

基于物联网技术的配电自动化终端状态监测与智能运维

申 涛 刘铁磊 黎家成 张 庆

国网湖北省电力有限公司随州供电公司 湖北 随州 441300

摘 要：针对传统配电终端运维模式巡检低效、故障滞后、隐性故障难排查等问题，本文依托物联网技术搭建配电终端状态监测与智能运维系统。构建四层分层架构，融合多传感器数据融合、AI 状态评估、故障溯源预警等关键技术，建立全闭环智能运维体系。经工程试点验证，该系统可精准感知设备状态，大幅缩短运维响应时长、提升故障定位准确率，有效降低运维成本与停电次数，为配电网智能化运维升级提供可靠技术支持。

关键词：物联网技术；配电自动化；终端状态监测；智能运维

引言：配电自动化终端是配电网稳定运行的核心设备，其运维质量直接决定供电可靠性。传统定期巡检、被动抢修的运维模式，存在监测维度单一、数据实时性差、隐性故障漏检率高等弊端，难以适配现代配电网高效、安全的运行需求。为破解运维痛点，本文引入物联网、边缘计算与人工智能技术，开展配电终端状态精准监测与智能运维研究，搭建一体化运维体系，旨在实现设备状态全景感知、故障智能研判与运维闭环管控，推动配电网运维从传统人工模式向数字化、智能化转型。

1 基于物联网的配电终端监测运维系统总体架构

1.1 系统总体设计原则与目标

(1) 安全性、实时性、兼容性设计原则。系统遵循“安全为先、实时高效、兼容并蓄”的设计原则。安全性贯穿数据采集、传输与处理全链路，部署国密加密与接入认证机制；实时性保障配电终端状态数据毫秒级响应与预警；兼容性支持多厂商、多类型终端及异构通信协议的无缝接入。(2) 状态精准监测、故障智能研判、运维高效闭环的设计目标。系统目标实现配电终端运行状态的全景感知与精准监测，基于 AI 算法对异常数据进行智能研判与故障定位，并构建“监测-预警-派单-处置-反馈”运维闭环流程，全面提升配电网运维效率与供电可靠性。

1.2 系统分层架构设计

(1) 感知层：部署电压/电流、温湿度、局放等传感器，通过 Modbus、IEC61850 等协议采集电气量、非电气量及环境参数，支持多源异构数据融合与边缘预处理，保障采集全面性与准确性。(2) 网络层：采用 MQTT、CoAP、HTTP 等协议，结合 4G/5G、光纤、LoRa 等通信

方式，构建覆盖广、稳定性高的混合组网，实现数据安全上传与指令精准下发。(3) 平台层：采用“云端+边缘”协同架构，边缘侧负责实时处理与本地决策，云端承担海量存储、深度分析与模型训练，结合时序数据库与对象存储，支撑高效检索与智能算法调用。(4) 应用层：构建设备状态可视化监测、健康度评估、故障预警与智能派单等核心功能，提供大屏监控、移动端告警及运维辅助决策，形成多端协同的运维管理闭环^[1]。

1.3 核心硬件与软件配置方案

(1) 传感器、边缘网关等硬件选型与部署方案。传感器选用支持多参量输出的微型化智能传感器，具备自校准功能；边缘网关选用工业级 ARM 架构设备，支持多协议解析、数据清洗与边缘计算。硬件按间隔分段部署，关键节点双冗余配置，确保采集不中断。(2) 系统软件平台、通信协议与算法模块配置。系统软件基于微服务架构开发，部署容器化运行环境；通信协议层配置协议转换引擎，支持 Modbus/IEC61850 至 MQTT 的映射转换；算法模块集成孤立森林、CNN-LSTM 等故障诊断与寿命预测模型，实现智能研判与预警。

1.4 系统安全架构设计

(1) 数据采集与传输加密安全机制。采集端采用 SM2/SM4 国密算法对数据进行加密签名，传输链路基于 TLS1.3 或 DTLS 协议加密，关键参数采用动态密钥更新策略，有效防止数据窃听与篡改，保障数据机密性与完整性。(2) 设备接入与平台访问权限管控策略。系统实施设备指纹认证与一机一密接入机制，杜绝非法终端入侵；平台侧采用基于角色的权限管理模型 (RBAC)，划分运维、管理、审计等角色，结合多因素身份认证，

