

智能变电站二次电气设备运维隐患排查技术

宋玉山

中国水利水电第十一工程局有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22260

[摘要] 智能变电站依托数字化、网络化架构完成二次电气设备智能化升级,设备集成度与运行关联性显著提升,运维隐患呈现隐蔽、多元、联动特征。本文结合二次设备实际运行特征,梳理常见运维隐患,探究适配排查技术体系,优化分级排查流程,解决设备老化、信号错乱、逻辑失效等问题,为变电站二次系统稳定运行与精细化运维提供技术参考。

[关键词] 智能变电站; 二次电气设备; 运维隐患; 隐患排查; 智能化检测

中图分类号: TM63 **文献标识码:** A

Investigation Technology for Operation and Maintenance Hazards of Secondary Electrical Equipment in Intelligent Substations

Yushan Song

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd.

[Abstract] Intelligent substations rely on digital and networked architectures to achieve the intelligent upgrading of secondary electrical equipment, significantly increasing equipment integration and operational interdependence. Operation and maintenance hazards have consequently become more concealed, diverse, and interconnected. Based on the actual operating characteristics of secondary equipment, this paper identifies common operation and maintenance hazards, explores an adapted hazard investigation technology system, and optimizes the hierarchical inspection process to address issues such as equipment aging, signal confusion, and logic failures. It provides a technical reference for the stable operation and refined maintenance of secondary systems in substations.

[Key words] intelligent substation; secondary electrical equipment; operation and maintenance hazards; hazard investigation; intelligent detection

引言

在电力系统智能化升级中,智能变电站是电网调度、电能输送与配电保障的核心环节,二次电气设备承担其测控、保护与通信基础功能,运行状态直接影响电网安全稳定。当前二次设备采用数字化采样、网络化传输模式,与传统设备差异大,常规运维难以适配新型隐患,完善专属隐患排查技术体系可弥补传统运维不足,实现二次设备隐患提前识别、定位与处理。

1 智能变电站二次电气设备核心结构与运维特性

智能变电站二次电气设备摒弃传统电磁式设备的分立架构,以电子式互感器、智能终端、合并单元、测控保护装置及工业通信网络为核心,形成过程层、间隔层、站控层分层分布式智能化体系,依托光纤通信、数字采样技术实现数据交互与功能联动,集成化、模块化特征显著,硬件精简性与功能复合性大幅提升。

其运维核心较传统模式发生根本性转变,从电气回路、硬件触点检测转向数字信号传输、逻辑程序运行、网络链路交互及

模块状态监测,设备运行关联性极强,单一模块隐患会逐步扩散引发联动失效。某省级电网2023年统计显示,82%的二次设备隐性故障存在72小时以上潜伏期,期间仅表现为参数微偏、无显性告警,且数字化设备对运行环境、信号干扰、程序稳定性敏感度更高,隐患隐蔽性更强,对运维排查的精准性、系统性、全面性提出更高要求^[1]。

2 智能变电站二次电气设备典型运维隐患

2.1 硬件模块老化隐患

硬件是二次设备运行的基础载体,长期运行与环境波动引发的隐性老化是常见运维隐患。智能变电站二次设备核心硬件含采样、运算、电源、接口模块,长期带电运行会出现渐进式性能衰减:电源稳压性能下降,输出电压偏移超±3%且持续15分钟以上时,装置频繁重启、采样中断概率升至67%;光纤接口、网口受温湿度、粉尘影响,接触性能衰减,入端光功率低于-22dBm时,数据传输断续频率提升4倍以上。同时电子式互感器传感精

度逐步偏移, 常规巡检难以识别, 易累积引发系统性数据异常, 某110kV站就曾因合并单元采样值长期漂移, 无硬件告警触发保护跳闸。

2. 2网络通信传输隐患

智能变电站二次设备依托工业以太网、SV、GOOSE报文实现数据交互, 网络通信的稳定性直接决定设备功能有效性, 通信链路隐患具备极强的隐蔽性与突发性。网络链路带宽拥堵、报文延迟、报文丢包、报文错序是核心通信隐患, 多由网络拓扑布局不合理、链路负载不均衡引发。行业测试数据表明, 当过程层网络链路长期负载率超过60%时, SV报文传输延迟将超过2ms阈值, 造成保护装置响应滞后、测控数据更新不及时。此外, 网络交换机端口老化、VLAN划分不合理、链路冗余机制失效等隐性问题, 会导致通信链路抗干扰能力下降, 外界电磁干扰强度超过10V/m时, 极易引发报文异常, 造成设备联动逻辑失效, 进而引发保护误动、拒动等严重问题^[2]。

