

智能电网需求下电器成套设备故障诊断系统的开发与实践

邹青 程静泰

江西泰开成套电器有限公司, 江西 九江 332000

[摘要]伴随智能电网建设的高速推进, 电器成套设备作为电能输配网络的核心载体, 其运行的稳定性与可靠性对电网效能有着决定性影响, 针对设备运行环境复杂多变、故障模式多样化等难题, 文章研发出一套融合智能算法与传感技术的电器成套设备故障诊断系统, 该系统集成实时状态监测、大数据分析、故障精准识别及预警信息推送等功能, 有效推动设备管理向智能化升级, 实际应用数据显示, 该系统具备故障响应快速、诊断精准度高、运维成本低等特性, 适用于多种电网应用场景, 具备显著的推广应用潜力。

[关键词]智能电网; 电器成套设备; 故障诊断; 智能监测; 系统开发

DOI: 10.33142/ucp.v2i3.16723

中图分类号: U664

文献标识码: A

Development and Practice of Fault Diagnosis System for Electrical Equipment under the Demand of Smart Grid

ZOU Qing, CHENG Jingtai

Jiangxi Taikai Electric Appliance Co., Ltd., Jiujiang, Jiangxi, 332000, China

Abstract: With the rapid advancement of smart grid construction, complete sets of electrical equipment, as the core carrier of the power transmission and distribution network, have a decisive impact on the efficiency of the power grid in terms of their stability and reliability. In response to the complex and changing operating environment of the equipment, as well as the diversification of fault modes, this article has developed a fault diagnosis system for complete sets of electrical equipment that integrates intelligent algorithms and sensing technology. The system integrates real-time status monitoring, big data analysis, accurate fault identification, and early warning information push functions, effectively promoting the upgrading of equipment management to intelligence. The actual application data display shows that the system has the characteristics of fast fault response, high diagnostic accuracy, and low operation and maintenance costs, and is suitable for various power grid application scenarios. It has significant potential for promotion and application.

Keywords: smart grid; complete electrical equipment; fault diagnosis; intelligent monitoring; system development

引言

在智能电网加速发展的时代背景下, 电器成套设备的运行环境日趋复杂, 对其可靠性与稳定性的要求也不断攀升, 传统的故障检测手段以人工巡检与经验判断为主, 存在诊断时效性差、效率不足等弊端, 无法满足现代电网对设备智能化、实时化管理的迫切需求, 因此, 构建一套高效智能的电器成套设备故障诊断系统, 成为提升电网运行效率与可靠性的重要突破口, 本文将从系统架构设计、核心技术应用及实际运行成效等方面, 全面剖析该诊断系统在智能电网场景下的技术创新价值与实践应用意义。

1 系统设计架构与功能模块

1.1 架构整体设计思路

为满足智能电网环境下电器成套设备实时监测与故障诊断需求, 系统采用“分层分布、协同联动、智能响应”的设计原则, 构建包含感知层、传输层、平台层与应用层的四层架构体系, 感知层作为数据采集的基础单元, 由多种类型传感器及控制模块组成, 实时获取设备运行参数(电压、电流等)与环境变量(温度、湿度、局部放电信

号); 传输层以边缘计算节点与通信设备为核心, 依托CAN总线、Modbus协议及以太网等通信技术, 实现数据的实时上传, 并具备数据预处理与本地缓存功能; 平台层集成数据存储、分析建模与诊断算法模块, 结合规则引擎与机器学习技术, 联动历史故障数据库完成智能分析; 应用层则通过可视化界面、报警推送与远程维护接口, 助力运维人员高效掌握设备状态, 快速处置异常情况, 提升系统智能化管控水平。

1.2 数据采集与传感部署

故障诊断系统的精准运行, 依赖于关键参数的高效采集与传输, 系统感知层选用工业级高灵敏传感器, 确保在复杂电磁环境下具备强抗干扰性与长期稳定性。电流、电压信号采集采用霍尔传感器与互感器, 精度控制在 $\pm 0.5\%$ 以内, 可捕捉细微电气波动; 温湿度监测采用SHT35、DHT22等数字传感器, 凭借高响应速度与温度补偿特性, 实时反馈设备内部热环境变化; 针对局部放电等绝缘故障, 部署超声波与高频电流传感器, 实现介质击穿隐患的早期预警, 在部署方案上, 传感器按功能区域分布式布置, 重

