

水利水电高压供配电系统故障诊断与快速恢复技术探析

李卓 杜好德

南水北调中线信息科技有限公司 北京 100000

摘要: 水利水电高压供配电系统故障诊断与快速恢复技术对保障供电可靠性至关重要。系统故障涵盖短路、断线、绝缘劣化及设备故障等类型,成因涉及环境、设备与人为因素。本文构建了包含多源数据采集、AI诊断模型及系统架构的故障诊断技术体系,并提出了模块化抢修装备、修复流程优化及修复质量保障等快速修复技术体系,旨在实现故障快速定位、精准诊断与高效修复,提升系统韧性。

关键词: 水利水电; 高压供配电系统; 故障诊断; 快速恢复技术

引言: 水利水电工程作为国家重要基础设施,其高压供配电系统的稳定运行关乎工程安全与效益。然而,该系统长期处于复杂户外环境,受多种因素影响,故障频发,严重影响正常供电。快速准确地诊断故障并恢复供电,成为保障水利水电工程可靠运行的关键。深入探析故障诊断与快速恢复技术,不仅有助于提升系统应对故障的能力,还能降低停电损失,对推动水利水电行业高质量发展具有重要意义。

1 水利水电高压供配电系统故障类型与成因分析

1.1 典型故障分类

(1) 短路故障: 该类故障是系统中发生频次最高的故障类型, 占总故障比例的45%, 主要包括相间短路和单相接地两种形式。短路故障发生时, 电路电阻急剧减小, 电流瞬间飙升, 极易引发设备过热、绝缘损坏甚至火灾等次生灾害。例如, 在多雾、潮湿或盐雾浓度较高的环境中, 绝缘子表面易附着污秽物, 长期运行后绝缘性能下降, 导致绝缘子闪络, 进而引发相间短路, 造成供电中断。(2) 断线故障: 占总故障比例的25%, 主要表现为导线断裂和金具脱落。导线作为电力传输的核心载体, 长期承受拉力、风力作用及环境腐蚀, 易出现疲劳损伤; 金具作为连接、固定导线的关键部件, 其质量缺陷或长期磨损会导致连接失效。例如, 在强风天气下, 导线随风摆动产生大幅晃动, 若导线存在老旧、破损情况, 或金具连接不牢固, 极易引发导线断裂或金具脱落, 导致供电线路中断。(3) 绝缘劣化故障: 占总故障比例的20%, 常见形式为污闪和覆冰闪络。绝缘性能是保障供配电系统安全运行的关键, 当绝缘材料受环境因素影响出现性能下降时, 易引发漏电、闪络等故障。例如, 在沿海或工业污染严重区域, 盐雾、粉尘等污秽物附着在绝缘部件表面, 遇潮湿天气时形成导电膜, 导致绝缘强度降低, 引发污闪; 在低温雨雪天气, 绝缘部件表面覆冰, 冰层

融化过程中会破坏绝缘性能, 引发覆冰闪络故障^[1]。(4) 设备故障: 涵盖变压器、开关设备等核心电力设备的异常运行, 此类故障虽发生频次相对较低, 但对系统的破坏性极强。变压器作为电压转换的核心设备, 其内部绕组、铁芯等部件若存在设计缺陷或长期过载运行, 易出现励磁装置滑环灼烧、绕组短路等问题; 开关设备负责电路的通断控制, 长期操作过程中, 其触头易磨损、老化, 或避雷器等保护部件损坏, 会导致开关设备拒动、误动, 影响系统的正常供电调度。

1.2 故障成因

(1) 环境因素: 水利水电工程多处于户外复杂环境, 潮湿、盐雾、极端温度等环境条件会加速设备老化, 诱发故障。潮湿环境易导致设备金属部件锈蚀、绝缘材料受潮变质; 沿海地区的盐雾具有强腐蚀性, 会破坏设备表面的防护层, 降低绝缘性能; 高温、低温等极端温度会使设备材料产生热胀冷缩, 影响部件连接的密封性和牢固性, 长期作用下易引发部件损坏。(2) 设备因素: 设备自身的质量缺陷和不合理运行是故障发生的重要内在原因。部分设备存在设计缺陷, 无法适配水利水电供配电系统的复杂运行工况; 制造工艺不足会导致设备部件精度不够、强度不足, 降低设备的运行稳定性; 此外, 由于水利水电工程用电负荷波动较大, 部分设备长期处于过载运行状态, 会加速内部部件的磨损和老化, 缩短设备使用寿命, 增加故障发生概率^[2]。(3) 人为因素: 人为操作和维护不当是引发故障的关键外部因素。操作人员在设备操作过程中, 若未严格按照操作规程执行, 易出现操作失误, 导致设备误动、短路等故障; 日常维护工作不足, 未及时对设备进行巡检、检修和维护, 会使设备的潜在隐患无法及时发现和处理, 逐步发展为严重故障; 同时, 线路周边的树害清理、违章建筑整治等清障工作滞后, 会导致导线对地距离不足, 易引发短路、

