

# Technological Innovation and Performance Verification of 10kV Switchgear Intelligent Early Warning Device

Jingfa Wang

State Grid Henan Electric Power Company, Ruyang County Power Supply Company, Luoyang, Henan, 471299, China

## Abstract

As the development of smart grids continues to advance, 10kV switchgear has become a primary component in power distribution systems, with its operational reliability directly impacting grid safety. Traditional monitoring methods fail to detect equipment defects at an early stage. Issues such as overheating caused by aging equipment and insulation degradation, as well as condensation resulting from poor ventilation in fully enclosed structures and moisture accumulation in cable trenches, can easily lead to insulation breakdown and discharge burns. The development and application of intelligent early warning devices for 10kV switchgear present a viable solution. This paper focuses on analyzing the necessity of installation, application value, technological innovation pathways, and performance verification methods for such devices, aiming to ensure their reliable operation and further enhance their sensing and diagnostic capabilities. A scientific performance verification system safeguards the device's reliable operation, drives the intelligent operation and maintenance upgrade of 10kV switchgear, and supports the intelligent transformation of the power industry.

## Keywords

10kV switchgear; intelligent early warning device; technological innovation; performance verification

## 10kV 开关柜智能预警装置的技术创新突破与性能验证

王景法

国网河南省电力公司汝阳县供电公司, 中国·河南 洛阳 471299

## 摘要

智能电网创建不断推进之时, 10kV开关柜变成配电系统的主要设备, 其运行可靠性直接影响到电网的安全, 传统监测方式无法在早期发现设备缺陷, 开关柜因设备老化、绝缘下降导致的发热, 以及全封闭式结构通风差、电缆沟潮气积聚引发的凝露, 均易造成绝缘降低、放电烧毁等故障, 10kV开关柜智能预警装置的开发和应用成为了解决方案。本文围绕这种装置分析安装必要性、应用价值、技术创新突破途径、性能验证方法, 希望保证装置应用的可靠性, 进一步提高装置的感知、诊断能力。科学的性能验证体系, 保障装置的可靠运行, 推动10kV开关柜智能化运维升级, 为电力行业的智能化转型提供帮助。

## 关键词

10kV开关柜; 智能预警装置; 技术创新; 性能验证

## 1 引言

随着现代化技术的不断涌现, 10kV开关柜的智能化发展是技术发展过程中的关键, 可以通过智能化系统的设计将原有开关柜设备上的VD4断路器改造为智能断路器, 通过对设备的可视化管理和健康管理实现对开关运行状态的动态监测, 可最大程度避免由于定期计划性停电、设备检修而造成的经济损失, 显著降低非预期停电的风险。实际运行中, 开关柜工作电流大、操作次数多、涉及负荷类型复杂, 受外部线路及设备故障影响概率高, 且与运维人员安全距离最小, 部分不满足IAC防护等级要求的开关柜还会直接危

及人员人身安全, 造成重大经济损失和社会影响。10kV开关柜智能预警装置属于实现智能化监测的主要部件, 可以对设备运行参数异常及时捕捉, 对绝缘劣化, 机械故障等缺陷做出早期警报。技术创新、性能保证能提升配电系统可靠性, 促进电力行业智能化转型, 是传统设备和智能运维衔接的技术支撑。

## 2 10kV 开关柜智能预警装置安装的必要性

### 2.1 强化设备运行安全防线

10kV开关柜运行环境复杂, 绝缘老化、接触不良等潜在缺陷很容易引发短路、爆炸等严重事故。其主要失效形式为放电烧毁, 核心诱因包括设备老化、设计缺陷导致的绝缘下降引发发热, 以及全封闭式结构通风差、电缆沟潮气积聚形成凝露导致的绝缘降低。智能预警装置对局部放电、温度

【作者简介】王景法(1982-), 男, 中国河南濮阳人, 本科, 高级工程师, 从事电力工程研究。

异常等主要风险参数实施持续监测,当出现缺陷的初始迹象时就会发出预警信号,为运维人员留出充分的处置时间。早期预警的能力使传统被动防护模式,由定期巡检变成了主动防护,有效规避设备完全烧毁、主变三侧跳闸甚至损毁的严重后果,同时满足 IAC 防护等级对人身安全的保障要求。将安全防护的关口前移,从源头上阻止事故的发生。装置非侵入式监测设计不会影响设备正常工作,在保证连续性的同时提高开关柜全生命周期安全保护。

## 2.2 优化运维管理效能

传统的 10kV 开关柜运维工作依靠人工巡检、定期检修,存在巡检时间固定、人工成本高、缺陷识别滞后等缺点,且传统预警装置功能单一,通常仅能监测温度或湿度等一两种参数,难以全面掌握设备状态,同时依赖有线通讯方式,安装维护不便、通讯距离有限,被动式预警响应滞后,还存在能源消耗高、难与其他系统集成的问题。智能预警装置依靠自动化数据采集和远程传输,达到运维数据的实时汇集与集中分析,运维人员可以依靠后台系统直观掌握多台设备的运行状况,准确定位出存在异常的设备,从而避免盲目巡检。采用以状态为基础的运维方式代替传统的计划性检修,不仅可以减少不必要的停电检修次数,还可以降低人工判断失误所带来的风险。装置存储的历史运行数据也能为运维策略的优化提供数据支持,从而形成个性化的、精准化的运维方案,提高整个运维管理的科学性、高效性。据测算,应用该类装置后,可帮助公司避免年均设备损坏事故,每台开关柜单次维修费用约 7000 元,每年可直接节省维修成本 14 万元。

