物联网技术实现二次回路隐患实时预警的实践举措

高 宇
国网江苏省电力有限公司东台市供电公司 江苏 盐城 224200

摘 要 智能变电站二次回路虚拟化、网络化架构使其隐患具备隐蔽性、渐进性，传统运维方式难以精准预判故障。本文梳理智能变电站二次系统三层架构，剖析光纤、网络、配置、设备等典型隐患及演化规律，提出多维度诊断方法与物联网监测预警策略，搭建分级告警闭环处置机制。研究成果可有效提升变电站二次回路隐患排查效率，保障电网安全稳定运维，为智能变电站运维优化提供实践参考。

关键词 智能变电站；二次回路；隐患特征；物联网监测；预警机制；SCD配置

Practical Measures for Realizing Real-Time Early Warning of Secondary Circuit Hazards Based on Internet of Things Technology

Gao Yu
Dongtai Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yancheng 224200, Jiangsu Province, China

Abstract The virtualized and networked architecture of secondary circuits in smart substations makes their hazards concealed and gradual, and traditional operation and maintenance methods find it difficult to accurately predict faults. This paper reviews the three-layer architecture of the secondary system in smart substations, analyzes typical hazards such as optical fiber, network, configuration, and equipment hazards as well as their evolution patterns, proposes multi-dimensional diagnostic methods and Internet of Things monitoring and early warning strategies, and establishes a hierarchical alarm closed-loop disposal mechanism. The research results can effectively improve the efficiency of hazard inspection of secondary circuits in substations, ensure the safe and stable operation and maintenance of the power grid, and provide practical references for the operation and maintenance optimization of smart substations.

Key words Smart Substation; Secondary Circuit; Hazard Characteristics; Internet of Things Monitoring; Early Warning Mechanism; SCD Configuration

智能变电站二次系统采用网络化、虚拟化的架构，摒弃传统硬接线模式，极大地提升信息共享的能力。然而，这也致使二次回路隐患的隐蔽性、渐进性特征十分突出，传统巡检运维方式难以实现对隐患的提前预判。为此，本文依托物联网与边缘计算技术，开展二次回路隐患监测预警策略的研究，以助力变电站安全稳定地运行。

1 智能变电站二次回路架构与隐患特征

1.1 智能变电站二次系统架构

智能变电站二次系统采用站控层、间隔层、过程层三层分布式的架构形式。过程层包含合并单元、智能终端，执行电流或者电压采样、开关量采集、断路器控制等功能；间隔层以保护、测控装置作为核心，完成保护逻辑的判别以及控制的决策；站控层通过制造报文规范（manufacturing message specification，MMS）网络实现站级的监控以及调度的通信。层间的通信采用光纤以太网：过程层和间隔层之间以采样值（sampled value，SV）报文来传输采样值、面向通用对象的变电站事件（generic object oriented substation event，GOOSE）报文来传输开关量、跳合闸命令，传统的硬接线被变电站配置描述文件（substation configuration description，SCD）所定义的虚端子取代，虽然提升了信息共享的能力，但是二次回路物理连接的透明性有所下降，光纤链路状态、报文传输质量、虚回路配置正确性无法通过目视巡检或者万用表测量来判定[1]。

1.2 典型隐患类型与演化规律

光纤链路出现劣化：光模块发射功率出现衰减、光纤弯折产生损耗、接口受到污染导致接收光功率下降，引发SV采样出现丢包、GOOSE跳闸报文出现中断，隐患具有渐进性（数周乃至数月光功率下降到告警阈值），但是传统运维没有在线监测的手段。

网络报文出现异常：过程层交换机端口出现故障、虚拟局域网（virtual local area network，VLAN）划分不合理、网络出现拥塞等，可能导致GOOSE/SV报文出现延迟或者丢包，保护动作瞬间大量变位报文突发容易引发交换机出现阻塞，造成保护出现拒动或者变慢的现象；广播风暴、循环冗余校验（cyclic redundancy check，CRC）错误、控制块重复等网络层故障也对通信的可靠性构成威胁。

虚回路与SCD配置存在偏差：SCD文件定义虚端子的逻辑，改扩建的时候虚回路出现漏配、错配会导致保护逻辑失效；定值、压板修改之后没有同步更新SCD版本，使得图纸、模型与实际配置不相符；光纤标号出现错乱、虚回路没有可视化的载体，故障定位的效率极低。

合并单元与智能终端设备出现异常：装置长期受到屏柜密闭以及强电磁干扰，内部电解电容出现老化、电源纹波超标，容易出现采样失真、装置重启的情况；电子式互感器光学元件温漂导致采样数据出现偏移，引发差动保护差流告警。

