

面向智慧运维的变电站物联网早期火情在线监测预警体系研究

凌秋阳 徐凯 岑富林 许多虎 孙启悦

国网湖州供电公司

DOI:10.32629/jsse.v4i4.21718

[摘要] 变电站设备密集,运行连续,电气过热、绝缘劣化、局部放电等异常都可能造成早期火灾风险,传统的单点消防监测不能及时发现微弱的火情征兆,针对监测信息分散、异常识别滞后、告警联动不足等问题,创建物联网早期火情在线监测预警体系,用温度、烟雾、气体和电气状态等多源数据进行融合判别,并设置边缘处理、风险分级、运维联动机制,体系应用可以缩短异常发现时间,减少无效告警,提高火情定位、风险研判和处置闭环效率,推动变电站消防管理从被动报警转向主动预警。

[关键词] 智慧运维; 变电站物联网; 早期火情; 在线监测; 分级预警

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A

Research on Early-fire Online-monitoring and Early-warning System of Substation Internet-of-Things Oriented to Smart Operation and Maintenance

Qiuyang Ling Kai Xu Fulin Cen Duohu Xu Qiyue Sun

State Grid Huzhou Power Supply Company

[Abstract] Substations feature densely-arranged equipment and continuous operation. Abnormal conditions such as electrical overheating, insulation deterioration and partial discharge may induce early-stage fire risks. Traditional single-point fire monitoring fails to detect faint fire symptoms in a timely manner. Aiming at the problems of scattered monitoring data, delayed anomaly identification and insufficient alarm linkage, an early-fire online-monitoring and early-warning system based on Internet-of-Things technology is constructed. Multi-source data including temperature, smoke, gas concentration and electrical operating status are adopted for fusion judgment. Mechanisms of edge computing processing, risk grading and operation-maintenance linkage are established. The application of this system can shorten the discovery time of anomalies, reduce false alarms, and improve the efficiency of fire location, risk assessment and closed-loop disposal. It promotes the fire-safety management of substations to transform from passive alarming to proactive early warning.

[Key words] smart operation and maintenance; substation Internet of Things; early-stage fire; online monitoring; graded early-warning

引言

变电站的作用就是电能的汇集、变换和分配,主变压器、开关柜、电缆沟等区域一直处于连续运行状态,接点过热、绝缘老化、局部放电等异常现象出现初期,只会产生轻微升温、烟气或者特征气体变化,传统的火灾报警装置多依靠单一阈值来触发,面对缓慢升温的复合型异常,往往会发现偏晚、信息孤立以及定位不准等情况。智慧运维对设备的状态持续感知、风险前移控制提出了更高的要求,需要把物联网感知节点、边缘处理、多参数融合判别、分级预警、运维处置链路打通,使得微小异常可以被持续捕捉,并且根据风险演化程度生成对应的预警信息和处置指令。

1 智慧运维场景下变电站物联网早期火情在线监测需求

1.1 关键设备连续运行形成多类型火灾风险

主变压器、开关柜、电缆接头、电缆沟以及二次设备一直担负着连续输变电的工作,由于设备发热、载流变化、绝缘老化和接触状态劣化相互叠加,火灾风险具有明显的隐蔽性和渐进性,接触电阻增大容易造成局部温升持续累积,绝缘材料受热老化后耐受能力下降,局部放电、电弧故障和异常泄漏电流会加快热失控过程。这类异常起初没有明显的明火、浓烟,只是温度缓慢上升、特征气体浓度波动、局部电气参数偏移等细小信号,如果还用传统的定点报警方式,就会错过火情从潜伏状态向快

速发展阶段转变的关键窗口期,因此监测对象不能只依靠单一的消防设施,而要扩展到设备热状态、电气状态、环境状态,实现风险征兆的连续识别。

1.2 物联网感知网络支撑运行状态实时采集

物联网感知系统承担火情早期信息获取的基本任务,根据设备种类、空间结构和风险等级配置温度、烟雾、特征气体、电流、电压以及局部放电等监测节点,使不同的区域形成具有不同采样能力的感知网络,前端传感节点负责连续采集微弱变化,通信链路完成状态数据稳定回传,边缘终端对高频数据进行清洗、压缩、时间同步和异常筛选,减少无效信息对平台判断的干扰^[1]。对于电缆沟、开关柜内部等封闭区域,还要注意通信的可靠性、节点的供电能力和环境耐受性能,避免数据中断造成监测盲区,多种感知信息可以按照统一的时间轴汇集起来,为温升速率的识别、气体变化趋势的识别、电气异常的关联分析提供数据支撑,使火情判断从单点阈值触发变为连续状态识别。

1.3 智慧运维模式提高火灾风险前移管控要求

智慧运维重视设备的状态能被察觉到、危险的变化可以被预知、处理的过程可以被追溯,因此火情监测就不是仅仅依靠烟雾或者明火出现之后发出警报来实现的,而是要提前发现那些可能会导致燃烧的异常发展情况,远程巡视以及集中运维模式削减了现场常驻人员之后,对于在线监测系统连续性以及自主判断能力的要求也变得更高了,系统要依照设备的位置,运行负荷,以往状况和及时检测数据来塑造风险级别,并且把异常信息同具体的间隔,设备或者电缆区段直接联系起来。预警结果还要进入运维平台,自动生成复核、巡检、隔离、处置任务,让风险识别同业务流程相一致。该种管理方式可以缩短从发现异常到现场处置之间的时间线,把火情控制从报警以后的被动应对提前到征兆出现时的主动干预。

