

变电运维故障预判与前置管控机制研究

李光鹏 马依努尔·斯坎旦 高振峰 孙 磊

国网新疆电力有限公司哈密供电公司 新疆 哈密 839000

摘 要: 为提升变电运维故障应对能力,降低设备损坏与供电中断风险,本文针对变电运维故障识别滞后与管控被动问题,研究故障预判与前置管控机制。首先按设备属性归类故障类型,从内外因耦合角度分析致因及演化特征。其次构建多源数据融合与阈值-趋势组合预判模型,输出故障类型、位置及时间估计。然后设计三级分级管控策略,明确流程与职责,建立基于故障发生率、停运时间与管控成本的评估及闭环优化机制,提出技术与管理保障措施,为运维由被动抢修向主动防控转变提供支撑。

关键词: 变电运维;故障预判;前置管控机制

引言

随着电网规模扩大,变电设备运行复杂度显著提升,传统故障后抢修模式难以满足供电可靠性要求。故障具有潜伏期,若能在发展期内识别并实施前置管控,可有效避免设备损坏与供电中断。当前运维存在数据利用率低、预判模型单一、管控策略粗放等问题,亟需建立系统化预判与前置管控机制。本文围绕故障致因分析、多源数据融合预判模型构建、分级管控策略设计及闭环优化展开研究,旨在提升运维主动性与精准性。

1 变电运维故障类型与致因分析

变电运维过程中出现的故障可按设备属性和表现形式进行归类。一次设备故障包括变压器绕组变形、开关触头烧蚀、互感器绝缘劣化等。二次设备故障包括保护装置误动或拒动、直流系统接地、通信链路中断等。辅助系统故障包括冷却系统停转、消防系统失灵、视频监控中断等^[1]。故障发生后导致的后果包括设备损坏、供电中断、人身伤害等。故障致因可从内因和外因两个维度分析。内因指设备自身状态退化,包括绝缘老化、机械磨损、接点氧化、元器件失效等。外因指运行环境和操作行为对设备的影响,包括过电压冲击、过负荷运行、外力破坏、误操作等。多数故障由内因和外因叠加作用产生。单一因素作用下设备可维持运行,多因素同时作用时故障概率上升。内因决定设备承受外因的能力边界,外因触发内因已积累的缺陷。两类因素之间存在耦合关系,一方的变化会改变另一方的作用强度。故障演化具有阶段特征。潜伏期内设备参数出现偏移但未触发告警。该阶段设备内部已发生物理或化学变化,但变化幅度未达到保护动作整定值。发展期内参数偏移扩大,告警信号出现。该阶段设备性能持续下降,若干预将在有限时间内进入故障状态。爆发期内设备功能丧失,故障被确认。

该阶段设备已无法继续运行,需停电检修或更换。各阶段之间存在时间窗口,该窗口为前置管控提供操作空间。窗口长度取决于故障类型和发展速率,突变型故障窗口较短,渐变型故障窗口较长。故障类型与致因之间存在对应关系。变压器绕组变形多由短路电流冲击和长期过负荷共同作用导致。开关触头烧蚀由开断电流产生的电弧持续侵蚀触头材料所致。互感器绝缘劣化由热应力和电场应力长期作用引起。保护装置误动或拒动多由定值漂移、元件老化或回路接触不良导致。直流系统接地由绝缘下降或外力损伤引起。各类故障的致因组合不同,预判模型需针对不同故障类型设置独立的特征参数和判定逻辑。

2 故障预判方法与模型构建

2.1 多源数据采集与融合

故障预判依赖于运行数据的采集。采集对象包括在线监测数据、离线检测数据、操作记录数据和环境数据。在线监测数据涵盖油色谱、局部放电、红外测温、开关动作特性等。离线检测数据涵盖预防性试验数据、检修记录数据、缺陷记录数据等。操作记录数据涵盖倒闸操作票、工作票、巡视记录等。环境数据涵盖温度、湿度、风速、污秽等级等。数据采集需覆盖故障演化全周期。潜伏期数据反映设备初始状态和微小变化。发展期数据反映参数变化速率和方向。爆发期数据反映故障特征和损坏程度。各类数据的采集频率不同,在线监测数据为连续采集,离线检测数据为定期采集,操作记录数据为事件驱动采集,环境数据为定时采集。数据融合处理解决多源数据格式不统一、时间基准不一致的问题。时间对齐将不同采集频率的数据统一至同一时间轴。特征提取从原始数据中抽取反映设备状态的参数。降维处理去除冗余信息,保留与故障相关的特征量。融合后的数据