断线等故障，威胁系统安全运行。

2 水利水电高压供电系统故障诊断技术体系构建

2.1 多源数据采集与融合

(1) 传感器网络：搭建分布式、全方位的传感器监测网络，核心采用分布式温度监测（DTIS）实时捕捉线路及设备的温度变化，精准定位过热隐患；结合红外热成像技术，直观呈现设备内部及表面的温度分布，快速识别绝缘老化、接触不良等问题；部署振动传感器对变压器、开关设备等旋转及往复运动部件进行振动监测，通过振动信号特征判断设备机械状态。(2) 故障录波装置：配置高采样率（ $\geq 10\text{MS/s}$ ）的故障录波装置，重点捕捉短路、雷击等瞬态故障的电气量波形。该装置可精准记录故障发生瞬间的电压、电流峰值及变化过程，如雷击故障产生的瞬时大电流峰值数据，为后续故障类型判断、故障成因分析提供核心原始数据支撑。(3) 无人机巡检：利用无人机搭载高分辨率成像设备（分辨率 $\leq 0.2\text{m/pixel}$ ）开展空中巡检，可突破地形、环境限制，对偏远、高空区域的供电线路及设备进行全方位排查。其核心优势在于能够精准识别绝缘子裂纹、导线微小破损、金具松动等肉眼难以察觉的微小缺陷，大幅提升巡检效率与缺陷检出率^[3]。(4) 数据融合算法：针对多源数据存在的时间不同步、维度差异大等问题，采用专业数据融合算法进行处理。通过时间戳对齐技术实现各数据源的时序同步；运用主成分分析（PCA）、线性判别分析（LDA）等特征提取与降维算法，剔除冗余数据，提炼核心故障特征，提升数据处理效率与诊断精准度。

2.2 AI驱动故障诊断模型

(1) 深度学习：引入卷积神经网络（CNN）用于图像类缺陷诊断，通过对无人机巡检图像、红外热成像图的深度学习，实现绝缘子缺陷、导线破损等故障的自动识别，缺陷检测精度可达91%以上；采用长短期记忆网络（LSTM）对时序监测数据进行分析，精准预测设备故障发展趋势，预测准确率不低于80%，为预防性维护提供科学依据。(2) 迁移学习：针对水利水电供电系统故障样本稀缺的问题，引入迁移学习技术。将计算机视觉（CV）等成熟领域的预训练模型迁移至电力故障检测场景，通过微调模型参数适配电力设备故障特征，可有效解决小样本学习难题，经实践验证，可使故障检测精度提升15%以上。(3) 混合模型：融合专家系统与深度学习模型构建混合诊断模型。专家系统整合电力行业资深专家的经验知识，可快速对典型故障进行初步判断；深度学习模型则擅长处理复杂、非结构化数据，二者优势互补，可大幅提升故障诊断的全面性与准确性，将故障误

报率控制在5%以内。

2.3 诊断系统架构设计

(1) 感知层：作为系统的数据采集终端，整合传感器网络、无人机、巡检机器人等多类设备实现协同作业。传感器网络实时采集电气量、温度、振动等连续监测数据；无人机按预设航线开展周期性空中巡检；巡检机器人负责地面设备的近距离精准检测，多设备协同实现对供电系统的全方位、无死角监测。(2) 决策层：依托云端算力构建智能分析中心，接收感知层传输的多源数据后，通过AI诊断模型进行深度分析，快速识别故障类型、定位故障位置，故障定位误差可控制在2%以内。同时，结合电网拓扑结构、历史故障数据，生成最优故障处置方案，为后续抢修工作提供决策支持^[4]。(3) 执行层：实现故障处置的自动化闭环管理，接收决策层下发的抢修指令后，通过自动化控制设备执行抢修作业。例如，利用机械臂对破损绝缘子进行自动更换，通过远程控制开关设备隔离故障区域，同步联动电力调度系统调整供电方案，最大限度缩短故障停电时间，提升供电系统供电可靠性。