2 变电站物联网早期火情在线监测主要问题

2.1 单一参数监测难以捕捉微弱火情征兆

传统监测方式大多以固定温度值、烟雾浓度等单项指标为依据来触发报警,在火情萌芽期缓慢变化的情况下,识别灵敏度容易受到限制,设备负荷波动会导致正常温升,季节温度、通风条件、空间热积聚也会造成监测值短时偏移,单一阈值无法区分运行发热和异常热演化。火情初期烟雾浓度较低,局部过热、绝缘劣化产生的微弱气体变化还没有达到传统报警门限,容易形成识别空窗,固定阈值如果设定过低,就会增加非火情告警的次数,造成预警可信度下降,不能满足智慧运维对早期风险精准识别的要求。

2.2 多源监测数据分散降低异常关联判定精度

不同的感知终端一般采用独立的系统来布置,温度、烟雾、特征气体、电流以及设备的状态信息分别属于不同的采集链路,数据格式、采样频率和时间戳没有统一的标准,因此同一个异常的过程很难建立起正确的对应关系^[2]。局部温升出现的时候,如果相关的气体浓度变化、电气参数波动不能同时发生,那么系

统就只能依靠单一的信号来做出判断,从而忽略了多个弱异常一起指向火情风险的联系特点,部分高频数据未经清洗就直接上传,还会把通信抖动、传感漂移和瞬时干扰混入进去,造成异常趋势被噪声所掩盖,进而影响到火情识别模型对于真实状态变化的判断准确性。

2.3 告警信息传递滞后削弱运维闭环处置能力

传统火灾报警系统与设备台账、巡检系统和运维管理平台之间存在信息分割,告警发生后仍然需要人工核对设备编号、安装位置和运行状态,延长了异常确认时间,部分告警信息只显示触发点位和报警类型,缺少风险等级、变化趋势以及关联设备信息,值班人员很难快速判断处置优先级。当告警数据不能直接生成巡检任务、复核指令或设备隔离建议的时候,信息就会经过多环节的转发,从而造成指令滞后、责任链条断开等问题,如果处置结果不能同步回传到监测平台,将会形成报警、核查、整改相互分离的管理状态,影响智慧运维闭环控制效率。

3 面向智慧运维的物联网早期火情在线监测预警体系构建

3.1 配置多参数感知节点增强火情前兆捕捉能力

变电站早期火情存在信号弱、持续时间不确定、各种设备异常特征不一样等特性,感知层布置不能只用一个温度或者烟雾探测的方式,应该根据设备的风险属性、空间结构以及火情发展特点来设置多种参数的检测节点,主变压器、开关柜、电缆接头、电缆沟和二次设备区域可以分别得到温度变化、烟雾浓度、特征气体、电流波动、局部放电等信息,从而形成热异常、电气异常和燃烧前兆互相补充的数据链。节点布设不能单纯追求数量上的增加,要根据热源分布、气流走向、封闭情况以及设备发热点来决定安装密度和采样速度,防止出现监测死角和重复采集的情况,对于柜内、电缆夹层等狭小的空间,可以使用小型化低功耗的感知单元进行长时间的在线监测,而对于高风险点位,则可以加大数据采样的频率来及时发现温升斜率、气体浓度突然变化以及电气参数异常等情况,所有节点统一编码之后与设备台账形成一一对应的关系,使得每一个监测数据都可以指向具体的设备、间隔或者区域,给后续火情定位、风险预估以及智慧运维任务创建赋予明确的数据入口。

3.2 融合边缘计算数据判别提高异常识别准确程度

多源监测信息能不能变成可靠的预警,主要看它进入平台之前的数据处理质量以及联系辨别水平,边缘终端可以做数据清洗、异常值剔除、时间校正、趋势计算、特征压缩等工作,把各种各样的温度、烟雾、特征气体和电气参数转化为可以比较的状态信息,对于由于环境温度的变化、负荷的波动、传感器的漂移而产生的干扰,可以采用动态基线的方法,把判断依据由原来的固定的阈值转变为当前值、变化速率、持续时间、历史趋势这四个方面的综合分析^[3]。某一监测参数短时间内超限时,并不会马上认定为火情,会同时检验该区域的温升走向、气体浓度变动和设备运转状况;多个弱异常在接近的时间段里接连发生,那么就会加大风险系数,在边缘侧做完初步筛选之后,只把

有效的异常特征以及必要的原始数据传送到中心平台,从而削减了通信链路负担,并且减少了大量正常的海量数据给即时判定带来的影响,根据不同的设备类型来设置不同的特征规则,可以防止用同一个阈值去对待不同的设备而造成判断失误的情况发生,从而使得异常检测更符合实际运行情况,提高早期火灾识别的灵敏度和稳定性。