过程层网络通信出现故障：过程层交换机出现故障中断信息的交互，导致保护、智能终端、测控装置等功能失效；北斗/全球定位系统（global positioning system，GPS）对时信号出现中断、合并单元（merging unit，MU）时钟出现漂移等时间同步异常导致多间隔采样时序不一致，直接闭锁差动保护[2]。

2 隐患演化规律与多维度诊断分析方法

2.1 隐患渐进性演化规律

上述5类隐患具有显著的渐进性和隐蔽性。例如，光纤链路光功率下降往往持续数周乃至数月才达到告警阈值；合并单元内部电源老化、温漂等劣化过程也是缓慢累积的；网络拥塞导致的丢包率通常在特定负荷时段才凸显，偶发性强。传统定期巡检无法捕捉渐变过程，仅能发现已发生的故障，缺乏对隐患演变趋势的预判能力。

2.2 多源数据关联诊断逻辑

趋势分析通过连续监测光功率、设备温度、电源纹波等参数，建立历史基线，利用边缘计算网关内置的预测模型识别偏离趋势，实现“由表及里”的早期识别。报文关联分析，对GOOSE/SV报文的CRC校验、序列号连续性、时延特性进行实时解析，并结合交换机端口流量、VLAN配置等网络状态，综合判断丢包或延迟的根本原因。配置一致性校核，将SCD文件中定义的虚端子关系与现场装置实际发布的GOOSE/SV订阅状态进行自动比对，发现漏配、错配或版本不同步问题，避免“图实不符”导致的逻辑失效。跨设备综合研判，将设备状态参数（温度、电压、CPU负荷）与通信质量、采样数据跳变等现象关联，区分设备自身老化与外部干扰因素，提高定位准确率。智能变电站二次回路隐患实时预警闭环流程图如图1所示。

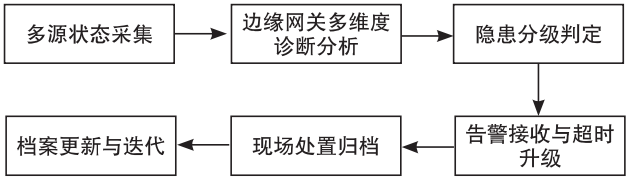


图1 智能变电站二次回路隐患实时预警闭环流程图

3 面向典型隐患的物联网监测预警策略

3.1 光纤链路在线光功率监测与劣化预警

光纤链路属于智能变电站二次回路的核心物理载体，它的健康状态会直接影响GOOSE/SV报文的传输质量。传统运维仅仅在通信中断之后才去排查故障，无法提前识别光功率渐变的隐患。

要在每根光纤的收发端部署在线光功率监测模块，实时地采集收发光功率并且与历史基线进行比对。边缘计算网关里面内置光功率预测模型，当某光纤接收光功率持续下降并且逼近告警门限（－25～－30 dBm）的时候，系统会自动触发趋势预警。预警信息结合物理网络拓扑与端口映射关系，能够直接定位到具体链路与端口，从而指导运维提前开展光纤清洁、更换或者光模块替换。

1个110 kV智能变电站在投运4年之后，监控后台频繁地出现某间隔SV采样中断告警，然而保护装置没有正确上送断链信息。运维团队在过程层交换机各光口部署在线监测模块之后，发现该间隔合并单元至保护装置的光纤接收光功率在2周内从－18 dBm衰减到－27 dBm（超出正常范围）。系统提前72 h触发“光功率劣化趋势预警”，运维人员在计划检修窗口更换光纤以及两端光模块，彻底消除隐患，避免SV采样中断所导致的保护闭锁事故[3]。

3.2 GOOSE/SV报文实时解析与异常检测

GOOSE报文和SV报文属于保护功能以及测控功能核心通信机制，像其出现丢包、延迟超出标准、格式存在错误、序列号发生跳变等问题，能够直接造成保护出现拒动、误动或者数据同步失效。

在过程层网络交换机的镜像端口之处部署报文的解析装置，实时地对GOOSE/SV报文进行捕获并且解析，所监测的维度涵盖报文的完整性（CRC校验）、传输的连续性（序列号连续性）、时延的特性以及通信的配置一致性（将App ID、MAC地址和SCD文件进行比对）。边缘计算网关针对多源数据进行