3 水利水电高压供电系统故障快速修复技术体系构建

3.1 模块化抢修装备开发

(1) 高压电缆快速接头：针对高压电缆故障修复中接头连接耗时长、精度要求高的问题，研发插拔式高压电缆快速接头。它具备异径对接技术，能适配不同规格电缆，采用标准化插拔设计，简化连接流程，无需复杂现场调试。传统接头连接需4-6小时，此接头可将作业时间缩短至3小时以内，且能保障绝缘性能与导电稳定性，满足系统运行要求。(2) 智能仓储系统：引入先进仓储管理软件与自动化设备构建该系统，解决传统备件库存大、资金占用多、查找耗时长的问题。常用备件用智能货架存储，货架配电子标签和传感器，可实时监控备件数量与位置。工作人员通过手持终端输入信息，系统自动指引取件并显示详情，缩短查找时间。同时，系统通过数据分析，依历史故障数据和备件使用频率生成采购计划，提前储备常用备件。对特殊规格备件，与供应商紧密合作，采用直送方式，减少库存积压，节省40%以上库存成本。(3) 无人机协同抢修装备：构建无人机协同作业系统，实现故障快速定位与信息传递。无人机搭载高精度定位模块与成像设备，1小时内可精准定位故障区域，实时传输故障位置、类型及周边环境等信息至抢修指挥中心。还能作为空中通信中继，保障复杂地形或信号不佳区域的通信畅通。抢修人员依信息提前准备，

迅速赶赴现场,提高抢修效率,突破环境限制,降低人工作业风险。

3.2 修复流程优化

(1) 并行作业模式:突破传统“故障定位-备件调拨-现场修复”的串行模式,构建多环节并行体系。无人机定位故障时,抢修指挥中心依据初步判断同步启动备件调拨,安排抢修队伍携通用装备赶赴现场,并通知智能仓储系统备好特殊备件。精准定位后,若需特殊备件,可立即从智能仓储调出或由供应商直送,实现故障定位、备件准备与现场前期布置同步推进,大幅压缩抢修时间。(2) 简易调度系统:借助微信群或企业内部即时通讯软件等现有办公通信工具,搭建简易抢修资源调度平台。抢修指挥中心在群里实时发布故障、任务及资源需求信息,相关人员及时响应。通过简单沟通协调,快速调配抢修队伍、装备和备件。如某抢修队需特定工具,在群里询问后,附近有该工具的队伍可迅速支援。此系统虽不如区块链调度系统复杂,但更易实现和操作,能有效减少沟通成本与协调延误。实践表明,采用该系统可使抢修响应时间缩短20%,提升资源利用效率。(3) 应急预案库:针对雷击、覆冰等不同故障类型,结合水利工程地域特点与运行工况,构建标准化应急预案库。每个预案明确故障判断标准、抢修流程、人员配置、装备清单及安全注意事项等,形成“一故障一预案”的标准化处置模式。同时,定期开展应急预案演练,依据演练效果与实际案例持续优化预案,确保其实用性与可操作性,避免现场抢修盲目性。

3.3 修复质量保障

(1) 无损检测技术:在故障修复完成后,采用X射线、超声波等无损检测技术对修复部位进行全面检测。X射线检测可精准识别接头内部的焊接缺陷、绝缘层破损等问题;超声波检测可判断导线连接的紧密性、金具与导线的接触状态等,实现对修复部位内部缺陷的无损伤、高

精度排查,确保修复质量符合技术标准。(2) 动态负荷测试:搭建动态负荷测试平台,模拟供配电系统满负荷、冲击负荷等不同运行工况,对修复后的设备进行性能验证。通过监测设备的电压、电流、温度等关键参数变化,判断修复部位的导电性能、绝缘性能是否满足运行要求,验证修复方案的合理性与可靠性。只有经动态负荷测试合格的设备,方可重新投入运行。(3) 长期监测:在修复后的关键设备及部位部署在线监测装置,纳入供配电系统整体监测网络,对设备的运行状态进行长期跟踪。监测装置实时采集温度、振动、绝缘电阻等运行数据,通过数据分析及时发现潜在隐患,提前开展预防性维护,避免修复部位因长期运行出现老化、破损等问题引发二次故障,保障供配电系统的长期稳定运行。

结束语

水利水电高压供配电系统故障诊断与快速恢复技术,是保障水利水电工程稳定运行的关键支撑。精准的故障诊断技术能迅速揪出系统“病灶”,快速恢复技术则可及时“疗伤”,减少停电损失。面对不断变化的运行环境与日益复杂的故障形式,我们需持续钻研创新,融合大数据、人工智能等前沿技术,提升技术智能化、自动化水平,为水利水电事业高质量发展筑牢坚实的电力后盾。

参考文献

- [1]陆海彬.基于云计算的10kV配电网综合故障诊断研究[J].电气技术与经济,2025,(03):295-297.
- [2]齐思文.多端高压直流环网直流侧故障定位策略研究[J].电力设备管理,2025,(10):85-88.
- [3]陈行.基于保护启动信息的电网故障诊断解析模型[J].电子器件与信息技术,2025,9(01):138-140.
- [4]周雪丽,刘嘉维.智能配电网的可靠性与故障诊断技术分析[J].电子技术,2025,54(02):358-359.
- [5]赵蔓,张健.智能牵引变电所配电网故障定位及识别研究[J].工程建设与设计,2025,(01):80-83.