

Research on power transformer condition monitoring technology based on multi-sensor fusion

Shibo Guo

Baotou Power Supply Company, Baotou, Inner Mongolia, 014030, China

Abstract

As the core component of power grids, the operational status of power transformers directly impacts power supply reliability and safety. Traditional monitoring methods relying on single-sensor approaches (such as partial discharge detection or temperature measurement) suffer from issues like incomplete data coverage and weak anti-interference capabilities, making it difficult to comprehensively reflect equipment health. With the advancement of smart grid development, higher demands are placed on real-time performance, accuracy, and comprehensiveness in transformer condition monitoring. Multi-sensor fusion technology integrates electrical, acoustic, temperature, and vibration data from heterogeneous sources, effectively overcoming the limitations of single-sensor systems while enhancing fault diagnosis reliability and early warning capabilities. This paper first elaborates on multi-sensor fusion technology fundamentals, then analyzes sensor selection and deployment strategies for power transformers. Subsequently, it provides comprehensive explanations of multi-sensor data fusion and processing techniques, culminating in a practical design framework for condition monitoring systems. The study aims to offer valuable insights and references for related research.

Keywords

Multi-sensor fusion; Power transformers; Condition monitoring technology

基于多传感器融合的电力变压器状态监测技术研究

郭世波

包头供电公司, 中国·内蒙古 包头市 014030

摘 要

电力变压器作为电网的核心设备, 其运行状态直接影响供电可靠性与安全性。传统监测方法依赖单一传感器(如局部放电检测或温度测量), 存在信息片面、抗干扰能力弱等问题, 难以全面反映设备健康状态。随着智能电网发展, 对变压器状态监测的实时性、准确性和全面性提出更高要求。多传感器融合技术通过整合电气、声学、温度、振动等多源异构数据, 能够弥补单一传感器的局限性, 提升故障诊断的可靠性和早期预警能力。本文先是具体阐述了多传感器融合技术的相关内容, 随后具体分析如何选型与部署电力变压器状态监测传感器, 紧接着从多方面具体阐述了多传感器数据融合与处理技术, 最后具体提出了状态监测系统设计与实现, 以期对相关研究提供有益思考与借鉴。

关键词

多传感器融合; 电力变压器; 状态监测技术

1 引言

电力变压器是电网能量转换与传输的核心, 其故障可能导致大面积停电、电网崩溃, 带来重大经济损失。统计显示, 约 40% 的故障源于绝缘老化, 25% 由机械缺陷造成。传统依赖局部放电测试、油色谱分析等单一参数的监测方法, 难以全面反映设备健康状态。多传感器融合技术整合电气、温度、振动等多维度数据, 能挖掘参数关联性, 提升故障诊断的准确性与实时性, 对保障电网安全意义重大。不过, 当前研究多聚焦传感器技术改进或单一融合算法优化, 存在

部署成本高、数据同步难、冗余设计不足等问题, 使部分故障场景监测失效。因此, 本文研究低成本、高可靠性的多传感器融合监测技术, 着力解决关键问题, 开发适用变电站环境的系统并验证其有效性。

2 多传感器融合技术基础

2.1 多传感器融合原理

多传感器融合技术通过综合分析不同类型传感器的数据, 提取更全面准确的信息以支持决策。其核心原理在于利用多源数据的冗余性(同一参数由多传感器独立测量)和互补性(不同参数反映设备不同状态特征), 从而弥补单一传感器的局限性。根据融合阶段, 该技术可分为三个层次: 数据层融合直接对原始数据(如多温度传感器信号平均)融合, 保留细节但对同步和预处理要求高; 特征层融合先提取特征

【作者简介】郭世波(1984-), 男, 中国山西汾阳人, 本科, 工程师, 从事电气工程及自动化研究。

(如时域峰值、频谱)再关联分析,兼顾效率与完整性,常用于故障识别;决策层融合由各传感器独立判断后综合决策(如局部放电是否超标),灵活性高但可能丢失原始信息。

2.2 常用融合方法概述

多传感器融合方法需依数据类型与需求灵活选择:加权平均法通过赋予传感器数据权重后求和,计算简单且实时性强,适用于温度等数据层融合,但依赖权重分配合理性且难处理非线性关系;卡尔曼滤波基于动态模型递推估计最优状态,能抑制噪声并预测时变信号(如振动加速度)未来状态,但需精确建模且对非线性突变信号适应性差;D-S 证据理论通过构建基本概率分配函数表达不确定性,支持多源证据组合推理,适用于故障类型判断等决策层融合,可处理冲突证据,但计算复杂度随传感器数量激增,且需人工设定规则^[1]。

2.3 电力变压器监测中的关键问题

电力变压器监测中,多传感器融合面临多重挑战:首先是传感器异构性,其涉及电气、声学、机械、热学等多类型传感器,量纲、采样频率及动态范围差异大,需通过数据归一化(如 Min-Max 标准化)和采样率对齐(如插值法)处理;其次是数据同步与时间对齐,多传感器数据需严格同步,否则故障特征会错位,常用硬件同步(如 GPS 授时)精度高但成本高,软件同步(如时间戳插值校正)则更经济;最后是噪声干扰与数据清洗,复杂运行环境下传感器数据易受电磁、机械振动及温度漂移影响,需采用滤波算法、阈值检测及统计方法(如 3σ 原则剔除离群点)进行清洗,以保障融合输入的可靠性。

