10kV高压开关柜智能监测系统设计及应用分析

肖智斌　丁　平
湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垭水电站　湖南　张家界　427221

摘　要：针对10kV高压开关柜易出现局部放电、温升异常等故障，传统运维模式滞后、效率偏低的问题，本文设计一套四层架构智能监测系统。系统融合多类传感器采集设备状态数据，依托异构传输网络与“规则+模型”双引擎实现故障精准预警。经现场测试，系统采集精度、响应速度均达标，运维效率提升67%。研究证实该系统可实现设备状态实时监测，助力配电网开关柜从计划检修向状态检修转型。

关键词：10kV高压开关柜；智能监测；系统设计；应用

引言：10kV高压开关柜是配电网核心供电设备，其运行稳定性直接决定电网供电可靠性。设备长期受电、热、机械应力作用，易引发绝缘老化、温升超标等故障，传统人工定期巡检存在滞后性、漏检率高、运维成本大等弊端。为解决传统运维短板，智能化监测成为电网设备运维升级的关键方向。本文基于开关柜故障机理，设计一体化智能监测系统，通过现场实测验证其性能优势，为配电网设备智能化运维提供技术参考。

1 10kV 高压开关柜监测原理与系统需求分析

1.1 高压开关柜核心故障类型与监测原理

（1）高压开关柜常见故障包括局部放电、温升异常、机械故障及绝缘老化。局部放电由电场畸变引发，产生高频脉冲；温升异常源于接触电阻增大或过负荷，表现为温度梯度变化；机械故障涉及操动机构卡涩、弹簧疲劳，反映在分合闸电流波形与行程特性上；绝缘老化受电、热、机械应力联合作用，导致介质损耗增大。（2）电气特性变化规律：局部放电伴随超高频（300MHz~3GHz）电磁波与超声波；温升异常体现为触臂、电缆接头温度持续攀升；机械故障可通过振动频谱与操作线圈电流包络线识别；绝缘老化表现为泄漏电流增加及介损角正切值上升[1]。（3）智能监测核心技术分三层：传感层采用无源无线传感器、超高频天线及超声波传感器拾取信号；传输层通过RS485、光纤或LoRa将模拟信号转换为数字量上传；诊断层运用阈值比对、趋势分析及深度学习算法实现状态评估与早期预警。

1.2 系统功能需求分析

（1）实时数据采集需覆盖触头及母线温度（精度±0.5℃）、局放幅值（检测灵敏度 ≤ 5pC）、三相电流/电压及开关分合闸位置状态，采样周期可灵活配置。（2）智能预警功能应具备多级报警机制（注意、异常、严重），结合历史趋势与同类设备比对进行故障类型识别与定位，诊断准确率不低于95%。（3）数据存储需支持至少三年历史归档，查询响应时间小于3秒，可视化展示包括一次接线图动态监测、趋势曲线及报表自动生成。（4）远程运维支持Web/APP访问，实现参数远程配置、自诊断状态上报及运维工单闭环管理。

1.3 系统性能需求分析

（1）温度采集精度不低于±0.5℃，局放检测灵敏度优于5pC，电流/电压测量误差 ≤ ±0.5%；数据刷新周期 ≤ 1min，报警响应延时 ≤ 10s。（2）系统应满足电磁兼容（EMC）四级标准，具备防浪涌、防振动能力，平均无故障时间（MTBF）≥ 50000h，在-25℃~+70℃及90%湿度环境下稳定运行。（3）硬件采用模块化设计，支持Modbus、IEC61850等多协议接入，预留扩展接口以适应未来增加视频、机械特性等监测维度的需求。

2 10kV 高压开关柜智能监测系统整体设计

2.1 系统总体架构设计

（1）系统采用自下而上的四层整体架构，依次为感知层、网络传输层、数据处理层和应用层。感知层负责多源信号采集与初步调理，网络传输层实现数据可靠上传与协议转换，数据处理层承担存储、计算与智能分析，应用层面向运维人员提供可视化交互与决策支持。四层之间采用标准化接口通信，确保数据流与控制流双向贯通。（2）各层级核心功能与协同工作机制如下：感知层通过分布式传感器阵列采集温度、局部放电、电气参量及机械振动与形变等多元状态信号，经边缘节点进行数据清洗与特征提取后推送至传输层；网络传输层依据数据类型动态分配通信通道，高频实时数据经5G或光纤上送，低频状态数据经LoRa或RS485汇聚；数据处理层利用时序数据库存储原始数据，结合规则引擎与AI模型进行状态评估与趋势预测；应用层将分析结果以图形化方式呈现，并提供预警推送与远程控制入口。各层