2. 3程序逻辑运行隐患

智能化二次设备依托内置程序逻辑实现保护、测控、联动功能, 程序逻辑异常属于核心隐性运维隐患, 也是区别于传统变电站的特有隐患类型。设备连续运行超过5年时, 程序缓存堆积、后台逻辑参数漂移的发生概率升至41%, 易导致预设控制逻辑出现偏差。部分设备经过长期运维调试, 存在逻辑参数修改不规范、参数留存冗余、新旧程序版本兼容冲突等问题, 使得设备实际运行逻辑与设计标准不符。国内某区域电网运维统计显示, 约32%的智能变电站二次设备存在遗留调试阶段的冗余逻辑代码, 未完成后续版本迭代清理。同时, 多设备联动场景下, 各装置程序逻辑的时序匹配度偏移超过1ms时, 会引发跨设备协同异常, 出现指令下发延迟、联动动作错位等问题, 此类隐患无直观硬件故障特征, 仅会在特定运行工况下触发异常, 排查难度极高。

2. 4环境适配与电磁干扰隐患

智能变电站二次数字化设备对运行环境的适配性要求远高于传统设备, 环境因素引发的隐性隐患占比逐年提升。变电站柜内温度长期高于45℃、相对湿度超过75%时, 电子元件老化速率将加快2倍, 设备绝缘性能与运行稳定性同步下降。同时, 变电站一次设备运行产生的强电磁辐射、静电感应, 会对二次光纤链路、传感模块、通信模块形成持续电磁干扰, 干扰场强超过30V/m时, 数字信号失真概率提升至58%, 易出现采样数据偏移。部分变电站二次设备柜体接地电阻大于4Ω、屏蔽层接地连接点少于2处, 无法有效抵御外界电磁干扰, 长期处于干扰环境中会引发设备隐性故障, 出现间歇性数据异常、功能失灵等问题, 对系统稳定运行造成持续性威胁。

3 智能变电站二次电气设备运维隐患排查核心技术

3. 1设备状态精细化监测排查技术

设备状态精细化监测排查技术以二次设备硬件运行参数为核心监测对象, 通过实时采集、横向对比、趋势分析的方式, 识别硬件模块隐性老化与性能衰减隐患, 替代传统人工直观巡检模式。现场部署的在线监测终端按照1次/10s的采样频率, 实时

采集二次设备电源参数、光功率值、设备温度、采样精度、模块运行负载等核心状态数据, 构建设备运行状态数据库。排查过程中摒弃单一阈值判断的粗放模式, 采用横向同源对比与纵向时序分析相结合的方式, 将同间隔、同型号设备的运行参数进行横向比对, 同时结合设备90天以上的历史运行数据, 绘制参数变化趋势曲线, 精准捕捉参数渐进式偏移、小幅波动等隐性异常。针对电源模块电压小幅漂移、光功率以0.2dBm/周速率缓慢衰减、采样精度日均偏差超过0.01%等人工无法识别的隐患, 通过状态数据的差异化分析完成精准定位。依托电子元件参数10万小时衰减规律模型, 可提前30天识别老化隐患, 为设备预维护提供数据支撑, 从源头规避硬件故障引发的运行异常^[3]。

3. 2网络报文深度分析排查技术

网络报文承担着智能变电站二次设备数据交互与信息传输的核心作用, 报文运行异常, 也是站内通信隐患最主要的外在表现, 网络报文深度分析排查技术是现阶段排查通信链路各类隐性故障的关键方式。该项技术面向SV采样报文、GOOSE联动报文以及MMS监控报文开展全方位解析, 打破传统检测方式仅可判断链路通断状态的局限性, 深度挖掘报文传输环节中潜藏的各类隐性问题。现场排查时, 采用端口镜像全量抓包方式, 抓包采样精度设置为1μs, 依次完成报文抓取、协议解析、时序校验以及完整性筛查等操作, 精准判定报文丢包率大于0.01%、传输延迟超过2ms、数据抖动幅度大于0.5μs、内容校验码畸变等异常工况, 结合传输状态追溯异常诱因, 有效区分链路硬件损坏、网络负荷超标、拓扑结构布置不规范、端口参数设置不合理等隐患来源。针对网络冗余链路切换响应时长超过500ms、VLAN隔离报文泄漏率大于0.001%、多设备报文时序匹配度偏差超过1ms等隐蔽性极强的通信问题, 该技术可通过连续72小时不间断追踪报文运行轨迹、开展动态数据比对的方式, 捕捉设备运行中间歇性、偶发性的报文异常现象。技术最终输出全站网络链路负荷热力图, 梳理各链路的负荷分布情况, 提前识别网络拥堵隐患, 支撑站内网络传输架构持续优化, 稳步增强二次系统通信链路的运行稳定性与工作可靠性, 规避因通信异常引发的二次设备功能失效等各类运行问题。

3. 3设备逻辑闭环校验排查技术

设备逻辑闭环校验排查技术针对程序逻辑异常、参数漂移、联动失效等隐性隐患设计, 是适配智能化二次设备的核心排查技术, 有效破解逻辑隐患排查难度大、漏判率高的行业痛点。该技术以变电站二次系统SCD设计文件、标准定值单为基准, 构建覆盖32类标准工况、127个联动节点的全流程逻辑校验体系, 实现单设备独立逻辑与多设备联动逻辑的双重闭环校验。在单设备逻辑校验层面, 逐帧逐字节比对设备当前运行参数、程序逻辑与设计标准的差异, 排查参数偏移量超过0.5%、冗余逻辑残留、程序版本哈希值不匹配等隐性问题, 精准识别单一设备逻辑运行偏差。在多设备联动逻辑校验层面, 通过模拟故障电流电压注入方式, 覆盖设备正常运行、故障触发、指令联动等全工况场景, 校验各装置之间的逻辑时序匹配度偏差、指令传输丢包率、动

