

基于多传感器的智能电力系统设计

胡清婕 张虎

国网天津市电力公司宝坻供电分公司

DOI:10.32629/acair.v3i4.17893

[摘要] 针对传统电力监控系统在实时响应、智能决策、安全防护方面的局限性,本文构建了一种基于多传感器融合的智能电力系统架构。系统将STM32F407作为边缘计算核心,集成温湿度、电流电压、红外入侵等传感信息,通过Modbus-RTU协议实现、PLC的高效协同控制,并利用4G通信模块,将结构化数据实时上传至云平台。实验验证表明,系统环境和设备状态识别准确率达98.6%,端到端响应时间低于5秒,网络传输延迟稳定控制在200ms以内,大幅度增强电力系统运行的安全性。

[关键词] 多传感器; 智能电力系统; 设计

中图分类号: TM727 文献标识码: A

Design of an Intelligent Power System Based on Multi-Sensor Technology

Qingjie Hu Hu Zhang

Baodi Power Supply Branch, State Grid Tianjin Electric Power Company

[Abstract] In response to the limitations of traditional power monitoring systems in real-time response, intelligent decision-making, and security protection, this paper constructs an intelligent power system architecture based on multi-sensor fusion. The system employs the STM32F407 as the edge computing core, integrates sensor data such as temperature, humidity, current, voltage, and infrared intrusion, and achieves efficient collaborative control through the Modbus-RTU protocol and PLC. Additionally, a 4G communication module is utilized to upload structured data to the cloud platform in real time. Experimental results demonstrate that the system achieves an accuracy rate of 98.6% in identifying environmental and equipment status, with an end-to-end response time of less than 5 seconds and a stable network transmission delay controlled within 200 ms, significantly enhancing the operational security of the power system.

[Key words] multi-sensor; intelligent power system; design

引言

智能电力系统设计已经成为现代能源体系演进的关键路径,其目标在于加强系统运行的可靠性、状态感知的全面性、决策控制的智能化水平。传统电力监控架构过于依赖单一传感节点获取运行参数,存在感知维度单一、抗干扰能力弱、数据冗余度低等缺陷,难以适应高比例可再生能源接入、负荷波动加剧带来的复杂运行工况。基于多源异构传感器融合的智能电力系统通过协同采集电压、电流、温度、局部放电、环境参量等多维数据,构建时空一致的状态感知层,结合卡尔曼滤波、D-S证据理论,将数据级和特征级进行融合,有效抑制单点测量误差,大幅度提高状态估计的准确性。该架构可支撑实时故障诊断、设备健康状态评估、寿命预测,为微电网协调控制与分布式能源优化调度提供高可信度数据基础。伴随边缘计算和深度神经网络在电力场景中的深度融合,系统将进一步具备对非线性、时变动态过程的在线建模、自适应调控能力,推动构建安全、高效、低碳的新

型电力系统。

1 系统总体设计

系统采用模块化架构设计,将多传感器融合作为核心,构建智能电力无人值守综合管控平台,主控单元基于STM32F407微控制器,通过RS485总线以1Hz轮询频率,实时采集烟雾、温湿度、SF6浓度、水浸、水位等环境参量,利用Modbus-RTU协议封装后,经过SIM7600CE 4G模块上传至云服务器,端到端网络延迟控制在200ms以内,有助于保障数据传输的实时性。人机交互层配置10.1英寸工业触控屏,实现本地可视化监控;远程访问采用B/S架构,支持Web、移动端多终端接入;安防模块融合门禁控制、视频运动侦测、智能分析算法,联动PLC逻辑控制器,执行设备自动启停。系统预留Modbus和LoRa通信接口,具有较强的兼容性,满足电力监控对高可靠性、强实时性、多层次安全防护的综合需求。

2 硬件设计

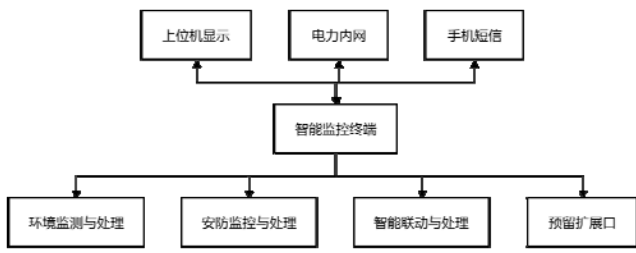


图1 系统总体设计

2.1 系统功能架构

系统功能架构划分为五个协同子系统, 构成闭环式智能监控体系。其中, 环境监测模块部署烟雾、温湿度、SF6浓度、水浸、电缆沟水位等多类型传感器, 全维度感知变配电所运行环境; 设备监控模块利用红外热成像、电流传感单元, 实时获取母线温度、电缆载流状态、开关设备机械特性参数, 有效支撑设备健康状态评估; 安防管理模块融合门禁状态反馈、视频结构化分析、PIR入侵检测, 建立物理安全纵深防御机制; 智能联动模块依据预设规则引擎驱动风机、除湿机、排水泵等执行机构动作, 实现环境异常的自主响应; 数据平台模块基于时序数据库、云端服务架构, 控制运行数据持久化存储、趋势回溯、多维可视化报表输出, 为预防性维护提供决策支撑。

