

智能变电站设备运行维护要点及检修

王学虎

国网北京检修公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17212

[摘要] 智能变电站设备运行维护涵盖一次设备周期性检修和二次装置周期性校验、装置程序版本升级、装置故障及缺陷处理等维护工作,同时涉及日常巡检、状态监测与设备健康管理。通过智能巡检机器人巡检技术结合在线监测系统实时捕捉设备温度、局部放电等运行数据监测技术,实现故障早期预警。检修策略强调分级管理,依据设备重要性制定差异化检修周期,推广不停电检修技术。构建智能监测与网络攻击防御体系,利用数字孪生技术优化检修方案,提升运维效率与供电可靠性。

[关键词] 智能变电站; 设备运行维护要点; 检修

中图分类号: TM63 文献标识码: A

Key Operational Maintenance Points and Repair of Smart Substation Equipment

Xuehu Wang

State Grid Beijing Maintenance Company

[Abstract] The operational maintenance of smart substation equipment encompasses periodic maintenance of primary equipment and periodic calibration of secondary devices, including version upgrades, fault resolution, and defect handling, as well as daily inspections, condition monitoring, and equipment health management. By integrating intelligent inspection robot technology with real-time operational data monitoring systems (e.g., temperature and partial discharge detection), early fault warnings are achieved. Maintenance strategies emphasize hierarchical management, with differentiated maintenance cycles based on equipment criticality, and promote non-outage maintenance technologies. The establishment of an intelligent monitoring and cyber-attack defense system, along with the application of digital twin technology to optimize maintenance plans, enhances operational efficiency and power supply reliability.

[Key words] Smart Substation; Key Operational Maintenance Points; Repair

引言

智能电网发展浪潮下,智能变电站凭借高度集成化、数字化特性成为能源转型的关键支撑。其融合的先进传感、通信与智能分析技术,虽极大提升了电网运行效率与可靠性,同时也对设备运维提出更高要求—既要应对海量数据带来的分析挑战,又需防范网络攻击等新型风险。本文立足智能变电站设备运行维护实际,深入探讨日常巡检、状态评估及检修策略优化等要点,为保障电网安全稳定运行提供技术参考。

1 智能变电站设备运行维护要点

1.1 智能变电站设备构成与特点

(1) 硬件系统: 核心包含智能组件、一次设备与传感器网络三大类。其中智能组件由合并单元(负责采集电流/电压信号采集并数字化处理)、智能终端(实现一次设备状态量采集监测与控制指令执行)以及保护和测控装置组成; 一次设备涵盖变压器、断路器等核心电力设备,是电能传输与转换的关键载体; 传

感器网络则通过部署在设备关键部位各类传感器,实时采集温度、压力、振动等运行数据,为状态监测提供基础数据支撑。

(2) 软件系统: 按功能层级分为站控层与过程层。站控层包含监控后台(实现全站设备运行状态可视化监控、操作指令下发)、数据通信网关机、及网络分析单元、保护信息子站(收集与分析保护装置动作信息,辅助故障诊断); 过程层以GOOSE/SV通信网络为核心,GOOSE网络负责传输开关量控制信号(如跳闸指令),SV网络实现数字化采样值传输,二者共同保障设备间实时数据交互。(3) 关键技术: 光纤通信凭借高带宽、抗干扰特性,成为站内数据传输的主要方式; IEC61850标准统一了设备通信协议,实现不同厂家设备的互联互通; 边缘计算技术将数据处理功能下沉至设备本地,减少数据传输延迟,提升实时决策效率; 数字孪生技术通过构建设备虚拟模型,实现运行状态模拟、故障预演与检修方案优化^[1]。

1.2 运行维护核心要点

1.2.1 日常巡检与状态监测

(1) 智能巡检机器人与无人机协同作业模式已广泛应用, 如国网上海电力部署的“天枢”机器狗, 可在变电站室内外复杂环境中自主移动, 搭载高清摄像头、红外热像仪等设备, 对设备外观、接头温度等进行细致检测; 无人机则适用于变电站户外高压设备、线路杆塔等高空区域巡检, 二者配合实现全站无死角巡检, 大幅提升巡检效率与准确性。(2) 在线监测系统持续采集设备关键运行数据, 包括局部放电监测(实时捕捉设备内部绝缘缺陷产生的放电信号, 预警绝缘故障)、油色谱监测(分析变压器油中溶解气体成分与含量, 判断内部过热、放电等异常情况)、避雷器泄漏电流监测、红外测温(监测设备接头、套管等部位温度, 及时发现接触不良、过载等问题), 系统通过数据实时分析与阈值预警, 实现设备故障早期发现并及时处理。