点在断路器触头、母线连接点、电缆终端等易损部位增设冗余测点，提升数据采集全面性；同时通过 RS485 总线或 Wi-Fi 网络构建边缘采集终端，兼顾布线灵活性与运维便捷性。

1.3 控制与通信模块

为满足智能诊断对数据传输实时性、可靠性的严苛要求，系统控制与通信模块采用双链路冗余设计，在本地通信层面，选用 Modbus RTU 有线总线构建采集终端互联网络，以保障数据传输的稳定性；同时集成 LTE/5G 或 LoRa 无线通信模块，灵活适配远距离传输及移动场景部署需求，作为通信枢纽的边缘控制器，搭载多核处理器并运行 Linux 等嵌入式操作系统，凭借多线程并行处理能力与本地存储功能，实现数据高效缓存与快速运算；其内置的边缘推理算法可对异常数据即时响应，有效规避数据积压与传输延迟问题，通信模块通过部署多协议兼容网关（支持 MQTT、OPC UA 等协议），实现与上层平台的无缝对接，既提升了系统组件间的互操作性，也为平台功能扩展预留接口，此外，系统创新性引入设备状态心跳检测机制与智能断链重联技术，当遭遇恶劣环境干扰或网络突发波动时，可自动触发链路修复程序，确保数据传输链路持续畅通，上述设计方案不仅实现了数据从终端到平台的高效流转，更为后续智能故障诊断提供了坚实的数据传输保障。

2 故障诊断算法与实现技术

2.1 基于规则的专家系统构建

在系统故障初筛环节，构建基于专家知识体系的规则推理系统，是提升诊断效率与准确性的重要手段，该系统将行业专家积累的大量故障案例和诊断经验，转化为“IF-THEN”结构化逻辑规则，以过热故障诊断为例，当设备电流超出额定值 20%且温度骤升 10℃以上时，系统即刻判定为接触电阻异常引发的过热故障，针对过载、接地、短路、绝缘老化等典型故障，系统整合设备运行参数、环境变量等多维度数据，建立多条件协同判断机制，为增强规则管理与扩展能力，采用规则树数据结构进行组织，确保在复杂工况下仍能实现高效推理，实际运行测试显示，该系统可在毫秒级时间内完成数百条规则并行匹配，快速输出故障初步诊断结果与处置建议，如某次模拟测试中，系统接收到局部放电异常和温度异常信号后，通过关联 3 条规则，仅用 0.12s 即得出“潜在绝缘老化风险”的诊断结论。

2.2 机器学习辅助识别技术

鉴于电气设备故障模式的多样性与运行环境的复杂性，单纯依赖专家规则难以覆盖所有异常场景，为此，系统引入监督学习算法，基于历史运行数据开展故障模式训练与智能分类，支持向量机（SVM）和随机森林（Random Forest）作为核心算法，在故障识别精度与泛化能力上表现突出：SVM 通过构建最优超平面，擅长处理电压波动、

电流畸变等高维稀疏数据；随机森林则通过集成多个决策树投票机制，有效提升模型对噪声数据的抗干扰能力，在包含 30 种典型故障类型的数据集训练中，随机森林模型实现 94.6% 的识别准确率，较传统 KNN 算法提升 8.2%，模型训练过程中，系统重点提取谐波分布、温升曲线、电流波形突变等关键特征，并结合主成分分析（PCA）技术降维优化，在保证诊断精度的同时大幅提升训练效率。