实现精细化权限控制与操作审计追溯。

2 基于物联网技术的配电自动化终端状态监测关键技术研究

2.1 配电终端多维度状态感知技术

(1) 终端电气参数、运行环境、设备工况数据采集。系统全面采集配电终端的三相电压/电流、功率因数、谐波畸变率等电气参数,同时获取环境温湿度、振动、局放等非电气量,并结合设备投运时长、开关动作次数、触头温度等工况参数,形成覆盖“电气-环境-工况”三维度的原始数据集,为状态评估提供完备数据基础。(2) 基于多传感器融合的全方位状态感知方法。采用多传感器协同部署策略,在关键节点冗余配置电压/电流互感器、红外测温、超声波局放检测等不同类型传感器,通过时间同步与空间坐标对齐实现数据级融合,构建终端运行状态的立体感知网络,消除单一传感器感知盲区,提升状态表征的完整性与可信度^[2]。(3) 终端隐性故障特征数据提取技术。针对早期绝缘老化、接触不良、元器件性能漂移等隐性故障,采用时频域联合分析与谐波特征提取方法,捕捉正常运行下难以觉察的微弱信号变化,通过小波包分解与能量谱熵计算,量化隐性故障的早期特征,为预警诊断提供关键判据。

2.2 多源监测数据预处理与融合技术

(1) 监测数据噪声滤波与异常值剔除方法。针对现场强电磁干扰与传感器漂移导致的噪声和离群点,采用自适应卡尔曼滤波与小波阈值去噪相结合的方法抑制噪声,并基于改进的格拉布斯准则与局部离群因子算法识别并剔除异常值,确保监测数据质量满足后续分析要求。(2) 基于边缘计算的本地数据预处理机制。在边缘网关部署轻量化预处理流程,包括数据校验、缺失值插补、滑动窗口平滑及特征初步提取,仅将压缩后的有效特征值上传云端,降低网络带宽压力和云端计算负担,同时实现毫秒级响应以满足实时性需求。(3) 多维度异构数据融合建模方法。针对电气量、非电气量及工况数据在时间尺度、物理量纲上的异构特性,构建基于自编码器的特征升维统一表征模型,引入注意力机制自适应分配各维度数据权重,生成标准化融合特征向量,为评估模型提供高质量输入^[3]。

2.3 终端运行状态评估模型构建

(1) 状态评估指标体系选取与权重确定。建立分层递阶的评估指标体系,包括电气性能、绝缘状态、机械特性、热状态及环境适应性等准则层,并采用层次分析法与熵权法组合赋权,兼顾主观经验与客观数据差异,

科学确定各指标的综合权重分配方案。(2) 基于机器学习的终端状态精准评估算法。采用梯度提升树与支持向量回归构建融合评估模型,利用历史标签数据进行监督训练,同时引入半监督学习机制挖掘未标注样本隐含信息,实现终端健康状态的高精度量化评分,评估准确率达到95%以上^[4]。(3) 终端健康状态分级判定标准建立。将评估分值划分为“优良、正常、注意、严重”四个健康等级,明确各级阈值边界及对应运维策略,结合运行年限与负荷率进行动态修正,形成可量化的分级判定标准,为运维决策提供清晰依据。

2.4 终端故障智能诊断与预警技术

(1) 常见故障类型特征库构建。系统梳理过流、过压、绝缘击穿、操作机构卡涩、电源失电等典型故障模式,提取各类故障的电气特征指纹与环境关联规则,建立覆盖故障现象、特征向量、触发条件的结构化特征库,并支持增量学习以持续丰富库内样本。(2) 故障精准定位与溯源诊断方法。基于故障树与贝叶斯网络构建推理模型,融合多源监测数据的时空关联信息,沿信号传播路径逆向回溯故障起始节点,实现故障区段精准定位与根因溯源,定位误差不超过两个配电节点,显著缩小现场排查范围。(3) 设备劣化趋势预测与提前预警机制。采用长短期记忆神经网络对关键状态量进行时序预测,结合指数平滑与自适应阈值动态识别劣化拐点,建立多级递进预警机制,在故障发生前提前发出黄、橙、红三级告警,为运维人员争取充足的预防性处置时间。

3 基于物联网技术的配电自动化终端智能运维体系设计与应用验证

3.1 智能运维总体体系与运行机制

(1) 基于物联网的“监测-分析-处置-反馈”闭环运维体系。构建以物联网为神经网络的闭环运维体系,感知层持续采集终端运行数据并上传,平台层通过AI引擎完成状态评估与故障研判,应用层自动生成运维工单并推送至执行端,现场处置结果通过移动终端回传至平台完成闭环验证,形成数据驱动的运维业务全流程贯通,实现从“被动抢修”向“主动运维”的模式转变。(2) 云端协同的分级运维管理机制。建立“省-市-县”三级运维管理架构,云端承担全局态势感知、跨区域资源调度与策略优化,边缘节点负责本地实时监控与简单故障自动处置。各级平台按权限分区管理,一般告警由属地自主处理,重大故障触发上级联动支援,确保运维响应层次分明、协同高效。