1.2.2 设备健康管理

(1) 基于大数据的设备状态评估模型, 整合设备运行数据、检修历史、环境参数等多维度信息, 通过机器学习算法构建寿命预测模型(如基于设备老化趋势预测剩余使用寿命)、故障概率分析模型(量化不同故障类型的发生概率), 为设备健康状态评估提供科学依据。(2) 推动检修模式从“定期检修”向“状态检修”转型, 根据设备健康评估结果动态调整检修周期: 对健康状态良好的设备延长检修间隔, 减少不必要的停电检修; 对存在潜在故障风险的设备提前安排检修, 避免故障扩大, 在保障设备安全运行的同时, 降低运维成本^[2]。

1.2.3 二次设备安全防护与应急响应

网络攻击防御重点强化通信安全与访问控制, 防范黑客和恶意代码等对电力监控系统的攻击和侵害, 遵循“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的原则, 采用加密通信技术(如SSL/TLS协议)对站内数据传输进行加密, 防止数据被窃取或篡改; 实施严格的访问控制策略, 通过用户身份认证、权限分级管理(如运维人员仅获取对应设备的操作权限), 限制非授权人员对设备控制系统的访问, 抵御网络攻击风险。

2 智能变电站设备检修策略优化

2.1 检修模式创新

(1) 分级检修策略: 依据设备在电网中的重要性、运行年限及健康状态进行评估制定灵活检修计划, (2) 不停电检修技术: 核心包括带电检测、临时过渡接线与移动式检修平台三大技术。带电检测通过红外热像仪、超声波检测仪等设备, 在设备带电状态下完成缺陷检测; 临时过渡接线技术通过搭建临时供电回路, 在检修目标设备时保障下游负荷持续供电; 移动式检修平台集成液压升降、绝缘防护功能, 可在高空、高压区域实现安全检修作业, 大幅减少停电时间, 提升电网供电可靠性^[3]。(3) 智能检修工具: AR辅助维修通过增强现实技术, 将设备结构图、操作步骤叠加在现实场景中, 引导运维人员精准操作; 激光清障仪利用高能激光束, 远程清除设备表面的异物(如树枝、塑料袋), 避免人工攀爬作业风险; 智能锁控系统通过电子授权管理, 记录每把锁具的开启人员、时间与次数, 实现检修流程全程可追溯, 防止

误操作与非授权检修。

2.2 关键设备检修要点

(1) 变压器检修: 重点关注绕组、铁芯与冷却系统三大核心部件。绕组变形检测采用频响分析法, 对比设备出厂与当前的频响曲线, 判断绕组是否存在位移、变形; 铁芯接地电流监测接地回路电流, 当电流超过100mA时及时排查绝缘故障; 冷却系统智能控制通过实时监测变压器油温、负荷, 自动调节冷却风扇、油泵的运行数量, 避免冷却不足导致设备过热, 同时减少能源消耗。(2) 断路器检修: 核心检测项目包括机械特性测试与SF₆气体微水检测。机械特性测试通过专用测试仪, 测量断路器分合闸时间(标准要求分闸时间 $\leq 0.05s$ 、合闸时间 $\leq 0.08s$)、分合闸速度(根据型号不同需满足1.5-3m/s), 判断机械传动系统是否正常; SF₆气体微水检测采用露点仪, 要求微水含量 $\leq 200 \mu L/L$, 若超标需更换气体或检修密封装置, 防止气体绝缘性能下降引发击穿故障。(3) 二次专业需要检查及测试项目包括: 合并单元、智能终端、保护及测控装置检查等, 具体为装置采样精度检查; 保护逻辑验证并与一次断路器配合分、合闸测试; 断路器防跳功能测试; 保护动作信息上送正确性检查、监控后台遥控功能测试等内容。相关项目严格遵循“压板管理+链路验证+配置核查”流程。检修压板投退需按照“先退出口压板、后退功能压板”的顺序操作, 恢复时反之; GOOSE链路验证通过专用测试工具, 模拟发送GOOSE信号, 检查装置接收、处理信号的正确性, 确保跳闸指令传输正确; 虚端子配置核查需逐一比对装置配置文件与现场实际接线, 确认每个虚端子的映射关系无误, 避免出现保护装置拒动、误动。