## 3 10kV 开关柜智能预警装置技术创新突破路径

### 3.1 多模态传感融合感知技术

以前的预警装置通常是人工进行,容易受环境的影响而出错,创新路径是多模态传感融合技术,集成了特高频局部放电检测、超声波检测、红外测温等众多的传感模块,形成了一种多维感知体系。利用阵列式天线优化特高频信号的捕捉范围,将检测频段精准覆盖到 300MHz 到 1.5GHz,再结合灵敏度高达 50mV/Pa 的超声波传感器,实现对各种局部放电的精确定位,同时用测温精度为  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  的红外传感器实时监测触点温度的变化。在此基础上,再融合高精度温湿度传感器、热成像采集模块、电气数据采集模块,形成全方位感知体系,温湿度传感器实时监测柜内凝露风险,热成像模块精确检测温度分布并找出高温部位,电气数据采集模块用高精度传感器采集电压、电流、有功/无功功率等主要参数,给缺陷诊断赋予丰富数据支撑。

### 3.2 抗干扰信号处理技术升级

10kV 开关柜运行环境中存在很强的电磁干扰,传统信号处理技术不能有效地滤除干扰信号,技术创新从硬件和算法两方面入手,硬件上采取电磁屏蔽设计,用金属屏蔽罩和滤波电路减小外部电磁信号对传感模块的干扰,提升传感器

供电电路的稳定性。算法上用自适应小波阈值去噪技术,根据干扰信号的频率特性来动态调节阈值参数,准确滤除工频干扰、射频干扰等常见的干扰信号。对脉冲干扰信号,设计脉冲识别剔除算法,利用信号波形特征比对,区分有效信号与干扰信号。这种技术大大提高了信号处理的抗干扰性能,保证在复杂的电磁环境下的监测数据真实性,为后续边缘计算中的数据预处理(滤波、特征提取)奠定基础,减少无效数据传输量。

### 3.3 无线自组网传输架构创新

有线传输方式布线复杂,扩展性差,不能满足分布式开关柜的监测需求,采用 LoRa 扩频通信技术建立无线自组网传输架构,该技术在空旷环境下通信距离可达 1-3 公里,借助 Mesh 网络拓扑结构,单个节点可以作为中继站转发其他节点的数据,从而扩大监测的覆盖范围。为保证数据传输的稳定,运用自适应通信速率调节机制,根据节点距离、信号强度的变化将传输速率在 1.2kbps ~ 50kbps 之间动态调整,单个网关可以同时接入超过 100 个监测节点。设计断点续传的功能,在网络中断的时候可以保存数据,网络连接恢复以后完成数据补传。应用数据加密传输协议来保证监测数据传输过程的安全性。创新集成了 4G、5G 以及光纤等通信方式,并且根据不同的变电站的环境采用合适的技术手段;配备了无线充电模块和大容量蓄电池,以电磁场无物理接触的方式来传递能量;无需拆卸装置就可实现充电;有效解决了传统装置有线安装困难、维护工作量大、电能消耗大等一系列问题。这种架构突破了有线的物理限制,提高系统的部署灵活性及数据的传输可靠性。

### 3.4 智能诊断算法优化升级

诊断算法的准确度决定预警效果,创新途径是指机器学习算法的优化升级,建立包含不同缺陷种类、运行工况的样本库,用深度学习模型训练出可以自提取并分类缺陷特征的方法。为解决传统算法泛化能力不强的问题,在训练过程中使用迁移学习技术,将训练好的模型的知识迁移到新的监测场景中来,进而降低新场景下的样本需求。设计分级预警算法,按缺陷严重程度分预警等级,根据缺陷发展趋向为检修建议,为了提高算法的实时性,采用边缘计算的架构,在装置本地进行数据的预处理和初步诊断,只有重要的数据上传到云端,减少云端的计算任务。数据预警平台通过多源流式数据采集技术存储管理数据,利用 AI 驱动的数据分析与挖掘算法揭示潜在规律,通过实时计算引擎将数据与预警阈值进行模式匹配,生成预警消息并推送至消息中间件和数据库,算法优化使得缺陷诊断更加精确、及时,由原来的“监测”到现在的“诊断”。

### 3.5 模块化防护结构设计创新

开关柜内部空间狭小、环境差,对装置防护性能要求高,创新性地使用模块化的防护结构,将传感模块、处理模块、通信模块各成一体,再用标准接口相连,便于维修与更换。

外壳使用高强度环氧树脂材料,防水防尘防腐,防护等级为IP54或以上。对高温环境,设计高效的散热结构,利用散热片加自然通风的方式保证模块的运行温度稳定,低温时集成加热元件做温度补偿,保证模块在宽温域内正常工作。使用数据报表、可视化组件的形式将数据用图表、表格、智能报告等呈现给用户,进行实时监控,数据分析与决策建议。这种模块化防护设计冲破传统装置防护效能和保护便利性之间的抵触,改进装置在复杂环境下的顺应性和持久性。

