

变压器油色谱在线监测与故障预警系统开发实践

朱梁

海宁市金能电力实业有限公司 浙江嘉兴 314419

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19734

[摘要] 变压器油色谱在线监测与故障预警系统是保障电力设备安全运行的核心技术装备,通过实时采集变压器油中溶解气体组分数据,结合色谱分析与智能诊断算法,实现对设备内部过热、放电等潜伏性故障的早期识别与趋势预判。本文从系统开发的核心目标出发,阐述监测预警系统的整体架构设计,解析油气分离、色谱检测、数据处理与故障诊断等关键技术的开发要点,梳理系统开发的全流程实践路径,分析应用过程中的关键问题与优化策略,为同类系统的工程化开发与落地应用提供技术参考。

[关键词] 变压器; 油色谱在线监测; 故障预警; 系统开发; 智能诊断

引言

变压器油色谱在线监测与故障预警系统的开发,核心是实现从“离线抽检”到“在线感知”、从“故障后维修”到“状态前预警”的转型。该系统并非单纯的检测设备堆砌,而是通过多技术融合构建的智能化监测体系,其开发需兼顾检测精度、响应速度、稳定性与实用性,既要满足电力设备对监测数据的可靠性要求,又要适配复杂现场环境的运行需求。本文聚焦系统开发的实践逻辑,从架构设计、技术实现、流程管控到应用优化,全面解析开发过程中的核心要点与实践路径。

一、系统整体架构设计

(一) 架构设计原则

系统开发遵循模块化、兼容性、可扩展性与高可靠性原则。模块化设计确保各功能单元独立运行且便于维护升级,降低开发与后期运维难度;兼容性要求系统能够适配不同型号、容量的变压器设备,兼容现有电力监控平台的数据接口;可扩展性则支持后续功能升级与检测指标扩充;高可靠性通过冗余设计、抗干扰技术与环境适配方案,保障系统在复杂工况下的稳定运行。

(二) 核心架构组成

系统整体分为硬件层、软件层与应用层三个层级。硬件层作为数据采集核心,涵盖取样单元、油气分离单元、色谱检测单元与数据传输单元:取样单元通过专用取油阀门与管道,实现油样的连续、无污染采集,设计中需重点解决取样过程中的油液泄漏与杂质过滤问题;油气分离单元采用高效脱气技术,将油中溶解气体与油相分离,确保气体组分的完整提取;色谱检测单元通过色谱柱与检测器,完成气体组分的分离与浓度检测,是保障检测精度的核心硬件;数据传输单元采用有线与无线结合的方式,实现检测数据的实时上传,兼顾传输稳定性与部署灵活性。

软件层承担数据处理与智能诊断功能,包括数据预处理模块、色谱分析模块、故障诊断模块与预警推送模块:数据

预处理模块对采集到的原始数据进行滤波、降噪与校准,剔除干扰信号,确保数据可靠性;色谱分析模块通过峰识别与定性定量算法,确定气体组分种类与相对浓度,为故障诊断提供基础数据;故障诊断模块整合多种智能算法,实现故障类型识别与严重程度评估;预警推送模块根据诊断结果,通过多渠道向运维人员发送预警信息。

应用层面向用户提供可视化操作与管理界面,包括实时监测看板、历史数据查询、故障报告生成、系统配置管理等功能,实现监测数据的直观呈现与系统的便捷运维,适配不同层级用户的使用需求。

二、系统开发核心技术实现

(一) 油气分离技术开发

油气分离是油色谱监测的前置关键环节,其分离效率直接影响后续检测精度。系统开发中采用膜分离与真空脱气相结合的复合脱气技术,通过优化膜材料选型与脱气工艺参数,实现高效、快速的油气分离。膜材料选用透气性强、选择性高的高分子聚合物膜,能够在常温下实现溶解气体与变压器油的分离,避免高温脱气对气体组分的影响;真空脱气单元通过降低分离环境气压,加速气体分子扩散,提升脱气速率。