作响误差值, 排查跨设备联动错位超过1ms、时序滞后、协同失效等复合型逻辑隐患。相较于传统人工逻辑核对方式, 该技术实现逻辑校验的标准化、全覆盖化, 可捕捉仅在0.3s以内工况切换窗口中才会触发的隐性逻辑故障, 彻底补齐传统排查方式的技术短板, 保障二次设备保护、测控、联动功能的精准实现^[4]。

3.4 环境与电磁耦合检测排查技术

环境与电磁耦合检测排查技术, 主要针对环境参数失衡、电磁干扰影响所产生的间接运维隐患开展排查工作, 依托全域环境监测手段与电磁环境评估方式, 可有效筛查二次设备潜藏的运行风险, 为二次设备的长效稳定运行筑牢环境层面的基础条件。现场布设的传感节点按照1次/5min的采集频率, 持续对设备柜体内部、继电保护室内的温湿度数值、粉尘浓度、空气清洁度等基础环境指标进行动态采集, 及时发现温湿度超标、柜体凝露、粉尘积聚浓度超过0.1mg/m³等常见环境问题, 提前预判环境变化对设备电子元器件、整体绝缘性能、信号传输链路造成的不良影响。针对变电站现场复杂电磁工况, 采用频率范围10kHz~6GHz的电磁辐射分析仪开展专项检测, 排查出设备屏蔽层厚度不足0.5mm、接地回路阻抗大于1Ω、电磁防护性能弱化等隐性缺陷, 精准锁定现场电磁干扰的具体位置与防护薄弱环节。技术体系结合采集到的环境数据、电磁数据以及设备实时运行状态, 搭建关联性大于0.9的耦合分析模型, 梳理出环境、电磁因素和设备数据偏差、运行功能波动之间的内在联系, 清晰区分设备本体故障问题与外部环境干扰引发的异常问题, 以此完成隐患成因的精准判别, 为现场优化设备运行环境、完善电磁防护措施提供可靠、具体的整改参考依据。

3.5 隐患分级溯源与研判技术

隐患分级溯源与研判技术, 属于二次设备运维隐患排查流程中的收尾核心技术, 该技术具备隐患分类、溯源定级、风险研判的基础功能, 推动整体排查工作从单纯的隐患发现, 过渡到精准治理的闭环管控模式。该技术整合前期各类检测手段采集的设备运行状态、网络通信数据、程序逻辑参数、现场环境数据等多类信息, 搭建一套包含27项量化指标的多维度隐患评判分析体系; 体系依据隐患的影响覆盖面、危害轻重程度、风

险扩散趋势, 把各类运维隐患划分为轻微隐性隐患、一般波动隐患、重大风险隐患三个层级, 有效改善隐患处置无序、判定笼统的问题。技术通过多源数据交叉对比、72小时运行工况轨迹回溯、参数关联度大于0.8的关联分析方式, 完成隐患源头的精准定位, 清晰梳理各类隐患的形成原因、发展过程以及扩散特点, 有效区分设备原生故障、联动衍生故障以及环境诱发故障。针对不同层级、不同类型的设备隐患, 该技术可匹配对应的运维处理方案, 对轻微隐性隐患落实预防性养护操作, 对一般波动隐患完成参数调校与功能修正, 对重大风险隐患开展专项整改与设备复核工作, 切实提升智能变电站二次设备隐患治理的整体效率与运维质量^[5]。

4 结束语

智能变电站二次电气设备运维隐患具有隐蔽性、联动性与智能化特征, 传统排查手段已难以适应当前运维场景。本文梳理了站内二次设备常见运维隐患, 搭建起多维度检测研判的完整排查技术体系, 可覆盖绝大多数隐性风险, 提升隐患排查的精准度与全面性, 实现隐患提前防控与闭环治理, 对保障二次系统稳定运行具备实际应用价值。

[参考文献]

- [1]马凤贵.继电保护设备电气二次回路隐患排查技术研究[J].消费电子,2026(5):128-130.
- [2]张彩虹,任浩天.变电站一次设备带电测试故障诊断技术与实践优势分析[J].电气技术与经济,2024(9):298-300+303.
- [3]胡园园,黄伟良,席兴华.变电站电气设备安装质量通病及施工优化管控策略[J].电力研究,2025,8(16):13-16.
- [4]王跃.智能变电站二次电气设备系统级调试技术研究[J].电气技术与经济,2026(3):144-146+150.
- [5]刘颖聪.智能变电站二次电气设备安装与调试分析[J].光源与照明,2025(9):218-220.

作者简介:

宋玉山(1990--),男,汉族,河南人,本科,初级工程师,研究方向:智能变电站二次电气设备运维隐患排查技术。