

输配电线路安全运行的影响因素及风险管理研究

王明睿

(国网江西省电力有限公司宜黄县供电分公司, 江西 抚州 344400)

摘要 输配电线路作为电力系统的核心载体, 其安全稳定运行直接关系到能源供应的可靠性和社会经济的可持续发展。本文基于国家能源局、电网企业及科研机构的公开数据与研究成果, 系统分析了输配电线路安全运行的主要影响因素, 包括自然环境、设备质量、运维管理、技术标准等, 并结合风险管理理论提出分层防控策略, 以期提升输配电线路安全水平提供参考。

关键词 输配电线路; 安全运行; 风险管理; 极端天气灾害; 设备老化

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.034

0 引言

随着我国电网规模的快速扩张和新能源的大规模接入, 输配电线路的复杂性和运行风险显著增加。根据国家能源局2024年发布的《电力设施保护专项报告》, 近五年全国输配电线路故障停运次数年均增长4.3%, 其中自然灾害与设备老化问题占比超过60%。在此背景下, 深入研究输配电线路安全运行的影响因素及风险管理策略, 对保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。

1 输配电线路安全运行的影响因素分析

1.1 极端天气灾害

我国各地区的环境不同, 加之输配电线路长期在室外, 在这种情况下就容易受到雷电、洪水等问题的影响, 直接影响其运行安全。其中, 覆冰对输配电线路造成的影响尤其大, 非常容易引起跳闸, 如果覆冰的厚度超出线路设计标准, 还会出现断线问题; 雷电容易导致绝缘子脱落, 可能引发永久故障; 台风往往伴随暴雨, 不仅会影响线路基础, 而且可能引发倒塌问题。雷击、山火、冰灾等自然灾害对输配电线路的破坏具有突发性和复杂性。山火不仅直接烧毁线路本体, 还会通过热辐射导致杆塔结构强度下降, 同时烟雾中的导电颗粒可能引发绝缘子表面污闪。在冰灾环境下, 导线覆冰导致机械载荷剧增, 易引发断线、倒塔等连锁故障, 且覆冰不均匀会加剧导线舞动幅度, 形成动态应力集中。此类灾害的频发与全球气候变化导致的极端天气事件增多直接相关, 其空间分布特征与输电走廊规划存在显著空间叠合风险^[1]。

1.2 设备质量与老化问题

1. 设备制造缺陷。输配电设备制造环节的质量控制漏洞直接影响线路长期可靠性。绝缘子制造过程中, 原材料纯度不足或烧结工艺偏差易导致零值绝缘子出现, 其机械强度与电气性能的劣化具有不可逆性。金具连接部位的铸造缺陷可能引发局部应力集中, 加速疲劳裂纹扩展。在导线制造中, 铝锭成分偏析或绞合工艺不当会造成抗拉强度下降, 服役过程中易发生断股事故。此类缺陷的隐蔽性使得常规检测手段难以及时识别, 需通过无损检测技术与全生命周期质量追溯体系实现过程管控^[2]。

2. 设备老化加速。电力设备长期暴露于复杂环境导致性能退化呈现非线性特征。金属部件在电化学腐蚀、机械振动及温度交变作用下, 微观结构发生相变与晶格畸变, 宏观表现为机械强度衰减与导电率下降。有机绝缘材料受紫外线、臭氧及湿热环境作用, 发生交联密度降低与分子链断裂, 导致绝缘击穿场强下降。老化设备的剩余寿命评估需综合考虑服役时间、环境应力与负载率等多维因素, 传统定期检修模式难以适应老化速率的时空差异性, 亟需建立基于状态监测的动态寿命预测模型。

1.3 运维管理不足

1. 巡检效率低下。传统人工巡检模式受限于地形复杂性与劳动强度, 难以实现全线路周期性覆盖。山区线路通道狭窄、植被茂密区域存在视觉盲区, 杆塔高处部件检查需依赖登塔作业, 单次巡检耗时长达数

作者简介: 王明睿(1996-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 输配电线路安全运行。

小时。缺陷识别依赖人工经验判断,易出现漏检与误判。智能化巡检技术虽已引入无人机与红外热像仪,但多源异构数据的融合分析与缺陷智能诊断算法尚处于工程验证阶段,实际应用中存在误报率偏高与定位精度不足等问题。

2. 应急预案不完善。应急预案体系的有效性取决于风险预判与处置流程的标准化程度。多数单位应急预案缺乏动态修订机制,未充分考虑极端天气复合灾害场景下的多环节联动需求。应急物资储备存在区域分布不均与品类缺失问题,关键抢修设备如带电作业车、应急发电机的调配响应时间超出预期。演练场景设计偏重程序性操作,对复杂故障模式下的协同决策与资源调度缺乏实战检验,导致实际突发事件处置效率低于理论预期^[3]。