## 4 10kV 开关柜智能预警装置性能验证方法

### 4.1 实验室绝缘性能模拟测试

绝缘性能是装置可靠运行的基础,用实验室模拟测试的方法来验证其绝缘耐受能力,参照GB/T11022-2021搭建测试平台,将装置放进绝缘试验舱里,模仿开关柜内部的电场环境。测试时,为装置施加1.1倍额定电压,持续1分钟,测量绝缘电阻值,不小于1000MΩ,然后做工频耐压试验,加42kV工频电压,保持1分钟,看是否击穿或闪络。在模拟绝缘老化情况的过程中,将环境温度在-20℃~75℃之间进行循环变化的高低温循环箱,每次循环结束后再次进行上述测试。在测试过程中要随时,监测装置的泄漏电流并记录绝缘性能变化的数据,此方法模仿极端绝缘工作状况,全方位考察装置的绝缘可靠性,重点验证装置在长期运行中绝缘性能下降引发发热故障的预警有效性,为户外和恶劣环境应用赋予数据支撑。

### 4.2 环境适应性综合验证

环境适应性影响装置运行的稳定性,用多环境模拟和现场测试相结合的方法来进行验证。在实验室中用高低温湿热试验箱模拟出不同的温湿度环境,温度范围为-20℃~75℃,湿度范围为30%~90%逐渐变化,装置在不同的环境条件下连续工作48h,数据采集精度及通信稳定性。重点模拟开关柜内凝露形成的高湿环境,验证温湿度传感器与凝露预警逻辑的可靠性。对装置做振动冲击试验,利用振动台按照不同的频率施加正弦振动来模拟设备在运输、运行过程中遇到的振动情况,从而检验装置结构完整性及性能稳定性。选择高温高湿的户外变电站、多粉尘的工业厂区等典型现场运行环境连续试运行三个月,收集装置在真实环境中实际使用的数据。通过实验室模拟、现场验证相结合,对装置适应各种环境的能力进行全方位的考察,保证装置在复杂环境下的可靠运行。

### 4.3 现场联动性能协同验证

装置要和配电自动化系统配合起来,依靠现场联动测

试来考察它的集成情况。选择有代表性的变电站作为测试场景,将预警装置接入现有的配电自动化系统(DAS),搭建起从监测、预警到处置的一条完整链条。模拟各种类型缺陷,比如母线绝缘老化、断路器接触不良等,并检测此装置能否准确捕捉到异常信号及是否可以迅速上传至DAS系统中。测试装置与智能断路器之间的联动响应,当装置发出严重缺陷预警的时候,验证DAS系统能否按照预警信息自动触发断路器分闸动作,记录从预警到操作的响应时间。组织运维人员按照装置预警信息来制订检修计划,检验预警信息对运维决策的支持程度。测试过程中对联动响应时间、信息传递准确度、操作可靠度等进行记录并加以评判,评价装置与现有系统相融合后的兼容性及协同工作的状况,从而保证装置融入到现有的运维体系当中并发挥出实际的作用。可以按不同的负荷时段分多轮次做测试,根据数据交叉比对来优化装置参数匹配度,并采集运维人员实操反馈继续改进预警阈值、联动逻辑,为未来与继电保护系统联动、接入状态检修决策支持系统、结合数字孪生技术奠定基础,保证装置在复杂电网环境下长时间正常发挥作用。

## 5 结语

总而言之,10kV开关柜智能预警装置技术创新及性能验证,是配电系统智能化升级的一股强大力量,也是满足智能电网对设备状态感知精准化、运维管理高效化的一种需要。多模态感知、抗干扰处理等技术创新途径,打破传统监测方式很多局限,使装置性能发生了飞跃。特别是多参数融合监测、无线化与低功耗设计、AI驱动的智能预警等创新点,有效解决了传统装置的诸多痛点,科学系统的性能验证方法从绝缘、环境、电磁兼容等各个方面保证装置正常工作,为技术的使用奠定基础。智能电网创建不断深入,预警装置会向着愈加精确的诊治水平、愈加广泛的兼容范围前进,为电力系统安全稳定运转带来技术支撑,促使能源行业数字化转型迈向更高台阶。

### 参考文献

- [1] 陈潇潇,张峰,宋鹏,等.基于光纤光栅技术的高压开关柜内接头温度智能监测方法[J].电气技术与经济,2025,(08):286-288.
- [2] 杜学锋,汤乐化,黄安来.基于物联网的开关柜运行状态实时监控软件开发[J].信息与电脑,2025,37(14):102-104.
- [3] 赵贺.物联网技术支持下电厂电气开关柜温度监测系统的构建[J].机电产品开发与创新,2024,37(05):172-174+177.
- [4] 曹俊磊,胡晓虎,李旭,等.变电站高压开关柜温度异常智能预警方法改进[J].煤化工,2023,51(02):121-125.