

高压电气设备智能化运维体系与在线监测技术应用

胡彦儒

宁夏电投宁东新能源有限公司 宁夏 银川 750411

摘要: 针对高压电气设备传统运维模式存在过修、失修、运维效率低、供电可靠性差等痛点, 本文构建数据驱动的智能化运维体系, 阐释感知、传输、平台、应用四层架构及闭环运行机制。系统剖析绝缘、机械运行状态核心在线监测技术与智能数据处理方法, 结合工程应用成效, 分析设备监测、数据互通、算法应用等现存问题, 提出架构优化、标准建设、数据融通及技术迭代升级策略, 为高压设备智能运维规模化落地提供技术参考。

关键词: 高压电气设备; 智能化运维体系; 在线监测技术应用

引言: 新型电力系统建设背景下, 电网高压电气设备日趋复杂, 传统定期检修、故障抢修的被动运维模式, 已无法适配电网安全、高效、精益化运行需求, 存在运维成本高、故障预判滞后等诸多弊端。为破解传统运维短板, 依托物联网、大数据、人工智能技术发展智能运维与在线监测技术, 可实现设备状态实时感知与预测性检修。本文围绕智能运维体系架构、核心监测技术、工程应用及优化策略展开研究, 助力电网运维数字化转型升级。

1 高压电气设备传统运维模式与智能运维体系架构

1.1 高压电气设备传统运维模式分析

(1) 传统运维模式以定期检修和故障后检修为核心。定期检修依据固定时间周期或动作次数安排预防性维护; 故障后检修则在设备失效时进行非计划修复, 两者共同构成以时间或事件为触发条件的被动型运维逻辑。(2) 传统运维流程涵盖巡视检查、停电预防试验、维修实施及恢复送电等环节, 实施标准严格依据《电力设备预防性试验规程》(DL/T596) 等规范执行, 强调计划刚性执行与工序流程化管理。(3) 可靠性上, 定期检修难以及时发现突发性或渐发性缺陷, 存在“过修”与“失修”并存问题; 经济性上, 计划性停电造成人财物力浪费及电量损失, 故障抢修带来非计划停运成本, 整体效益偏低。

1.2 智能化运维体系核心内涵与构建原则

(1) 智能运维体系是以数据驱动为核心, 融合物联网、人工智能、大数据分析等技术, 实现设备状态实时感知、自动诊断、趋势预测与闭环管控的新型运维模式, 核心特征为状态全面感知、信息高效处理、决策智能辅助。(2) 体系构建遵循安全性(确保数据采集不降低设备安全裕度)、高效性(实现运维资源最优配置与快速响应)、智能化(以算法驱动状态评估与策略动态

优化)三大基本原则。(3) 与传统运维相比, 核心差异在于驱动方式由“时间/事件驱动”转向“数据/状态驱动”, 检修模式由“计划检修+事后检修”转向“预测性检修”, 决策主体由“人工经验”转向“人机协同”。

1.3 高压电气设备智能化运维整体架构

(1) 感知层由各类传感器与采集终端构成, 实现设备电气量、非电气量及环境参数的全方位实时采集与数字化转换。(2) 传输层依托电力专用通信网络, 采用标准规约与5G切片等技术, 构建高可靠、低时延的数据传输通道。(3) 平台层作为数据中枢, 部署大数据存储与云计算资源, 承担多源异构数据的清洗、融合、挖掘与管理功能。(4) 应用层集成故障诊断、状态评估与运维决策模块, 通过智能算法实现健康量化评分、缺陷识别及检修策略优化推荐^[1]。

1.4 智能运维体系运行机制

(1) 全周期采集与存储机制: 从设备投运至退役, 持续采集并归档运行数据、试验检修历史与环境信息, 构建完整数据链。(2) 状态实时研判与智能预警机制: 基于在线数据动态更新状态特征量, 通过阈值判别与趋势分析, 对参量越限或突变即时告警, 实现异常早发现。(3) 预测性运维与闭环管控机制: 融合老化模型预测剩余寿命与故障概率, 自动生成检修建议并推送执行端, 将反馈结果回注系统, 形成“监测-研判-决策-评价”闭环流程。

2 高压电气设备核心在线监测技术及应用原理

2.1 设备绝缘状态在线监测技术

(1) 局部放电在线监测技术利用设备绝缘内部局部场强集中处发生的微弱放电现象, 通过特高频法(300MHz-3GHz频段)采集放电产生的电磁波信号, 或采用高频电流法(3-30MHz)从接地线中提取脉冲电流, 亦可使用超声波法接收放电产生的声波信号。各类