1.4 生态保护与线路走廊矛盾

输电线路建设与生态敏感区保护的冲突日益突出。线路路径规划需规避自然保护区、水源涵养区等生态红线区域,但地形限制常导致线路被迫穿越生态脆弱区,引发植被破坏与水土流失。鸟类活动引发的线路短路事故频发,防鸟害装置安装与生态友好性之间的平衡亟待解决。噪声污染与电磁辐射对周边居民健康的影响评估体系尚不完善,公众对输电设施的接受度成为项目推进的重要制约因素。

2 输配电线路风险管理框架构建

2.1 风险识别与评估

1. 数据驱动的风险建模。输配电线路风险建模需整合多源异构数据,构建时空关联的动态评估体系。基于历史故障记录、气象监测数据、地理信息图谱及设备状态参数,建立线路风险概率分布模型。通过卫星遥感技术获取地表温度、植被覆盖度等山火风险因子,结合激光雷达扫描生成的厘米级地形高程数据,实现线路走廊三维空间风险可视化。机器学习算法可挖掘气象参数与故障发生的非线性关系,建立基于随机森林或长短期记忆网络的预测模型,动态生成风险热力图。此类模型需定期通过交叉验证与实际故障数据对比校准,确保预测精度满足工程需求。

2. 设备状态分级评价。设备状态评估需建立多维度指标体系,涵盖电气性能、机械特性及环境适应性等参数。采用层次分析法确定各指标权重,通过模糊综合评价法将定量数据与专家经验结合,实现设备健康状态分级。针对关键部件如绝缘子、导线接续管等,建立退化速率模型,结合剩余寿命预测算法,划分风险等级。红色等级设备需执行立即停运、解体检查等

强制措施,黄色等级设备纳入重点监测清单,实施周期性带电检测与预防性试验。评估结果需同步至资产管理系统,为设备更换与改造提供决策依据。

2.2 风险防控技术措施

1. 智能化监测系统。在线监测装置通过部署分布式光纤测温、微气象站及振动传感器,实时采集导线温度、风速、覆冰厚度等参数。采用边缘计算技术实现数据本地化处理,异常工况触发阈值告警后,通过 5G 专网传输至调控中心。无人机巡检系统搭载高分辨率可见光相机与红外热像仪,规划自主巡检航线,利用深度学习算法自动识别绝缘子破损、导线断股等缺陷。机器人巡检技术突破复杂地形限制,配备激光雷达与机械臂,实现杆塔攀爬与局部放电检测,显著提升高危区域巡检效率与安全性^[4]。

2. 防雷与防污技术。防雷系统优化需结合雷电定位系统数据,开展线路雷击风险区段划分。采用差异化防雷措施,在高雷暴区域架设耦合地线,安装智能型避雷器并配置动作计数器。接地装置改造采用降阻模块与离子接地极组合方案,定期进行导通性检测与接地电阻测量。防污闪治理需建立污秽度监测网络,通过等值盐密与灰密检测确定污区等级,选用硅橡胶复合绝缘子与防污涂料,制定基于气象预报的清扫周期。对于重污秽区域,推广配置泄漏电流监测装置,实现污秽闪络风险动态预警。

2.3 风险管理体系优化

风险分级管控体系需建立五级分类标准,依据风险值大小实施红、橙、黄、蓝、绿分级标识。针对不同等级制定管控清单,明确责任部门与处置时限。隐患排查治理采用 PDCA 循环模式,通过移动巡检终端实现隐患上报、派单、整改、验收全流程数字化。建立隐患数据库,运用关联规则挖掘技术识别共性隐患,优化设备选型与施工工艺。定期开展风险评估复盘,动态调整管控策略,形成“识别—评估—控制—反馈”闭环管理机制。

构建多层次应急指挥体系,整合气象预警、卫星监测与现场巡检数据,实现灾情态势实时感知。制定标准化应急预案库,涵盖山火、覆冰、外力破坏等典型场景,明确响应流程与资源调配方案。建立跨部门应急联动平台,打通电力与应急管理、气象、林业等部门数据接口,实现应急物资联储联备与快速投送。定期组织多场景应急演练,重点检验通信中断、道路损毁等极端条件下的指挥协调能力。推广无人机物资投送与应急通信车组应用,提升抢修队伍复杂环境作业能力。