3 电力变压器状态监测传感器选型与部署

3.1 变压器状态参数分析

电力变压器状态监测需聚焦核心参数以全面把控运行风险:电气量(电压、电流)作为负载与系统稳定性的基础指标,其异常波动可预警过载或短路;局部放电作为绝缘劣化的早期信号,其强度与频次直接反映绝缘老化程度;温度是过热故障的关键表征,绕组、铁芯及油温异常升高会加速绝缘材料老化;振动信号能揭示机械结构完整性,绕组或铁芯夹件松动等故障会改变振动频谱特征^[2];油中溶解气体(如 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2)是内部故障的特征产物,通过分析气体组分及浓度可精准诊断故障类型。例如, H_2 和 CH_4 含量升高通常对应低温过热,而 C_2H_2 的出现则可能指示电弧放电或高温过热,为故障定位与处置提供关键依据。

3.2 传感器类型与特性

针对电力变压器不同监测参数,需精准选配适配的传感器类型:电气传感器中,电流互感器(CT)与电压互感器(PT)是测量电气量的核心设备,CT 通过电磁感应将大电流按比例转换为小电流,PT 则将高电压降为低电压,二者均需满足 0.2 级精度及 $50Hz \pm 0.1Hz$ 频响要求,以确保电

气参数测量准确性;声学传感器采用超声波技术,通过捕捉局部放电产生的 20kHz 以上高频声波实现非侵入式监测,其 -70dBmV 灵敏度与 20-200kHz 频带宽度直接影响故障检测灵敏度;温度传感器方面,光纤测温利用拉曼散射效应实现分布式测量,可覆盖绕组、铁芯等关键部位,空间分辨率达 1m,而红外测温虽能快速获取表面温度,但易受环境反射干扰;振动传感器选用加速度计,通过测量 $\pm 50g$ 量程内的三向振动加速度监测绕组变形,其 0.5-10kHz 频响范围需覆盖变压器振动主频;气体传感器中,光声光谱(PAS)通过检测气体吸收光能后的声波信号实现多组分定量分析,检测限低至 ppb 级,气相色谱(GC)则通过色谱柱分离气体后经 TCD 或 FID 检测,适用于实验室级精确分析。

3.3 传感器部署方案

电力变压器传感器部署需兼顾覆盖性与经济性:空间布局上,高压套管作为绝缘薄弱环节,需部署超声波传感器监测局部放电,并安装光纤测温传感器跟踪表面温度;铁芯作为振动和温度核心源,需在夹件处配置三向加速度计与光纤测温探头;绕组作为故障高发区,需在每相上下端部部署振动传感器,并在中性点等热点位置加装光纤测温传感器;油枕和气体继电器处则需部署气体传感器,实时监测油中溶解气体浓度^[3]。协同监测方面,振动与温度联合分析可提升机械故障诊断精度,如绕组松动会同时引发 100Hz 振动分量增大和温度异常升高;局部放电与气体监测结合可实现故障溯源,电弧放电会同时导致 C_2H_2 浓度激增和超声波信号强度突增。此外,需通过 GPS 授时等机制建立时间同步,确保多传感器数据的时间关联性。

4 多传感器数据融合与处理技术

4.1 数据预处理

多传感器数据需经预处理以提升融合质量:噪声滤波环节,针对振动、超声波等信号的高频噪声,采用小波变换分解重构可保留故障特征频段(如绕组松动的 100Hz 分量),而对温度、气体浓度等缓变信号,滑动平均滤波通过窗口均值替代可抑制环境干扰;数据归一化与标准化阶段,因传感器量纲差异显著(如振动单位为 g、气体浓度为 ppm),需通过 Min-Max 归一化将数据映射至 [0,1] 区间,或采用 Z-score 标准化使数据均值为 0、方差为 1,以消除量纲影响;异常值检测与修正方面,基于 3σ 原则可识别统计异常(如油温超均值 3 倍标准差),阈值规则可判定物理异常(如局部放电强度 $>100pC$),修正时采用中位数填充或相邻数据插入,避免对后续融合分析产生偏离。

4.2 数据融合实现

数据融合策略依据数据抽象层级可分为数据层、特征层与决策层:数据层融合直接对原始数据操作,通过加权平均或卡尔曼滤波处理同质传感器数据,如光纤测温与红外测温按信噪比加权,可提升温度监测的抗干扰能力;特征层融

合则提取各传感器时域/频域特征进行联合分析,例如振动频谱能量与局部放电 PRPD 图谱的融合,能同步捕捉机械故障与绝缘劣化特征,而油中气体浓度与温度变化率的联合建模可有效区分低温过热与电弧放电类型;决策层融合基于规则或专家系统整合多传感器诊断结果,如振动分析判定绕组松动概率 80%、气体分析判定高温过热概率 70%,通过故障树分析 (FTA) 结合两者逻辑关系,最终输出“绕组松动导致高温过热”的复合诊断,显著提升故障结论的可靠性。