3.3 建立风险分级预警机制联动智慧运维处置

火情预警不能仅仅停留在报警信号产生上,还要把监测结果转化为可执行的运维指令,风险等级的划分可以根据异常参数偏离程度、变化速度、持续时间、多源信息一致性和设备重要等级来综合判断,把一般异常、持续性风险和快速恶化状态区分开来,形成提示、预警和紧急告警等层级,提示级信息主要纳入趋势跟踪和重点关注清单,预警级状态触发现场复核、专项巡视、设备状态核查,紧急告警直接进入快速处置流程,并同步推送设备位置、异常参数、趋势曲线和风险等级,减少人工二次查找信息的时间。预警平台还需要和设备资产台账、巡检系统、运维工单系统建立数据接口,使告警信息能够自动关联具体设备,生成具有明确对象、风险类型和处理时限的任务。现场核查结果、处置措施、恢复状态重新回传到监测平台之后,可以修正风险判定参数,减少同类误报重复出现,监测、研判、派单、处置、反馈构成了连续的链路,让早期火情控制真正进入了智慧运维业务流程。

4 在线监测预警体系运行后的火灾风险管控成效

4.1 异常感知时间缩短提升早期火情发现效率

连续感知机制使火情识别由传统阈值触发转向趋势变化识别,温度缓慢升高、烟气浓度异常波动以及电气参数偏移等微弱信号可以在达到危险水平之前就被发现,多参数节点保持高频采样后,系统可以根据变化速率、持续时间、历史基线来识别异常发展轨迹,减少人工巡视周期对发现时效的影响。边缘终端同步完成异常筛选和快速判别,降低数据上传、平台处理带来的延迟,将预警节点前移到设备过热、绝缘劣化等早期阶段,在异常产生到预警输出的时间明显缩短以后,现场核查、风险干预就会拥有更多时间窗口来处理变电站初期火情。

4.2 多源融合判别提高火情预警准确程度

多源数据融合改变了以往单一监测值超限就报警的方式,温度、烟雾、特征气体和电气状态都可以用同一个时间窗口来关联匹配,从而使火情识别依靠的是多维异常一起支撑起来的,环境温度的变化、负荷的增加所造成的正常发热可以依据设备的运行参数加以区别,短时间内传感器的波动也可以通过持续的时间以及相邻节点的信息来消除,进而削减由于非火情原因造成的误报^[4]。异常位置判定由原来的单点告警发展成现在的设备、间隔、区域级定位,风险源识别也更加清楚,预警准确率

提高之后,无效核查次数被控制住了,运维资源就可以先集中到高危点位上,提升火灾危险性预判的精确度和可信度。

4.3 预警处置闭环强化变电站智慧运维能力

预警信息接入智慧运维平台之后,火情风险管理由分散告警转为任务化、流程化的处理,根据风险等级自动关联设备台账和空间位置,同步生成核查内容、处置时限和任务优先级,减少告警确认、设备查找和人工转派的时间,将现场巡视结果、异常原因、处置措施及恢复状态回传平台,形成完整的事件记录,用来修正后面的预警判断。不同的风险等级对应的是差异化的响应流程,一般的异常更注重持续的跟进,高的风险直接进入快速的处置链路,从而保证监测、研判、派单、处理、反馈这几个环节之间的连续性,火灾风险从发现到消除形成了一个可以追踪的闭环,智慧运维平台对设备安全状态的统筹控制能力也得到加强。

5 结语

把物联网、多参数感知、智能判别技术结合起来使用,可以把变电站火灾防控节点提前到异常萌芽期,完善边缘处理、风险分级、运维闭环机制可以提高微弱火情识别精度,缩短告警响应时间,使监测、研判、处置形成一条链路,从而加强变电站智慧运维条件下消防安全管控的能力。

[参考文献]

- [1]林海,朱宏宇,田建伟,等.智能变电站物联网设备安全通信轻量级双向身份认证方法[J/OL].电力信息与通信技术,1-10 [2026-08-27].
- [2]林双双.基于物联网的变电站设备运检一体化信息管理平台[J].物联网技术,2025,15(2):131-133.
- [3]刘洋.无人值守变电站智慧运维建设方案研究[C]//广东省国科电力科学研究院.第五届电力工程与技术学术交流会议论文集,2024:23-24.
- [4]李潇,何子骥.基于物联网技术的电力蓄电池智慧运维系统设计与应用[J].电器工业,2022,(5):22-25.

作者简介:

凌秋阳(1979--),男,汉族,浙江湖州人,职称:工程师,本科,研究方向:变电站消防运维检修。

徐凯(1990--),男,汉族,山东潍坊人,职称:工程师,硕士,研究方向:变电站消防运维检修。

岑富林(1988--),男,汉族,河南开封人,职称:工程师,硕士,研究方向:变电站消防运维检修。

许多虎(1996--),男,汉族,甘肃武威人,职称:工程师,硕士,研究方向:变电站消防运维检修。

孙启悦(1983--),男,汉族,浙江湖州人,工程师,硕士,研究方向:变电站消防运维检修。