2.4 技术标准与制度保障

加快制定输配电线路抗灾设计标准,明确不同气候区划下的风速、覆冰、雷电防护等级。统一设备状态监测装置技术规范,规定传感器精度、数据传输协议及接口标准。修订反事故措施导则,针对新型风险源如新能源场站谐波、直流偏磁等制定专项防控要求。推动标准国际化对接,吸收 IEEE、CIGRE 等国际组织最新成果,提升标准前瞻性与适用性。建立线路全寿命周期管理制度,涵盖规划设计、建设施工、运维检修与退役报废各环节。推行设备主人制,明确设备全流程责任人,实施绩效考核与责任追溯。完善外包队伍准入机制,建立安全信用评价体系,实施黑名单动态管理。探索基于区块链技术的设备履历管理,确保数据不可篡改与可追溯性。加强新技术应用伦理审查,制定人工智能算法可解释性标准,防范技术滥用风险。

3 关键技术与实践路径

3.1 智能化技术应用

数字孪生技术通过高精度三维建模与多源数据融合,构建输电线路的虚拟镜像系统。基于激光雷达扫描与卫星遥感数据,建立厘米级精度的线路走廊三维地理信息模型,集成气象监测、导线应力、杆塔倾斜等实时动态参数。通过物理引擎模拟极端天气场景下的线路响应,预测覆冰厚度、风偏位移等关键指标,为防灾减灾提供量化依据。该技术支持在线仿真分析,可在虚拟环境中验证检修方案可行性,优化停电计划与资源调配策略。

机器学习算法在设备状态预测中发挥核心作用。通过分析历史巡检数据、环境参数及故障记录,构建绝缘子劣化、导线断股等典型缺陷的预测模型。采用长短期记忆网络(LSTM)处理时序数据,捕捉设备性能退化的非线性特征,实现剩余寿命的精准估算。基于强化学习的智能决策系统可动态调整巡检周期与维护策略,针对高风险设备自动生成预防性检修工单,降低突发性故障概率。

3.2 标准化建设

制定覆盖设计、施工、运维全链条的行业标准体系。在防雷领域,明确不同气候区划的避雷线配置标准与接地装置技术参数,规范雷电定位系统与故障录波装置的接口协议。针对绝缘子选型,建立污秽等级与爬电距离的量化对应关系,规定硅橡胶复合绝缘子的机械强度与耐老化性能指标。通过标准化设计减少因技术参数不匹配导致的系统性风险,提升设备兼容性与互换性。构建设备全流程追溯体系,从原材料采购到退役报废实现数据闭环。应用区块链技术记录设

备出厂试验、安装调试、预防性试验等关键节点数据,确保信息不可篡改。建立设备健康指数评价模型,综合机械状态、电气性能与环境损伤因子,动态划分设备健康等级。制定差异化运维策略,对高故障率设备实施重点监测与缩短试验周期,对低风险设备延长维护间隔,实现资源优化配置^[5]。

3.3 人员能力建设

开发分层分类的课程体系,涵盖无人机操作、红外热像仪判读、智能监测系统维护等核心技能。设置虚拟仿真培训模块,模拟复杂地形巡检与高空作业场景,提升人员应急处理能力。建立跨专业轮岗机制,促进输电、变电、调度等专业人员的知识融合。引入国际认证的特种作业资质考核标准,强化高空作业安全规范与精密仪器操作技能。构建双重预防机制下的绩效考核体系,将风险分级管控与隐患排查治理成效纳入 KPI 指标。设置线路跳闸率、缺陷消除及时率、应急预案启动响应时间等量化考核维度,实施月度动态评估与年度综合考评。建立安全信用档案,对重复性隐患责任人实施分级惩戒,对风险管控创新成果给予专项奖励。

4 结束语

输配电线路的安全稳定运行是保障电力系统可靠性的关键环节。面对自然环境、设备老化、运维管理等多重挑战,必须构建全链条风险管理体系,通过智能化监测、防雷防污技术升级和标准化建设提升线路安全水平。未来应重点突破新能源接入下的动态风险评估技术,完善跨部门应急联动机制,推动风险管理从被动应对向主动预警转变。同时,加强设备全生命周期管理,深化人员专业技能培训,形成技术与管理协同驱动的安全防线。唯有持续创新风险管理模式,才能为构建新型电力系统提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 许嘉辉,王岩.输配电及用电工程线路安全运行技术研究[J].电力设备管理,2025(18):234-236.
- [2] 陈晓辉.电力输配电线路故障排除与运行维护策略[J].光源与照明,2025(09):150-152.
- [3] 陈宗来.电力工程中的输配电线路安全运行及其检修维护探讨[J].城市建设理论研究(电子版),2025(20):1-3.
- [4] 高炎,冯依凯.输配电及用电工程线路安全运行技术[C]//江西省工程师联合会.工程技术与新能源经济技术研讨会论文集.浙江诚信人力资源交流服务有限公司,2025.
- [5] 吴同勇.电力输配电线路中的运行与故障对策分析[J].中国设备工程,2024(24):142-144.