传感器将信号转换为电参数后,经放大滤波与相位分辨分析,可识别放电类型并定位缺陷位置,有效评估绝缘劣化程度。(2)介质损耗在线监测采用过零点相位比较法或谐波分析法,实时计算容性设备(如电流互感器、套管)的介质损耗因数($\tan\delta$),通过监测泄漏电流与电压相位差变化反映绝缘受潮或老化状况;绝缘油状态监测运用气相色谱法在线分析油中溶解特征气体(H_2 、 CO 、 C_2H_2 等)含量及变化趋势,结合微水密度传感器监测油中微量水分,综合判定油纸绝缘系统的健康水平^[2]。

(3)绝缘老化隐患识别基于长期连续监测数据,提取介质损耗增量、局部放电重复率及放电量等关键特征参量,建立老化趋势曲线与预警阈值体系。数据研判采用纵比(与历史数据对比)与横比(与同型设备对比)相结合的方法,辅以支持向量机等机器学习算法,对绝缘性能退化速率进行定量评估,实现潜伏性老化隐患的早期发现与预警。

2.2 设备机械与运行状态在线监测技术

(1)高压开关设备机械振动监测通过在操动机构及外壳安装压电式加速度传感器,采集分合闸操作过程中产生的振动信号,经时域包络分析与频域特征提取,可识别操作机构卡涩、缓冲器失效、传动部件松动等机械缺陷;分合闸状态监测采用行程传感器与辅助触点信号配合,实时记录动触头行程-时间特性曲线,提取分合闸速度、行程超程、刚分刚合速度等关键参数,判断机构动作可靠性。(2)设备温升监测采用红外热电堆传感器或光纤光栅温度传感器,对断路器触臂、母线连接点、电缆终端头等关键部位进行非接触或接触式连续测温;接头接触状态监测通过测量接触电阻的微小变化(采用四端子法或微欧级电阻测量)反映连接处松动或氧化程度,结合温升数据与负荷电流进行关联分析,实现接触不良缺陷的准确辨识。(3)负荷运行参数实时监测通过电压互感器、电流互感器及智能融合终端,连续采集电压、电流、功率、功率因数等电气量,并计算负荷率、谐波畸变率等衍生指标。异常识别采用自适应阈值方法,当监测参数越限或出现非周期性波动时,结合历史负荷模式进行比对,有效区分正常负荷波动与设备异常运行状态,为运维决策提供实时依据。

2.3 在线监测数据处理与智能分析技术

(1)监测数据降噪采用自适应数字滤波、小波变换阈值去噪等方法,有效剔除工频干扰及随机白噪声;数据筛选通过拉依达准则(3σ 准则)或箱线图法剔除粗大误差与无效数据;标准化处理则针对不同量纲参数实施归一化或Z-score变换,使多源数据具备可比性,形成

规范化的数据样本库供后续分析调用。(2)基于大数据平台的分布式计算框架,采用卷积神经网络(CNN)对局部放电图谱进行图像识别分类,利用循环神经网络(RNN)处理时序监测数据提取老化演化特征,结合深度置信网络实现高维特征的非线性降维与敏感特征自动筛选,大幅提高故障特征提取效率与准确率^[3]。(3)多维度数据融合分析采用特征级融合策略,将电气量、非电气量及环境参数进行关联挖掘,建立基于D-S证据理论或贝叶斯网络的多源信息融合评估模型,实现不同监测手段间冗余互补,消除单一参量误判风险,提升设备状态综合评估的准确性与鲁棒性。

2.4 在线监测系统关键技术优势

(1)在线监测系统可在设备不停电状态下连续运行,无需安排停电窗口即可完成数据采集与状态评估,从根本上规避了传统停电试验带来的供电可靠性下降、操作风险及倒闸误操作安全隐患,保障电网连续供电能力。(2)系统采用高采样率(可达MHz级)与连续采集模式,获取的数据具备完整的时间序列特性,可捕捉瞬态异常信号与渐变趋势,较定期试验数据信息量大为丰富,配合智能预警算法,显著提升了故障早期预判的准确率与时效性。(3)在线监测装置具备宽温域工作能力(-40°C 至 $+85^{\circ}\text{C}$)及强电磁兼容性能,适应户外变电站、地下配电房等复杂工况环境。同时,系统支持IEC61850标准化通信协议,可无缝接入智能电网调度管理平台,充分满足数字化变电站及智能电网对设备全域感知与协同运维的综合性需求。