2.3 多源数据融合策略

为实现故障识别的全面性与精准性，系统采用多源数据融合策略，整合电气量（电压、电流）、环境量（温度、湿度）、设备历史状态及运维记录等多类型异构数据，数据融合主要通过加权决策融合与深度特征融合两种模式实现：前者基于各数据源独立诊断结果，根据可信度赋予权重并进行综合判断，例如母线过载故障诊断中，温度传感器诊断结果因精度优势权重设为 0.6，电流诊断权重设为 0.4，通过加权平均提升结论可靠性；后者借助多模态神经网络，将不同维度数据编码为统一特征向量，经联合学习实现分类，适用于数据交叉影响复杂的场景，某 220kV 变电站应用数据显示，融合前诊断准确率为 88.3%，引入特征级融合后提升至 95.1%，误报率降低 27%，此外，系统通过数据质量评价机制剔除无效或失真数据，确保融合结果的可信度。

3 系统集成与应用实施

3.1 硬件平台集成设计

故障诊断系统的可靠运行依赖于高性能硬件平台的支撑，边缘计算节点采用 ARM Cortex-A 系列嵌入式处理器，凭借低功耗特性与高并发处理能力，结合灵活的 I/O 扩展接口，可在设备端完成多通道数据采集、滤波降噪、实时分析及本地诊断，有效分担上层平台的数据处理压力，将诊断响应时间缩短至毫秒级，边缘网关选用 NXP i.MX6 等工业级模块，集成 RS485、CAN 总线及以太网接口，支持 4G/5G 无线通信模组，既能实现传感器与上位机的近距离高效通信，又能满足分布式电网场景下长距离、低时延的数据传输需求，硬件系统配置独立电源冗余模块与 UPS 不间断电源，确保在市电中断或电压波动等异常情况下持续稳定运行，人机交互层面，采用 7~10 英寸工业级触摸屏，基于 Qt 框架或安卓系统开发定制化操作界面，以可视化图表、动态曲线等形式实时呈现设备运行状态、参数变化趋势、故障诊断结果及风险等级，为现场运维人员提供直观便捷的操作管理界面，显著提升人机交互效率与故障处置响应速度。

3.2 软件功能实现与界面展示

软件系统采用模块化设计，涵盖设备管理、实时监测、故障分析、预警推送及系统维护五大核心功能模块，Web 端基于 Vue.js 构建响应式前端界面，后端采用 Spring Boot 框架结合 MySQL 数据库，保障高并发场景下的稳定运行，

平台支持多终端访问与权限分级管理, 适配调度、运维、管理等多角色业务需求, 实现数据访问与操作权限的精细化控制, 诊断流程通过 SVG 矢量图形与 Echarts 可视化组件, 动态展示“数据采集—特征识别—故障判断—预警触发”全链路逻辑, 支持设备状态拓扑图与历史数据联动查询, 便于运维人员快速追溯故障源头, 预警模块集成短信、邮件、企业微信多通道推送机制, 可根据故障等级设置多级阈值, 并联动自动控制策略(如温度超限触发设备断电保护), 构建覆盖监测、诊断、处置的完整闭环, 切实保障电网设备运行安全。

3.3 部署测试与运行环境适应性

系统部署前通过多轮软硬件联调, 验证模块协同稳定性, 测试内容涵盖通信断链恢复、边缘计算响应速度、传感器容错能力及环境适应性等, 实测数据显示, 边缘节点规则推理平均响应时间为 0.15s, 数据上传延迟控制在 1s 内, 满足实时性要求, 系统在高温高湿变电站、粉尘工矿及沿海高盐雾等典型场景完成适应性验证, 核心硬件防护等级达 IP65 以上, 抗电磁干扰能力符合 IEC 61000-4 三级标准, 其中边缘网关的被动散热与抗震设计显著提升户外环境可靠性, 部署采用“云边协同+本地自治”架构, 支持远程配置、模型更新与软件升级, 有效降低运维成本。

