖, 提升了处置决策的科学性与精准性。

3.3 无人机-机器人协同处理技术

无人机-机器人协同处理技术是输电线路故障处置的新型智能技术, 通过整合无人机的高空巡检优势与机器人的精准作业能力, 实现故障排查、定位、处置的全流程协同作业。在故障排查阶段, 无人机搭载高清摄像头、红外热像仪等设备, 快速完成故障区域的大范围巡检, 精准定位故障点位置与类型, 并将实时图像与数据传输至后台系统; 对于无人机难以近距离观测的故障点, 可调度地面机器人抵达现场, 通过机械臂搭载检测设备开展近距离检测。在故障处置阶段, 机器人可完成导线清理、绝缘子更换等简单作业, 对于复杂作业, 无人机可提供空中辅助定位与牵引, 协同完成故障处理。该技术无需人员高空作业, 大幅提升了作业安全性, 同时相比传统人工处置效率提升50%以上, 尤其适用于高山峡谷、偏远地区等复杂地形的输电线路故障处理, 推动故障处置向无人化、智能化转型。

4 未来方向

4.1 5G+边缘计算实现故障实时处理

5G+边缘计算技术的融合应用,将彻底突破传统输电线路故障处理的时延瓶颈,实现故障的实时感知、诊断与处置。5G技术具备高带宽、低时延、广连接的特性,可实现监测设备与边缘节点之间的海量数据高速传输,时延控制在10毫秒以内,满足故障实时处理的通信需求;边缘计算则将数据处理能力下沉至线路附近的边缘节点,避免数据远距离传输至云端带来的时延损耗,实现监测数据的本地实时分析与诊断。通过两者融合,可构建“感知-分析-决策-处置”的闭环实时处理系统:监测设备采集的故障数据经边缘节点快速分析后,立即生成处置指令,调度无人机、机器人等设备开展实时处置,同时将关键数据同步至云端系统备案。该技术可大幅缩短故障处置时间,将传统故障处置的小时级缩短至分钟级,显著提升电网供电可靠性,尤其适用于特高压、跨区域骨干输电线路的故障处理。

4.2 人工智能与专家系统深度融合

人工智能与专家系统的深度融合,将推动输电线路故障诊断与处置决策向更高智能水平发展。传统专家系统依赖人工总结的故障处理经验,存在知识更新滞后、复杂故障应对能力不足等问题;人工智能技术则具备强大的数据挖掘与自主学习能力,可从海量历史故障数据中自动挖掘故障规律与处置经验。两者融合后,一方面,人工智能算法可对专家系统的知识库进行动态更新与优化,补充专家经验未覆盖的复杂故障场景;另一方面,专家系统可为人工智能模型提供先验知识约束,提升模型诊断的准确性与可解释性^[4]。融合系统可实现故障的精准诊断、处置方案的智能生成与动态优化,甚至能预判潜在故障风险。例如,通过深度学习算法分析线路运行数据,提前识别导线老化、绝缘子性能下降等隐性缺陷,结合专家系统制定预防性维护方案,推动故障处理从“事后处置”向“事前预防”转变。

4.3 输电线路全生命周期数字化管理

输电线路全生命周期数字化管理将实现线路从规划

设计、建设施工、运行维护到退役报废的全流程数字化管控,为故障预防与处理提供全维度数据支撑。该管理模式以数字化建模为基础,整合线路规划阶段的设计参数、建设阶段的施工数据、运行阶段的监测数据及维护阶段的处置记录,构建全生命周期数据档案。通过大数据分析可视化技术,实现线路运行状态的全流程追溯与动态评估,提前识别可能诱发故障的薄弱环节。在故障处理中,可快速调用线路全生命周期数据,精准分析故障成因与影响范围,优化处置方案;在退役阶段,可基于全生命周期数据开展安全性与经济性评估,制定科学的退役与更新方案。该技术打破了输电线路各生命周期阶段的数据壁垒,实现数据的共享与复用,提升线路管理的精细化水平,从源头降低故障发生概率,为电网高质量运行提供保障。

结束语

本文围绕输电线路故障排查与处理技术展开系统研究,梳理了故障类型、成因及影响,探讨了排查、处理关键技术及未来发展方向。故障排查与处理技术的智能化、数字化升级是电网发展的必然趋势,5G+边缘计算、AI与专家系统融合等技术的应用,将大幅提升故障处置的实时性与精准性。后续需进一步深化技术研发与实践应用,推动全生命周期数字化管理落地,持续提升输电线路运行可靠性,为构建安全、高效、智能的现代电力系统提供坚实保障。

参考文献

- [1]李雪芬.关于电力输配电线路的运行维护分析及故障排除技术探讨[J].石河子科技,2021,(03):12-13.
- [2]彭启轩.关于电力输配电线路的运行维护与故障排除技术[J].中国新通信,2020,22(22):146-147.
- [3]杨潇.输电线路运检中绝缘子故障与检测技术研究[J].电力设备管理,2023(24):28-30.
- [4]高明.电力输配电线路的运行维护与故障排除技术[J].科技创新与应用,2021,11(28):127-129.