2.2 多传感器融合监测与处理

2.2.1 环境监测子系统设计

环境监测子系统利用多样化传感器, 高精度感知变配电场所关键环境参量。烟雾监测采用SGP30数字气体传感器, 具备0~1000 μg/m³ PM2.5检测范围, 当浓度阈值超过50 μg/m³, 直接触发视频联动抓拍并推送告警信息。温湿度感知由SHT35高精度传感器承担, 相对湿度测量误差控制在±1.5%RH以内, 环境温度超过40℃或湿度逾85%时自动启停轴流风机, 异常状态持续30分钟则通过GSM模块发送短信预警。SF₆泄漏检测基于TGS832电化学传感单元, 覆盖0~2000 ppm量程, 浓度突破1000 ppm时系统在5秒内激活负压排风装置, 有效抑制六氟化硫积聚风险。水浸、水位监测分别采用FS-IR02电容式地面水浸传感器及HY-SRF05超声波电缆沟水位计, 水位超限即驱动5 m³/h排水泵运行, 物理防护电力设备, 有助于保障运行环境的稳定性。

2.2.2 设备运行监测子系统设计

设备运行监测子系统利用无线测温、电气参数采集, 精准感知关键节点状态, 在母排及电缆接头处布设基于ZigBee协议的DS18B20数字温度传感器, 测温范围覆盖-55~125℃, 精度达到±0.5℃, 采用10 s周期上传数据, 精准捕捉连接点升温趋势, 有效支撑早期热故障预警。同时, 负载状态监测利用ACS712霍尔电流传感器, 量程0~100 A, 结合0.2级精度电压采样模块, 实时计算有功功率、负载率, 动态评估设备运行应力水平。当负载率持续超过预设阈值, 系统依据预置逻辑自动执行分级降载策略, 有效限制设备长期过载运行风险, 延长电气元件使用寿命。该架构融合边缘感知、阈值驱动控制机制, 大幅度提高一次设备运行的可靠性。

2.2.3 安防联动系统设计

安防联动系统融合物理访问控制、智能视频分析, 构建纵深防御体系。智能门禁系统基于MFRC522 RFID读卡器, 高精度识别授权电子标签, 仅允许合法人员进入变电关键区域; 非法闯入会直接触发1920×1080分辨率高清抓拍摄像机和声光报警装置, 同步上传事件图像至云端, 全面保障事后溯源的有效性。视频分析模块设置轻量化YOLOv5目标检测模型, 实时分析监控区域行为, 精准识别攀爬围栏、异常滞留等高风险动作, 检测准确率达92%以上, 响应延迟低于800ms。系统通过门禁状态、入侵信号、视频流等数据对比分析, 实现事件驱动型联动响应, 形成身份认证一行为识别一告警处置的闭环安防逻辑, 有效提高复杂入侵场景的感知鲁棒性和处置时效性, 为无人值守电力设施提供高可信度物理安全保障。

3 软件设计

3.1 数据传输协议优化

在系统启动阶段, 主控制器先完成通用I/O端口初始化, 配置传感器接口、通信外设、中断优先级, 为后续多源数据采集和外设协同控制建立硬件基础。同时寄存器级配置LAN8720以太网物理层芯片, 包括PHY地址、双工模式、自协商参数, 有效提高链路层物理连接的稳定性。在此基础上, 系统加载轻量级LWIP(Lightweight IP)协议栈, 构建基于TCP/IP模型的网络通信框架, IP地址获取采用动态优先策略, 优先通过DHCP协议自动申请网络参数, 提高系统在异构网络环境中的部署灵活性; 如果DHCP请求超时, 则无缝切换至预设静态IP(192.168.1.100), 避免通信中断。TCP客户端建立后, 积极引入60秒周期性心跳包机制, 通过保活探测维持长连接状态, 有效应对无线网络抖动、临时链路闪断问题, 有助于保障数据通道的持续可用性(见图2)。