4 实际应用效果与优化方向

4.1 应用于变电站的效果分析

该电器成套设备故障诊断系统在华东某 220kV 变电站完成部署, 覆盖变压器室、开关柜区及电缆夹层等核心区域, 系统投用初期即成功预警一起断路器过热故障: 当电流出现不规则波动 2.8s 后, 系统迅速捕捉到“接触电阻异常升高”信号, 并在 4s 内完成诊断与告警推送, 较传统人工巡检提前 30min 发现隐患, 避免了因故障蔓延可能导致的母线跳闸事故, 对比部署前后半年数据, 平均故障响应时间从 12.5min 缩短至 2.1min, 设备故障诊断准确率由 72.3% 提升至 93.8%, 尤其在多源数据融合与边缘推理技术协同作用下, 复杂复合型故障(如局部放电伴随湿度升高引发的绝缘劣化)识别率提升超 20%, 此外, 系统年均触发 12 次“轻微异常”预警, 成功防范 4 起潜在严重故障。

4.2 用户反馈与运行数据评估

运维班组的定期调研结果显示, 超 85% 的运维人员认可该系统“显著提升日常巡检效率与风险感知能力”, 尤其在夜间无人值守或高温高湿等恶劣工况下运行稳定, 平台数据接口记录表明, 设备告警平均响应时间控制在 1min 内, 误报率仅 3.6%, 显著优于同类系统约 8% 的行业平均水平, 系统累计接入 73 台电气设备, 月均处理诊断数据超 52 万条, 平台数据处理稳定率达 99.2%, 硬件

稳定性方面, 自部署以来核心设备无重大故障, 系统运行可用率达 99.7%, 在一次雷雨天气引发的瞬态过电压事件中, 系统快速捕获异常信号并触发远程报警, 维护人员及时响应处置, 确保设备未受损伤, 充分验证了系统在极端场景下的快速响应能力。

4.3 系统存在问题与未来优化

系统虽整体运行态势良好, 但在实际部署中仍显露出若干待改进之处, 就极端边界条件下的小概率故障而言, 如微弱电弧放电、瞬时电压跌落等, 现有算法模型的识别敏感度尚有不足, 易因特征模糊而将其归为“无异常”状态, 存在漏判隐患, 未来可探索引入深度学习模型与时序异常检测算法, 以强化对复杂波形的动态识别能力, 在多源数据融合环节, 部分传感器数据存在时序不一致及信号抖动问题, 对融合效果产生影响, 需进一步优化同步机制与信号滤波算法, 以提升融合诊断的稳定性与抗干扰性能, 用户反馈表明, 界面交互存在一定操作门槛, 部分参数界面专业性较强, 非专业人员难以快速掌握, 后续规划开发多语言、图形化引导界面, 并嵌入智能语音辅助系统, 以增强系统的人机友好性与适用范围。

5 结语

在智能电网加速演进的背景下, 电器成套设备的智能化运维成为保障电网稳定安全运行的核心环节, 本文研发的故障诊断系统通过分层架构设计, 有机融合专家规则推理与智能算法, 实现了设备运行状态的高效监测与故障精准诊断, 实际应用结果表明, 该系统在故障响应时效、识别准确率及用户体验等维度均表现卓越, 展现出良好的工程适用性与推广价值, 未来, 系统将聚焦数据融合精度提升、人机交互体验优化及算法智能化升级, 持续推动技术迭代, 为构建安全高效、智能可靠的电力运行体系提供更强有力的支撑。

[参考文献]

- [1]胡成芳.基于多智能体强化学习的智能电网分布式能源管理[D].江苏:东南大学,2023.
- [2]丁俐夫.基于多智能体强化学习的智能电网分布式能量管理研究[D].浙江:浙江大学,2023.
- [3]武志宏,杨子成,郭海旭,等.季节性负荷需求下智能电网电力交易体系研究[J].微型电脑应用,2022,38(6):79-81.
- [4]李嘉文.基于深度确定性策略梯度算法的智能发电协调控制技术[D].福建:华南理工大学,2022.
- [5]宗鸣镝.智能微电网中多源协同控制策略及其动态响应特性分析[J].电气技术与经济,2025(5):7-10.

作者简介: 邹青 (1991.10—), 单位名称: 江西泰开成套电器有限公司, 毕业学校和专业: 九江学院/机械设计制造及其自动化。