3.2 智能化运维策略优化设计

(1) 基于设备状态的差异化巡检策略。根据终端健康评估等级动态调整巡检频次与深度,对“严重”等级设备执行每日重点巡检,对“优良”等级设备延长巡检周期,并利用历史数据建立个性化基线,当状态量偏离基线时自动触发临时巡检任务,实现人力与资源的最优配置。(2) 故障自动处置与自愈控制策略。针对过流、过压等常见故障,在边缘侧部署自动处置规则引擎,直接下发分合闸指令完成故障隔离与负荷转供,自愈恢复时间控制在秒级以内。对于复杂故障,系统提供辅助决策方案供运维人员确认执行,兼顾自动化效率与操作安全性。(3) 终端全寿命周期运维管控策略。建立单一设备全生命周期档案,涵盖投运、运行、检修、退役各阶段的关键事件记录,基于累计运行时长、动作频次和劣化趋势预测剩余使用寿命,主动提示预防性维护窗口,避免超期服役或过早更换,延长设备平均寿命^[5]。

3.3 系统功能模块实现

(1) 实时状态监测与可视化展示模块。开发基于HTML5的Web组态监控界面,以配电拓扑图为底图,实时叠加终端健康评分、负荷率、通信状态等关键信息,支持多维度数据钻取与历史曲线回溯,提供大屏、PC、移动端多屏适配展示,满足不同场景监控需求。(2) 故障告警、工单派发与运维管控模块。构建告警分级引擎,将事件区分为一般、严重、紧急三级,自动关联故障定位信息与处理预案,通过移动应用实时推送告警通知并生成电子工单,支持GIS地图就近派单、处理进度跟踪与超时督办,实现运维作业全流程数字化管控。(3) 运维数据统计分析与报表生成模块。汇聚运维全链路数据,自动生成设备可靠性指标(可用率、故障率)、运维效能指标(平均响应时长、消缺完成率)等统计报表,支持月度/季度/年度周期报表自动推送,为运维绩效评估与策略调优提供定量依据。

3.4 工程应用与效果验证

(1) 试点应用场景与实验方案设计。选取某供电公司所辖城区10kV环网柜、柱上开关等共计50个配电终端作为试点对象,完整部署感知层传感器、边缘网关与云平台软件体系。设定为期6个月的连续运行验证期,系统记录设备故障发现及时率、故障定位准确率、运维响应时间等关键效能指标,并与投运前同期历史数据进

行横向对比,科学评估系统实际应用成效。(2) 监测精度、运维效率实测结果分析。实测数据显示,系统对电气参数量测误差不超过 $\pm 0.5\%$,温度测量误差不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$,状态评估综合准确率达到96.2%。运维平均响应时间由原45分钟缩短至12分钟,缩短幅度达73.3%;故障定位准确率由不足60%提升至91.7%;预警有效覆盖率超过85%,隐性故障平均提前发现时间延长至7天以上,各项指标均达到设计预期。(3) 与传统运维模式的应用效果对比分析。相较于传统“定期巡检+故障抢修”模式,本体系通过连续状态感知与智能研判,将隐性故障发现窗口平均提前一周以上,年度计划外停电次数减少约62%,运维现场出勤人力成本下降约35%,综合供电可靠率由99.92%提升至99.98%。充分验证了基于物联网的智能运维体系在提升运维效率、降低运营成本、保障供电可靠性方面的显著工程实用价值与推广意义。

结束语

本文完成了物联网配电终端监测运维系统的架构设计、关键技术与运维体系构建,通过试点工程证实了系统具备高精度监测、智能故障预警、高效运维管控的优势。系统有效弥补了传统运维模式的短板,显著提升配电网运维效率与供电可靠性。后续可持续优化智能算法模型,丰富故障特征样本库,拓展全场景适配能力,进一步推动物联网技术在电力运维领域的规模化落地与深度应用。

参考文献

- [1] 刘科研. 基于物联网感知的配电终端状态在线监测与智能运维技术[J]. 电网技术,2023,47(07):245-249.
- [2] 张勇,陈曦,周宇. 配电自动化终端全状态感知与精细化运维体系构建[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(05):98-105.
- [3] 王健,赵晨. 泛在电力物联网下配电终端故障特征识别与运维策略优化[J]. 电力自动化设备,2022,42(10):189-195.
- [4] 黄飞,林浩然. 配网智能终端状态监测物联网系统设计与工程应用[J]. 电工技术学报,2024,39(12):145-152.
- [5] 冯媛. 基于泛在电力物联网的配电自动化设备在线监测运维研究[J]. 移动信息,2025,46(01):304-306.