通过心跳机制与断线重连策略保障协同可靠性[2]。（3）系统整体运行流程设计如下：传感器以秒级周期采集数据，经边缘汇聚节点校验与压缩编码后，通过加密隧道上传至前置通信管理机；管理机完成协议解析与数据分包，分别写入实时数据库和历史数据库；数据分析引擎周期触发状态计算，当特征量超阈值时即时生成预警事件；应用服务将预警推送至Web端与移动端，运维人员确认后可下发巡检或控制指令，指令经反向通道下发至执行单元，完成闭环控制。

2.2 感知层硬件模块设计

（1）传感器选型兼顾性能与可靠性。无线测温传感器选用无源声表面波型，测温范围-40℃~+150℃，安装于触臂、母排及电缆接头处；局部放电传感器采用超高频天线与暂态地电压复合传感方案，贴装于电缆室及母线室柜壁；状态采集传感器包含霍尔效应电流互感器、微型电压互感器及行程开关，用于监测三相电流、电压及断路器分合闸位置。（2）硬件设备安装布局与适配性优化方案：无线测温传感器采用卡箍式安装紧贴一次导电回路，UHF天线安装于柜体观察窗内侧，TEV传感器磁吸固定于柜体金属外壁，两者间距大于0.5m以避免信号串扰。针对空间受限问题定制L型支架与扁平化天线，采用屏蔽罩与磁环抑制强电场干扰，确保最优信噪比。（3）数据采集终端硬件电路设计以STM32F407为主控芯片，集成多通道模拟前端，包含24位Σ-Δ型ADC、高速比较器及数字I/O。终端配备FRAM缓存、隔离RS485接口与光纤以太网口，电源采用宽压DC18~72V输入，整机功耗 ≤ 3W，工作温度-25℃~+70℃[3]。

2.3 网络传输模块设计

（1）通信方式采用分层异构方案：站内骨干采用光纤以太网连接终端与服务器；无光纤条件的存量站采用5G蜂窝网络，上行速率不低于50Mbps。柜内传感器与终端之间采用LoRa扩频通信（470MHz）传输无线信号，开关量与电气量走RS485有线总线，实现无线便捷与有线可靠的互补。（2）数据传输协议配置：站内遵循ModbusRTU/TCP协议，寄存器按设备类型统一编址；站端与主站遵循IEC60870-5-104规约，将温度、局放幅值、相位图谱等封装为ASDU报文。预警事件采用MQTT协议以JSON格式发布。制定扩展协议字段用于透传传感器自检状态与校准系数。（3）传输数据加密与抗干扰设计：无线信道采用AES-256加密，密钥动态生成并周期更新；5G公网部署IPSecVPN隧道。LoRa启用FEC编码与跳频扩频，RS485采用屏蔽双绞线并配置TVS管与气体放电管，确保误码率低于10^{-6}。

2.4 软件系统功能模块设计

（1）数据处理与分析模块基于时序数据库构建，支持Modbus、MQTT及104协议解析，对原始数据进行时间戳校准与异常值剔除。分析层提供特征工程工具箱，包括温度变化率计算、局放PRPD图谱相位分解、电气量谐波分析等，支撑多参量关联规则挖掘与趋势预测。（2）故障预警与智能诊断模块采用“规则+模型”双引擎架构。规则引擎内置国标阈值与专家规则库，实现快速越限报警；诊断引擎基于轻量级梯度提升树算法，融合温度趋势、局放发展速率、负荷电流等多维特征进行故障概率预测，输出四级健康状态，并提供图谱对比与案例库检索辅助功能[4]。（3）可视化监控与后台管理模块基于Web构建，核心功能包括一次接线图动态展示、多维度趋势曲线、局放相位图谱、报警事件实时列表及历史溯源。后台管理涵盖设备台账、校期提醒、日志审计及三级权限管控。（4）移动端远程监控模块基于跨平台框架开发，功能包括实时报警推送（微信订阅消息与短信双通道）、关键参数快捷查看及工单任务处理（拍照上传、位置签到、意见填报）。采用JWT令牌鉴权，通信全程HTTPS加密，满足外场远程掌控与应急响应需求。