4.3 实时性与可靠性保障

融合系统需兼顾实时响应与容错能力以适应变压器复杂运行环境:数据传输方面,采用 Modbus TCP 协议可实现传感器与边缘网关的毫秒级通信(延迟 <100ms),或通过 IEC 61850 标准构建变电站自动化系统,利用 GOOSE 报文快速传输局部放电突增等关键故障信号;边缘计算层面,在本地部署 TinyML 等轻量级神经网络,可独立完成振动频谱分析与气体浓度阈值判断,结合哈希算法压缩数据以降低带宽需求,从而减少云端依赖^[4];可靠性保障上,在绕组等关键部位部署双振动传感器,主传感器故障时自动切换备用设备,同时采用 ARIMA 模型预测缺失值或回填历史数据,补偿传感器短期失效导致的数据断层,确保融合分析的连续性与诊断结论的可靠性。

5 状态监测系统设计与实现

5.1 系统总体架构

系统采用“硬件-通信-软件”三层架构构建数据全流程闭环:硬件层由多类型传感器网络与数据采集模块组成,其中超声波传感器监测局部放电、光纤测温传感器跟踪绕组热点、振动加速度计捕捉机械故障特征、气体传感器分析油中溶解气体浓度,数据采集模块通过高精度 ADC 芯片实现模数转换,并集成抗混叠滤波电路保障信号质量;通信层支持有线(RS485、光纤以太网)与无线(LoRa、5G)传输协议,有线通信依托 IEC 61850 标准实现变电站内高可靠传输,无线通信覆盖偏远设备场景,并通过时间敏感网络(TSN)确保多传感器数据同步精度 <1 μs;软件层包含数据处理、融合算法与用户界面三大核心,数据处理模块采用小波阈值去噪、Min-Max 标准化及 3σ 原则修正异常值,融合算法模块通过数据层/特征层/决策层多级策略综合分析多源数据,用户界面则以可视化看板直观展示健康指数评分、故障概率及维护建议,形成从数据采集到决策支持的完整闭环。

5.2 关键功能模块

系统围绕数据全生命周期管理构建关键功能模块,保障监测实时性与决策科学性:数据采集与同步模块采用 GPS 授时与 PTP 协议协同工作,有效解决多传感器时钟漂移问题,

确保振动信号与局部放电信号严格时间对齐,为机械故障与绝缘劣化的关联分析提供精准时序支撑;多源数据融合分析模块通过特征层融合提取时域、频域及时频域特征,结合 SVM 或 LSTM 模型进行故障分类,使诊断准确率较单一传感器提升超 30%;状态评估与预警模块基于阈值比较与趋势分析双重机制,叠加健康指数模型综合评估,实现故障早期预警,提前期达数小时至数天;可视化与决策支持模块开发交互式数字孪生平台,实时映射变压器物理状态,并运用 FTA 与 BN 推理故障根因,生成针对性维护策略,助力运维人员快速决策。

5.3 实验验证与案例分析

系统通过模拟实验与实际案例双维度验证其有效性与鲁棒性:实验平台搭建变压器综合测试台,模拟绕组短路、铁芯多点接地等典型故障,集成振动台、局部放电发生器及温度控制箱,覆盖全工况监测场景;对比实验显示,在相同故障下,单一传感器故障识别率仅 65%,而多传感器融合后提升至 92%,误报率从 18% 降至 5%,充分证明融合策略对监测可靠性的显著提升;实际案例中,某 220kV 变电站变压器通过振动频谱分析与气体传感器数据融合,提前 72 小时预警“绕组松动引发电弧放电”,运维人员及时处理后避免非计划停运,验证了系统在工程应用中的实用价值与故障预测能力。

6 结语

综上所述,本文围绕电力变压器状态监测需求,对多传感器融合技术进行了全面且系统的研究。在深入剖析相关原理、方法以及变压器监测关键问题的基础上,完成了传感器选型与部署设计,提出了针对性的数据处理技术,并成功开发出“硬件-通信-软件”三层架构的监测系统。经实验与实际案例验证,该系统相较于单一传感器监测优势明显,故障识别率大幅提高,误报率显著降低,还能提前预警故障,有效避免非计划停运,切实提升了监测的实时性、准确性与全面性,为电网安全运行筑牢了支撑。展望未来,可从优化部署、探索算法、增强系统能力等方面发力,推动监测技术更上一层楼。

参考文献

- [1] 周明旺.干式变压器在线监测与故障诊断系统研究[J].电力设备管理,2025,(06):164-166.
- [2] 王毛,李雨轩,郑城市,等.电力变压器的在线状态监测技术分析[J].集成电路应用,2023,40(05):206-207.
- [3] 范蓓,崔波.电力设备状态监测技术的研究现状及发展[J].中国新通信,2021,23(19):70-71.
- [4] 金娜.电力变压器运行状态监测系统研究与设计[D].江苏大学,2019.