作为预判模型的输入。融合过程中需处理数据缺失问题,对缺失数据采用插值或忽略策略,避免缺失数据导致模型输入中断。

2.2 故障预判模型

预判模型分为阈值判断模型和趋势分析模型两类。阈值判断模型将实时数据与设定阈值比较,超出阈值则判定为异常。该模型适用于参数突变型故障的识别。趋势分析模型跟踪参数随时间的变化方向和速率,当变化趋势指向故障阈值时发出预警。该模型适用于参数渐变型故障的识别。两类模型可组合使用,阈值判断模型负责捕捉突发异常,趋势分析模型负责跟踪缓慢劣化。基于统计的预判方法利用历史故障数据建立故障概率分布^[2]。当当前设备状态落入高概率区间时判定故障风险上升。该方法依赖历史数据的完整性和代表性,数据样本不足时概率分布的可信度下降。基于关联的预判方法分析多参数之间的关联关系,当关联关系出现偏离时判定异常。该方法可发现单一参数未超限但参数组合异常的情况。基于时序的预判方法利用时间序列数据预测参数未来走向,将预测值与故障阈值比较。该方法可在参数尚未超限时提前发出预警。模型输出包括故障类型判定、故障位置定位和故障时间估计三项内容。故障类型判定指明设备可能发生的故障模式。故障位置定位指明故障发生的具体部件或回路。故障时间估计指明距离故障发生的剩余时间。三项内容的输出为前置管控提供决策依据。输出结果需标注置信度,低置信度结果需结合人工判断后再执行管控措施。

2.3 预判准确度验证

预判结果需经过验证。验证方式包括回测验证和在线验证。回测验证利用历史数据检验模型对已发生故障的识别能力,计算漏判率和误判率。在线验证利用实时数据检验模型对当前设备状态的判断结果与实际状态的一致程度。两种验证方式相互补充,回测验证检验模型的历史识别能力,在线验证检验模型的当前适用能力。预判准确度受数据质量、模型参数和运行工况三方面影响。数据缺失或失真导致模型输入偏差。模型参数未随设备老化更新导致判定标准偏离实际。运行工况变化导致正常参数范围偏移,固定阈值产生误判。针对上述问题需建立模型动态修正机制。修正机制包括定期利用新数据更新模型参数、根据工况变化调整阈值范围、对误判样本进行标注并反馈至模型训练。

3 前置管控机制设计与实施

3.1 管控策略分级

前置管控按风险等级分为三级。一级管控对应高风

险状态,此时设备参数已接近故障阈值或多项指标同时异常^[3]。管控措施包括降低设备负荷、缩短巡视周期、安排带电检测、准备备品备件。二级管控对应中风险状态,此时设备参数出现单向偏移或单项指标异常。管控措施包括加强巡视、安排计划检修、调整运行方式。三级管控对应低风险状态,此时设备参数在正常范围内但变化趋势指向异常。管控措施包括记录参数变化、纳入重点关注名单、在下次检修中增加检测项目。各级管控之间存在升级和降级条件。当一级管控措施执行后参数未恢复或继续恶化时升级为应急处置。当参数恢复至正常范围并持续稳定后可降级。降级需经过一定周期的观察确认。观察周期根据风险等级设定,一级降二级需观察规定天数,二级降三级需观察规定天数,三级解除需观察规定天数。观察期内参数出现反复则维持原等级或升级。管控策略的制定需考虑管控措施对运行方式的影响。降低负荷可能导致供电能力不足,需提前评估负荷转供方案。缩短巡视周期增加人员工作量,需调整巡视排班。安排带电检测需协调检测设备和人员。准备备品备件需确认库存情况。各项措施的执行需在不影响正常运行的前提下进行。

3.2 管控流程与职责划分

管控流程包含信息采集、风险判定、策略生成、指令下达、执行反馈五个环节。信息采集环节由在线监测系统和巡视人员完成。在线监测系统自动采集设备运行参数,采集频率根据设备风险等级设定,高风险设备采集频率高于低风险设备。巡视人员记录现场检查结果,检查结果包括设备外观状态、声响特征、气味特征和温度读数。数据传输延迟不超过规定时间,超时数据标记为无效并触发补采任务。风险判定环节由预判模型自动完成并生成风险等级。模型根据采集数据计算故障概率和剩余时间,输出风险等级。输出结果包含置信度指标,置信度低于设定值时标注需人工复核。模型输出与在线监测系统告警信号相互校核,一致时进入策略生成环节,不一致时触发人工复核流程。策略生成环节由系统根据风险等级匹配管控措施。系统内置管控策略库,根据风险等级自动检索对应措施,检索结果按优先级排列。当推荐措施与现场条件冲突时,技术人员可手动调整,调整记录存入系统。指令下达环节由运维管理人员审核后向执行人员发送。管理人员核实风险等级和措施合理性后批准执行。指令内容包含执行人员、执行时间、执行内容和完成时限。超时未完成时系统向管理人员发送提醒。执行反馈环节由执行人员记录执行结果并回传系统。执行结果包括措施完成情况、参数变化情况和现场异常情