开发过程中重点解决脱气稳定性与重复性问题:通过设计密封式脱气腔体,减少外界环境对脱气过程的干扰;优化油样流速与膜接触面积,确保脱气效率的一致性;设置脱气单元自清洁功能,定期清除膜表面附着的油泥与杂质,避免膜污染导致的分离效率下降。同时,为适配在线监测的连续运行需求,脱气单元采用模块化设计,支持在线更换与维护,不影响系统整体运行。

(二) 色谱检测技术优化

色谱检测单元的开发核心是提升气体组分分离精度与检测灵敏度。系统选用填充柱与毛细管柱组合的双柱分离方案,填充柱用于初步分离氢气、甲烷等低沸点气体,毛细管柱用于精细分离乙烯、乙炔、二氧化碳等组分,通过双柱协同实现多组分气体的高效分离。检测器采用热导检测器(TCD)与

氢火焰离子化检测器 (FID) 组合配置, TCD 用于检测氢气等无机气体, FID 用于检测烃类有机气体, 兼顾不同类型气体的检测需求。

技术优化重点集中在检测稳定性与抗干扰能力: 通过优化色谱柱温度程序, 精准控制升温速率与恒温时间, 提升组分分离效果; 设计气体净化装置, 去除载气与样品中的杂质, 减少基线漂移; 采用信号放大与滤波技术, 增强微弱信号的识别能力, 降低外界电磁干扰对检测结果的影响。此外, 为实现快速检测, 通过算法优化缩短色谱分析周期, 在保证检测精度的前提下, 提升系统响应速度。

(三) 数据处理与智能诊断算法开发

数据处理模块的开发核心是实现原始数据的精准解析与噪声剔除。采用数字滤波算法去除检测信号中的高频噪声, 通过基线校正技术消除基线漂移带来的误差; 建立数据校准模型, 结合标准气体标定结果, 对检测数据进行定量修正, 确保数据准确性。针对在线监测中可能出现的数据缺失、异常波动等问题, 设计数据补充与异常判断算法, 通过相邻数据趋势分析与阈值判断, 识别异常数据并进行合理修正或标记。

智能诊断算法是故障预警的核心, 系统整合传统诊断方法与机器学习算法, 构建多维度诊断模型。基于 IEC 三比值法、大卫三角形法等传统方法, 建立基础故障诊断规则库, 实现常见故障类型的快速识别; 引入机器学习算法, 通过分析历史故障数据与对应的气体组分特征, 建立故障识别模型, 能够自动学习不同故障类型的气体组分变化规律, 提升复杂故障与早期潜伏性故障的诊断准确率。算法开发中采用模型融合策略, 结合不同算法的优势, 降低单一算法的误判率, 同时设计算法自更新机制, 通过持续纳入新的故障数据, 优化模型参数, 提升诊断算法的适应性与鲁棒性。

(四) 预警机制与传输技术实现

预警机制的开发需兼顾及时性与准确性, 避免误预警与漏预警。系统建立多级预警体系, 根据故障严重程度与发展趋势, 划分预警等级, 针对不同等级制定相应的预警策略: 低等级预警以提示性通知为主, 提醒运维人员关注设备状态变化; 中高等级预警通过短信、APP 推送、现场声光报警等多渠道同步通知, 确保运维人员快速响应。同时, 设计预警阈值动态调整功能, 能够根据变压器运行年限、负荷情况等实际工况, 自适应调整预警阈值, 提升预警机制的灵活性与适配性。

数据传输技术开发重点保障数据传输的实时性与安全性。采用工业以太网与无线通信 (4G/5G、LoRa) 相结合的传输方式, 工业以太网用于固定监测点的高速数据传输, 无线通信用于偏远地区或移动监测场景的数据传输; 通过数据加密技术对传输数据进行加密处理, 防止数据被窃取或篡改;

设计数据重传机制, 针对传输过程中丢失的数据, 自动发起重传请求, 确保数据完整性。此外, 系统支持与电力系统现有 SCADA、EMS 等平台的数据对接, 通过标准化数据接口实现数据共享, 避免信息孤岛。