2.3 故障诊断与处理流程

(1) 故障分类与定位: 依托SCADA系统实时采集的报警信息(如电流越限、电压异常)与PMU同步相量测量数据(精确到毫秒级的电压、电流相位信息), 结合设备拓扑关系, 快速将故障分为设备故障(如变压器故障、断路器故障)、线路故障(如输电线路短路)、通信故障三大类。通过对比故障前后的相量数据, 定位故障发生的具体设备或线路区段, 定位精度可达500米以内。(2) 典型故障案例库: 涵盖母线失压、保护误动、通信中断等高频故障场景的应急预案。母线失压时, 先通过备用电源自动投入装置(APD)恢复负荷供电, 厂站电源侧开关跳闸线路失压原因、主变差动或瓦斯保护动作跳闸后导致母线失压原因, 同时调取装置动作记录与故障录波数据, 分析误动原因; 通信中断时, 优先切换至备用通信链路(如从光纤切换到无线通信), 保障关键数据传输, 再排查光缆故障、交换机故障等问题。(3) 根因分析(RCA): 采用故障树分析(FTA)方法, 以“设备故障”为顶事件, 逐层分解中间事件(如绝缘故障、机械故障)与底事件(如密封老化、操作失误), 通过逻辑门(与门、或门)建立故障关联关系。例如, 针对“变压器跳闸”故障, 可分解为“过流保护动作”“瓦斯保护动作”等中间事件, 再进一步追溯至“绕组短路”“油中气体超标”等底事件, 最终锁定缺陷根源, 制定针对性整改措施, 避免同类故障重复发生^[4]。

3 智能变电站运行维护技术发展趋势

3.1 人工智能与机器学习应用

(1) 基于深度学习的设备缺陷识别: 通过搭建卷积神经网络(CNN)模型, 对巡检机器人、无人机采集的设备图像进行深度训练, 可精准识别绝缘子裂纹、金具锈蚀、套管油污等细微缺陷。相比传统人工识别, 该技术识别准确率提升至95%以上, 且能自动标注缺陷位置与严重程度, 避免人工漏判、误判, 大幅提升缺陷检测效率, 为设备隐患早期治理提供数据支撑。(2) 自主决策系统实现故障自愈: 整合设备运行数据、历史故障案例与检修策略, 构建AI自主决策模型。当设备出现轻微故障(如传感器数据漂移、小型通信中断)时, 系统可自动生成修复方案, 远程下发指令调整设备参数或重启模块, 实现故障“秒级响应、自主修复”; 对于复杂故障, 系统则推荐最优检修方案并调度运维资源, 减少人工决策时间, 推动运维从“被动处理”向“主动自愈”转型。

3.2 5G+工业互联网融合

(1) 低时延通信支持远程遥控操作: 依托5G网络毫秒级时延特性, 实现变电站一次、二次设备操作远程控制, 如地刀远程分合、隔离开关远程调节等。运维人员可在厂站监控系统, 通过高清视频监控与实时数据反馈, 完成设备操作, 无需现场值守, 尤其适用于偏远地区、恶劣环境下的变电站, 降低人员作业风险, 提升操作安全性与效率。(2) 边缘计算节点实现数据本地化处理: 在变电站部署边缘计算节点, 对传感器采集的实时数据(如设备温度、电流、振动)进行本地化分析与筛选, 仅将关键异常数据与分析结果上传至核心网。此举可减少70%以上的数据传输量, 缓解核心网负载压力, 同时缩短数据处理时延, 确保故障预警、设备控制等关键指令快速执行, 保障变电站运行稳定性。

3.3 绿色运维技术

(1) 节能型设备推广应用: 逐步替代传统高耗能设备, 如采用自然冷却变压器, 通过优化散热结构, 无需风扇、油泵辅助散热, 年耗电量降低30%以上; 部署低功耗传感器, 采用休眠唤醒机制, 在非监测时段降低能耗, 单台传感器年耗电量可控制在5Wh以内, 助力变电站实现“低碳运行”。(2) 退役设备资源化利用: 建立退役设备回收与再利用体系, 例如将退役蓄电池组重组为储能系统, 用于平滑变电站负荷波动、储存光伏等清洁能源发电; 对退役变压器、断路器等设备进行拆解, 提取铜、铁等金属材料或修复可复用部件, 减少固体废弃物产生, 实现“资源循环利用”与“环保减排”双重目标。

4 结束语

智能变电站作为电网智能化的核心载体, 其运行维护与检修水平的提升是实现新型电力系统安全、高效运行的关键。从设备状态监测、健康评估到检修策略创新, 系统梳理了智能运维的关键技术与实践路径。未来, 随着人工智能、5G及数字孪生技术的深度融合, 智能变电站运维将向自主感知、自愈调控方向演进。持续完善技术标准体系、强化跨领域协同创新, 将是推动智能变电站高质量发展, 支撑“双碳”目标实现的重要保障。

[参考文献]

- [1] 赵德芬. 智能变电站二次设备的故障检修及维护[J]. 中国高新科技, 2021, (15): 51-52.
- [2] 刘彭瑀. 智能变电站继电保护的运行和维护管理[J]. 技术与市场, 2021, 28(07): 179-180.
- [3] 贺海浪, 郜亚洲. 智能变电站的运行维护技术分析[J]. 集成电路应用, 2021, 38(12): 202-203.
- [4] 李席章. 智能变电站设备运行及维护探讨[J]. 现代制造技术与装备, 2020, (12): 162-163.