关联分析，当出现连续丢包、时延超出标准或者配置不匹配的情况时，自动生成告警并且研判故障类型。

110 kV智能变电站投入运行之后，保护装置频繁地出现GOOSE断链告警，通信恢复之后告警就消失，常规的巡检无法复现该情况。运维团队在交换机的镜像端口部署报文的解析装置，连续48 h进行抓包分析后发现：过程层网络负荷的高峰时段，GOOSE报文的瞬时流量急剧增加，交换机端口的缓存溢出从而导致部分GOOSE变位报文被丢弃。进一步核查之后发现交换机VLAN划分得不合理，GOOSE报文与SV报文共同使用VLAN从而导致流量相互干扰。依据诊断结果重新规划VLAN并隔离GOOSE业务与SV业务之后，GOOSE断链告警彻底消除。

3.3 合并单元与智能终端状态在线感知

合并单元与智能终端是过程层的核心设备，其运行状态直接影响采样精度与执行可靠性。如设备老化、电源异常、环境温升这类渐变性质的隐患，很难通过定期进行的巡检工作发现。

在合并单元和智能终端的内部部署芯片级状态监测单元，实时采集电源电压、核心温度、CPU负荷、光模块收发功率等运行参数。边缘计算网关建立设备健康基线的模型，当参数偏离正常的范围或者呈现持续劣化的趋势时，自动触发预警并且推送设备的定位信息[4]。

1个220 kV的智能变电站的合并单元在雷雨季节过后出现SV采样数据偶尔跳变的现象，进而引发间隔差动保护差流告警。运维团队部署芯片级监测单元之后，追踪发现其核心温度在环境湿度升高之后出现异常攀升，并且电源纹波系数超出标准。系统综合研判，认为是内部电解电容老化导致电源滤波性能下降。运维人员在计划停电的窗口更换电源板之后，采样数据恢复到稳定状态，差流告警得以消除[5]。

3.4 隐患告警分级与闭环处置机制

智能变电站二次回路隐患种类繁多、影响各异，海量告警若不加区分地推送，容易将关键隐患淹没。因此，需建立分级告警与闭环处置机制。

三级预警分级：一级（紧急）对应已造成功能失效或即将引发保护误动/拒动的隐患，如GOOSE/SV断链、光纤中断等，需在1 min内通过语音呼叫+短信+App三通道推送至运维负责人；二级（重要）对应参数持续劣化、可能发展为严重故障的隐患，如光功率持续下降、报文丢包率超标等，通过短信+App推送至当值运维人员；三级（一般）对应轻微异常或单次偶发事件，通过App推送并纳入日巡检关注清单。

闭环处置流程：运维人员通过移动端App接收告警后，依次完成“告警确认→现场核查→原因分析→处置记录→影像留存→结果归档”全流程操作。若告警在规定时限内未被确认，系统自动升级推送至上一级管理人员。处置完成后，系统自动生成隐患处置报告并更新设备健康档案，为后续状态检修提供数据支撑。

某市级供电公司所辖12座智能变电站长期存在告警冗余、隐患处置滞后问题。该公司搭建一体化闭环处置平台后，对全站二次回路隐患实行三级分级预警。平台上线首月即自动识别并分级推送各类告警186条，其中一级告警3条（含光纤中断1条、GOOSE断链2条）、二级告警27条、三级告警156条。运维人员依托移动端App完成全部告警的确认与处置闭环，二次回路隐患平均处置时长由原来的4.6 h缩短至52 min，处置时效提升88%，彻底解决“只告警、不处置”的运维漏洞。

4 结束语

本文对智能变电站二次系统的架构以及5类典型隐蔽的隐患进行梳理，构建完整的预警评价体系，有针对性地提出多维度物联网监测预警的策略以及分级闭环处置的机制。工程实例验证的情况表明，该方案能够精准识别二次回路渐变的故障，有效地提升隐患排查的效率以及运维的质量，为智能变电站二次系统的安全运维提供可靠的技术支撑。

参考文献

[1]沈鑫,赵丹妮,曹敏.基于物联网技术的电能计量装置远程在线监测及分析平台研究[J].电测与仪表,2015,52(S1):35-40.

[2]杨远朋,王有强,李显伟,等.基于物联网技术的继电保护二次回路在线监测系统[J].电子设计工程,2025,33(14):90-93,97.

[3]刘春雨,罗群,顾强,等.智能配电网电能计量设备的运行状态监测终端研究[J].中国测试,2020,46(7):68-74.

[4]王蓓蓓,李扬,高赐威.智能电网框架下的需求侧管理展望与思考[J].电力系统自动化,2009,33(20):17-22.

[5]杜锦阳.物联网技术的电能计量装置远程在线监测及平台建设研究[J].中国高新技术企业,2016(23):16-17.

（本文编辑 杜宇琪）