三、系统开发全流程实践路径

(一) 需求分析与方案设计阶段

开发初期进行全面的需求调研, 明确系统的应用场景、监测指标、性能要求与接口规范。调研对象涵盖电力运维单位、设备制造企业、行业技术专家等, 梳理不同用户对系统检测精度、响应速度、操作便捷性、维护成本等方面的需求; 结合行业标准与技术规范, 确定系统需监测的气体组分种类、预警响应时间、数据传输延迟等关键性能指标。基于需求分析结果, 制定系统整体技术方案, 明确硬件选型、软件架构、算法模型等核心内容, 完成详细设计图纸与技术文档编制, 为后续开发工作提供依据。

(二) 硬件开发与集成阶段

硬件开发遵循模块化设计思路, 分单元进行部件选型、电路设计与原型制作。针对取样单元、油气分离单元、色谱检测单元等核心硬件, 开展关键部件选型试验, 对比不同供应商产品的性能参数与稳定性, 选择适配系统需求的硬件部件; 进行电路设计与 PCB 制作, 优化电路布局, 提升硬件系统的抗干扰能力; 制作硬件原型后, 进行单单元性能测试, 验证各单元的功能实现与性能指标是否满足设计要求。

硬件集成阶段将各功能单元进行组装与联调, 重点测试单元间的协同工作能力与接口兼容性。搭建硬件测试平台, 模拟现场运行环境, 测试系统在不同温度、湿度、电磁干扰条件下的运行稳定性; 进行油样循环测试, 验证取样、脱气、检测全流程的连续性与可靠性; 针对集成过程中出现的接口不兼容、性能不达标等问题, 及时进行调整与优化, 确保硬件系统整体性能满足设计要求。

(三) 软件开发与调试阶段

软件开发采用模块化编程思想, 按功能模块分阶段进行代码编写与测试。基于选定的开发平台与编程语言, 完成数据预处理、色谱分析、故障诊断、预警推送等核心模块的代码开发; 建立数据库系统, 设计合理的数据存储结构, 实现监测数据、故障记录、系统配置等数据的高效存储与查询。

调试阶段分为单元测试、集成测试与系统测试。单元测试针对单个软件模块进行功能验证, 确保各模块独立运行正常; 集成测试重点测试模块间的数据交互与逻辑衔接, 验证软件系统的整体功能实现; 系统测试模拟现场运行场景, 全面测试软件系统的性能指标, 包括数据处理速度、诊断准确率、预警响应时间等, 同时测试系统的稳定性与兼容性。针对调试过程中发现的漏洞与问题, 及时进行代码优化与修复, 确保软件系统稳定可靠运行。

(四) 系统联调与现场试验阶段

系统联调阶段将硬件系统与软件系统进行整合, 进行全系统功能与性能测试。搭建模拟试验平台, 模拟变压器运行状态, 注入标准气体样品, 测试系统的检测精度、响应速度、故障诊断准确率等关键指标; 测试预警机制的有效性, 验证不同故障类型与预警等级的匹配度; 进行长时间连续运行测试, 评估系统的稳定性与耐久性。

现场试验阶段选择典型变电站的变压器设备进行实地安装与运行测试。按照安装规范完成系统部署, 确保取样管路连接可靠、检测设备安装牢固、数据传输正常; 在变压器正常运行与模拟故障工况下, 采集监测数据, 验证系统在实际运行环境中的适应性与可靠性; 收集运维人员的使用反馈, 针对系统操作便捷性、数据可视化效果、预警及时性等方面的问题, 进行针对性优化。

(五) 系统优化与定型阶段

基于现场试验结果与用户反馈, 对系统进行全面优化。硬件方面, 针对现场运行中暴露的稳定性、抗干扰能力等问题, 优化硬件结构与部件选型; 软件方面, 调整算法参数, 提升故障诊断准确率与数据处理效率, 优化用户界面设计, 提升操作便捷性。优化完成后, 进行二次测试与验证, 确保系统性能达到设计标准。最后, 完成系统技术文档编制、产品定型与产业化准备工作, 形成可批量生产与推广应用的成熟产品。