况。参数变化与执行前数据对比,对比结果用于评估措施有效性。现场异常情况触发新一轮风险判定流程^[4]。职责划分方面,运维人员负责现场巡视和操作执行。巡视按管控等级确定的周期和内容执行,操作按指令内容和操作规程执行。监控人员负责在线数据监视和初步异常确认,异常确认需核对多个参数后判定。技术人员负责模型参数维护和管控策略调整,包括阈值更新、权重调整和特征量增减。管理人员负责管控指令审批和资源调配,包括风险等级确认和人员物资安排。

3.3 管控效果评估与闭环优化

管控效果通过故障发生率、故障停运时间、管控成本三项指标评估。故障发生率对比管控实施前后同周期同类型故障发生次数;故障停运时间涵盖故障定位、备件调配、检修作业及送电操作全过程;管控成本包括巡视、监控、技术人员工时及检测设备、备件采购、系统维护等费用。三项指标综合反映管控措施的有效性与经济性。评估结果驱动闭环优化。当某类故障预判准确度低于设定值时,调整模型参数或更换特征量,包括修改阈值范围、更新权重系数、增加特征维度,调整后需经历史数据回测验证方可投入使用。当管控措施执行后故障仍发生时,分析措施不足并补充,措施包括增加检测项目、缩短管控周期、升级管控等级,需基于故障发生时设备状态找出措施未覆盖环节。当管控成本过高而故障下降有限时,调整管控阈值平衡成本与效益,需经技术论证和审批。优化过程持续进行,模型和策略随数据积累逐步逼近实际需求。每次优化后需经验证确认,未通过则自动回退至前版本并生成回退记录,记录内容包括回退原因、时间和版本,用于后续优化方向调整。

3.4 管控机制运行保障

管控机制运行保障分为技术保障和管理保障两部分。技术保障方面,在线监测系统需定期校准,校准周期根据设备类型确定^[5]。数据传输网络需配置冗余链路,单条链路故障时自动切换至备用链路,切换时间不超过规定时间。预判模型运行环境需配置独立服务器,服务器负

载率控制在设定范围内,超过范围时自动迁移至备用服务器。数据存储需执行定期备份,备份周期为每日一次,备份数据保留时间不少于规定天数。管理保障方面,需建立管控机制运行考核制度。考核内容包括信息采集完整率、风险判定及时率、指令执行到位率和反馈记录规范率。各项考核指标设定目标值,未达标时分析原因并制定改进措施。需建立人员培训制度,培训内容包括预判模型原理、管控流程操作和异常处置方法。培训周期为每季度一次,培训后进行考核,考核结果与岗位权限挂钩。需建立应急联动机制,管控机制触发应急处置时,自动通知相关专业人员和管理人员,通知方式包括系统弹窗、短信和电话。管控机制触发应急处置时,自动通过系统弹窗、短信和电话通知相关人员,应急联动响应时间不超过规定时间,响应全过程由信息系统自动记录。

结语:

本文构建的故障预判与前置管控机制,通过多源数据融合实现了故障的早期识别,三级管控策略为不同风险等级提供了差异化处置方案,闭环优化机制保障了模型与策略的持续改进。研究表明,利用故障演化各阶段的时间窗口实施前置干预,可有效降低故障发生率和停运时间,同时兼顾管控经济性。未来可进一步引入深度学习提升预判精度,并拓展至全电压等级变电设备,推动运维管理向智能化、精益化方向持续演进。

参考文献:

- [1]王荻.变电运维故障分析及技术应用研究[J].电力设备管理,2025(3):14-16.
- [2]张海舰,李新涛.变电运维故障智能诊断系统的构建路径研究[J].移动信息,2025,47(11):131-133.
- [3]厉晓伟.变电运维故障及日常维护探讨[J].科学与信息化,2025(2):1-3.
- [4]邓浩渺,刘乐瑶.基于大数据的变电运维故障预警策略研究[J].农电管理,2025(7):46-47.
- [5]向军.变电运维故障及日常维修处理技术[J].中国科技期刊数据库工业A,2021(9):078-079.