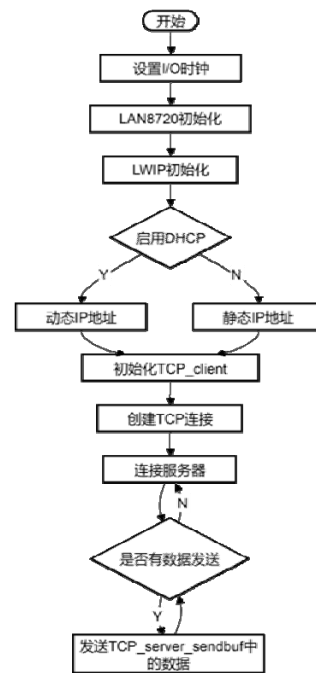


图2 4G数据传输流程图

数据帧结构设计则严格遵循工业通信可靠性原则,采用层次化字段布局,包含帧头(0x55AA)、设备唯一标识ID(4字节)、功能码(1字节)、数据长度(2字节)、数据域(变长)、16位CRC校验、帧尾(0xAA55)。设备ID被区分多节点数据来源,功能码标识操作类型,如读取、告警、配置等操作,数据域承载结构化传感信息,CRC校验基于多项式0x1021实现传输误码检测,校验失败帧将被丢弃并触发重传机制,该帧格式具有解析效率、容错能力,适配4G窄带传输环境下的低带宽、高延迟特性。此外,结合SIM7600CE模块的PPP拨号、AT指令控制流程,系统实现从边缘采集到云端上传的端到端可靠数据链路,为智能电力系统的实时监控提供高完整性通信支撑^[1]。

3.2 上位机软件架构

上位机软件采用Qt框架构建,严格遵循MVC分层架构,实现逻辑解耦、功能内聚等功能。数据层则采用MySQL关系型数据库,长期存储历史运行参数,有效保障数据完整性;积极引入Redis内存数据库,缓存高频更新的实时传感数据,通过键值对索引机制将查询响应时间压缩至毫秒级,大幅度提高系统吞吐能力^[2]。逻辑层基于Modbus-TCP协议,全面分析主控设备上传的原始报文,完成数据字段提取、工程量标定、异常值滤波,结合滑动窗口均值算法抑制瞬时干扰,输出高置信度监测结果。展示层集成ECharts可视化引擎,支持电压电流趋势曲线、设备温度热力图、环境参数仪表盘等多维动态图表渲染,直观呈现运行状态。数据导出模块封装POI、iText库,自动生成支持Excel表格和PDF文档,有利于满足运维报告、离线审计需求^[3]。

3.3 人机交互界面

人机交互界面采用分区域布局,集成环境参数、设备状态、视频预览等视图,促进监控信息高效呈现。告警事件通过弹窗叠加声光提示实现毫秒级推送,缩短运维响应时延;系统设置模块采用AES-256加密算法保障权限配置安全,阈值判定引入模糊逻辑机制,将“偏高—高一危急”三级语义化分级全面实施到温度等

关键量,有效提高复杂工况下的决策鲁棒性。无线测温界面采用电气拓扑结构,映射节点温度分布,对热力图和历史趋势进行联动分析,有利于支撑设备热故障的早期识别^[4]。

4 结语

本文构建了一套基于多传感器融合的智能电力系统,采用模块化架构集成环境感知、设备状态监测、安防联动功能,系统性打破了传统监控体系在实时性方面的技术限制。硬件层面利用STM32F407、多源传感网络,高精度采集相关数据,软件层面融合Modbus-RTU/TCP协议栈、轻量化网络通信、模糊阈值判定机制,人机交互层通过拓扑可视化和分级告警提升运维效率。实测表明,系统在温湿度、SF₆泄漏、母线过热、非法入侵等典型场景下响应延迟低于5秒,状态识别准确率超98%,进一步增强复杂电力环境下的自主处置能力。

[参考文献]

- [1]吴同帅,邱续程.基于多传感器融合的智能电力系统设计[J].电力设备管理,2025(13):131-133.
- [2]陈垚霖.智能化电力管理系统的设计与优化研究[J].消费电子,2025(13):218-220.
- [3]吕守国.输配电系统电力设计优化与智能电网技术应用研究[J].张江科技评论,2025(2):45-47.
- [4]王振刚.基于智能光缆的电力通信网络运维管理系统设计研究[J].科技资讯,2025,23(12):62-64.

作者简介:

胡清婕(1992--),女,汉族,内蒙古赤峰市人,单位:国网天津市电力公司宝坻供电分公司,大学本科,职称:中级,研究方向:电力系统。

张虎(1995--),男,汉族,河北省邢台市人,单位:国网天津市电力公司宝坻供电分公司,大学本科,职称:助理工程师,研究方向:电力系统。