四、系统应用关键问题与优化策略

(一) 现场环境适应性问题的优化

电力设备运行现场环境复杂, 温度、湿度、电磁干扰、振动等因素均可能影响系统运行稳定性。针对这一问题, 优化硬件防护设计, 采用防水、防尘、防电磁干扰的外壳结构, 提升设备的环境适应能力; 选用工业级部件, 确保设备在宽温度范围与恶劣工况下正常运行; 优化安装方案, 采用减震装置减少振动对检测设备的影响, 合理布置信号线缆与电源线缆, 降低电磁干扰。

(二) 检测精度稳定性问题的优化

长期运行过程中, 设备老化、部件损耗、油样污染等因素可能导致检测精度下降。系统设计中引入定期自校准功能, 通过内置标准气体或自动接入标准气源, 定期对检测单元进行校准, 修正检测误差; 优化油气分离单元的维护机制, 定期清洁或更换脱气膜与过滤部件, 避免污染导致的分离效率下降; 建立检测数据趋势分析模型, 通过对比历史数据与实时数据, 识别检测精度变化趋势, 及时提醒运维人员进行设备维护与校准。

(三) 故障诊断准确率问题的优化

复杂故障与早期潜伏性故障的诊断难度较大, 容易出现误判或漏判。优化智能诊断算法, 增加故障特征参数维度, 丰富故障样本库, 提升算法对复杂故障的识别能力; 建立故障诊断专家系统, 整合行业专家经验, 为故障诊断提供辅助决策支持; 设计诊断结果验证机制, 通过结合变压器油质分析、局部放电检测等其他监测手段的结果, 交叉验证故障诊断结论, 降低误判率。

(四) 系统运维便捷性问题的优化

现场运维条件有限, 系统需具备便捷的运维特性。优化系统模块化设计, 实现核心部件的快速更换与维护; 开发远程运维功能, 支持运维人员通过网络远程访问系统, 进行数据查询、参数配置、故障诊断与软件升级, 减少现场运维工作量; 设计系统状态自监测功能, 实时监测设备运行状态, 自动识别硬件故障与软件异常, 生成运维提示信息, 指导运维人员高效开展维护工作。

五、结论

变压器油色谱在线监测与故障预警系统的开发是多学科技术融合的工程实践, 其核心在于通过硬件与软件的协同优化, 实现变压器潜伏性故障的早期识别与精准预警。系统开发遵循模块化、高可靠性、实用性的设计原则, 通过油气分离、色谱检测、智能诊断等核心技术的突破, 构建了“采集 - 分析 - 诊断 - 预警”的全流程监测体系。开发过程中严格遵循需求分析、硬件开发、软件开发、系统联调、现场试验、优化定型的全流程实践路径, 确保系统性能满足电力设备安全运行的实际需求。

尽管系统开发过程中面临现场环境适应性、检测精度稳定性、故障诊断准确率等诸多挑战, 但通过针对性的技术优化与流程管控, 这些问题得到了有效解决。实际应用表明, 该系统能够实时、准确监测变压器油中溶解气体组分变化, 快速识别过热、放电等故障类型, 为电力设备运维提供科学依据, 有效降低设备故障发生率与运维成本。未来, 随着传感器技术、人工智能、通信技术的持续发展, 变压器油色谱在线监测与故障预警系统将向更高精度、更智能化、更便捷化的方向演进, 通过融入数字孪生、边缘计算等新技术, 进一步提升系统的故障诊断能力与运行可靠性, 为电力系统的安全稳定运行提供更有力的技术支撑。

[参考文献]

- [1] 三元混合绝缘油热裂解过程与产气特性[J]. 徐晴, 郝建; 叶文郁; 高晨煜; 张静文; 廖瑞金. 高电压技术, 2023 (03)
- [2] 加速度基线漂移时域处理方法的对比研究[J]. 缪惠全. 地震工程与工程振动, 2022 (02)