3 高压电气设备智能化运维体系与在线监测技术工程应用、问题及优化策略

3.1 工程应用案例与实施效果

(1)变电站高压设备智能运维整体方案以智能化运维架构为核心,在330kV及以上电压等级枢纽变电站部署感知层多类传感器与边缘计算终端,依托统一数据平台集成局部放电监测、油色谱分析、机械特性监测等子系统,通过平台层数据融合实现全站设备状态集中管控与运维策略自动推送,形成“全面感知-实时研判-精准决策”的完整应用链条。(2)变压器侧应用油中溶解气体在线监测(每日自动采样分析)配合特高频局放传感器,实现套管、绕组及铁芯绝缘状态的持续跟踪;开关柜侧通过安装无线测温探头、机械振动传感器及分合闸线圈电流监测装置,对触头温升、操作机构动作特性进行实时采集,监测数据通过站控层网络汇集至运维平台进行综合评估。(3)工程应用后成效显著:设备计划停电试验次数减少约60%,状态检修覆盖率提升至85%以

上;通过早期预警成功避免多起变压器绝缘击穿及开关拒动事故,设备非计划停运率下降约45%,运维人力投入减少约30%,综合供电可靠性指标得到明显改善^[4]。

3.2 技术应用与体系运行现存问题

(1) 监测终端方面,不同厂家的传感器接口标准不一,部分装置在强电磁干扰环境下数据采集偏差较大;数据传输方面,站内无线通信易受设备外壳屏蔽影响,信号稳定性不足,偶发数据丢包或延迟,影响实时监测效果。(2) 多设备数据不互通问题突出,变压器、开关、GIS等设备监测系统多由不同供应商独立建设,数据格式、通信协议各异,各子系统形成“信息孤岛”,无法实现跨设备、跨区域的数据关联挖掘与综合研判,制约整体智能运维效能发挥。(3) 智能诊断算法在实际复杂工况下精准度仍有不足,现场环境干扰易导致误报或漏报;同时运维体系在基层落地不完善,部分站端仍沿袭传统管理流程,智能运维平台功能未充分利用,检修决策仍以人工经验为主导,系统闭环管控环节存在脱节。

3.3 智能化运维体系优化完善策略

(1) 优化多层次运维架构,明确感知层、平台层、应用层各层级功能定位与接口规范,建立“站端实时处理-区域综合分析-中心智能决策”的三级协同体系,完善从预警触发、工单生成、检修执行到效果评价的闭环管理流程。(2) 建立标准化运维管理制度与作业规范,制定智能运维系统运行规程、监测终端巡检维护标准及预警处置操作指引,将智能运维各环节纳入制度化轨道,明确岗位职责与考核要求,确保体系运行有章可循。(3) 搭建统一数据共享平台,制定标准化数据接入规范,通过数据中台实现各子系统数据的集中汇聚与互联互通,建立设备全生命周期统一数据模型,提供标准化数据服务接口,从根本上破除信息壁垒,支撑跨设备综合分析^[5]。

3.4 在线监测技术升级与发展展望

(1) 融合物联网与边缘计算是监测技术升级的核心方向,通过在传感器端集成轻量化处理芯片,实现数据就地预处理与异常特征实时提取,仅上传关键特征量

至云端,大幅降低通信带宽占用与平台计算压力,支撑毫秒级响应需求。(2) 基于深度学习的故障预判技术将朝着小样本学习与迁移学习方向突破,利用变分自编码器、生成对抗网络等方法扩充故障样本库,结合数字孪生技术构建设备高精度仿真模型,通过仿真与实测数据融合训练,持续提升算法泛化能力与精准预判水平。

(3) 无人化全自动运维模式的发展将依托巡检机器人、无人机搭载多类型传感器实现自主巡检与数据采集,配合AI大模型驱动的智能决策系统自动生成运维策略、自主派发工单并跟踪闭环,最终实现高压电气设备运维从“人工定期干预”向“系统全自主运行”的跨越式演进。

结束语

本文系统梳理了高压电气设备智能运维体系架构与在线监测核心技术,验证了智能运维模式在降低停运率、缩减运维成本、提升供电可靠性等方面的显著优势,同时总结了当前技术应用与体系运行的突出问题。未来需依托边缘计算、深度学习、数字孪生等前沿技术,持续优化监测算法、统一数据标准、完善运维闭环机制,推进无人化智能运维模式落地,全面提升高压电气设备运维智能化、精准化、自主化水平。

参考文献

- [1] 胡博,王瑞,张宇.物联网技术在高压变电设备状态在线监测中的应用研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(18):125-132.
- [2] 李宏仲,顾承显,李蓓.基于多源数据融合的高压设备在线监测与智能运维技术[J].电力自动化设备,2023,43(03):189-195.
- [3] 王有元,杨杰,陈伟根.高压电气设备全生命周期智能运维体系构建与应用[J].高电压技术,2024,50(05):1721-1729.
- [4] 周涑,刘思言.基于边缘计算的高压设备在线监测轻量化智能运维方法[J].电网技术,2023,47(09):3122-3129.
- [5] 曹吉,刘旋,曹瑞.高压电气设备智能化在线监控系统设计与运维应用[J].价值工程,2025,44(07):111-113.