3 10kV 高压开关柜智能监测系统应用测试与效果分析

3.1 系统测试环境与测试方案

（1）现场测试设备选定某水电站10kV开关室，以3面KYN28A-12型开关柜（额定电流1250A）为测试对象。每面柜布设无源、无线测温传感器9个（触臂、母排、电缆接头）、UHF与TEV复合局放传感器各1套及综合采集终端1台（特高频与暂态地电压测局放，综合终端采电气量及环境量，无机械状态传感），站端部署数据服务器与诊断平台，测试周期168小时连续运行。（2）功能测试方案包括：数据采集完整性验证（全部测点轮询上传）、预警触发检验（采用标准脉冲信号源注入模拟局放与升温信号考核报警响应）、远程控制指令执行测试。性能测试以1s/10s/60s三档采样率对比丢包率与延时变化。稳定性测试连续考核7天，记录异常中断与自动恢复情况。（3）构建三级评价指标体系：功能完备性（采集覆盖率 ≥ 98%、预警准确率 ≥ 95%）、性能达标率（报警延时 ≤ 10s、丢包率 ≤ 1%）、运行可靠性（MTBF ≥ 50000h），按实测值与目标值偏差综合评分。

3.2 系统功能测试结果分析

（1）多参数数据采集测试效果显示，168小时内全部33个测点数据覆盖率达99.2%，温度与局放信号同步上传无长时间中断。无线测温与有线采集交叉比对偏差在

±0.3℃以内，验证了多源数据采集的一致性。（2）故障识别与预警测试结果：系统对模拟局放信号灵敏度优于5pC，平均报警响应时间8.7s。温度缓变模拟中，系统在阈值到达前80s发出预警。测试期间共触发预警23次，经人工复核误报1次，报警准确率95.7%。（3）远程监控与数据管理验证分析确认，Web与移动端均可实时查看各测点数据，趋势曲线刷新延时 ≤ 2s。历史查询、报表导出及权限分级管控运行正常，安全审计日志记录完整，低权限账户无法执行参数修改操作[5]。

3.3 系统性能与实用性分析

（1）采集精度方面，温度最大偏差+0.6℃，局放检测线性度$R^2 = 0.993$，电气量误差在±0.3%以内。端到端数据显示平均延时3.2s，预警推送至移动端平均延时9.1s，满足现场实时性要求。（2）复杂工况稳定性分析表明，在开关分合闸强电磁干扰下系统无死机或数据错乱，通信链路偶发3次中断均在15s内自动恢复，数据传输成功率98.7%。7天连续运行内存占用稳定在62%~68%区间，无内存泄漏。（3）与传统运维对比，人工巡检每月一次，故障发现滞后约5~7天；本系统实现连续监测，早期预警提前量达48小时以上。单面柜年均运维工时由12人工时/年降至4人工时/年，效率提升约67%。

3.4 工程应用优势与现存问题优化

（1）系统在配电网运维中优势显著：实现从“计划检修”向“状态检修”转变，减少非必要停电；多参量融合诊断提高识别准确率；远程监控大幅减少现场巡检频次，尤其适用于偏远站点与无人值守变电站，降低了运维人员安全风险与劳动强度。（2）实际应用中仍存在不足：无线传感器在金属封闭柜体内信号穿墙衰减大，极端工况通信成功率降至92%；UHF传感器易受邻近设备空间电磁波干扰，导致局放图谱出现周期性噪声；诊断模型对未见过的复合故障类型判别准确率有待提升；传感器安装与标定需停电作业，影响投运效率。（3）针对性优化方案：增设中继转发节点增强柜内覆盖，目标通信成功率 ≥ 98%；引入自适应噪声对消算法抑制环境背景干扰；扩充故障样本库并采用生成对抗网络进行数据增强，提升模型对复合故障的泛化能力；研发带电安装工装与免停电标定流程，将部署停电时间控制在4小时以内，最大限度降低对正常供电的影响。

结束语

本文完成10kV高压开关柜智能监测系统的架构设计、硬件选型与软件开发，通过现场测试验证了系统的监测精度、稳定性与实用性。系统有效弥补传统运维缺陷，大幅提升开关柜故障预警能力与运维效率。同时梳理出设备通信干扰、复合故障识别不足等现存问题，并提出针对性优化方案。后续可深化算法优化与设备迭代，进一步提升系统适配性，为配电网安全稳定运行筑牢技术支撑。

参考文献

[1]孙道宇.矿用10kV高压开关柜智能监测系统设计及应用分析[J].煤矿机械,2024,45(08):162-165.

[2]高兴军,李子健,李永彬.高压开关柜设备状态的智能监测及诊断技术[J].中国设备工程,2025,27(10):201-203.

[3]陈蓉.高压开关柜绝缘故障在线监测与安全预警技术研究[J].产业创新研究,2025,32(14):132-134.

[4]林智炳,陈友恒,柯拥勤.基于脉冲电流法的高压开关柜绝缘诊断装置研制应用[J].无线互联科技,2025,22(01):72-75.

[5]王玉龙.基于无线控制方式的中置式开关柜状态监测系统研究[J].光源与照明,2024,37(02):204-206.