

Comprehensive Evaluation and Diagnosis Method of Multi-dimensional Online Monitoring of Main Transformer Insulation State in Substation

Weiwei Du De Yu

State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde Power Supply Company, Chengde, Hebei, 067000, China

Abstract

In the context of smart grid development, the main transformer in substations serves as a core component of power systems, where its insulation status directly impacts grid safety and stability. Traditional insulation testing methods, relying on offline tests and periodic maintenance, suffer from low timeliness and high costs. Recent advancements in IoT and sensor technologies have enabled the widespread adoption of multi-dimensional online monitoring systems, which can collect real-time electrical, chemical, and mechanical parameters to provide massive data for insulation assessment. However, existing methods predominantly focus on single-parameter analysis, lacking multi-source data integration and comprehensive diagnostic capabilities, making it challenging to achieve early fault detection and precise localization. To address this, this paper investigates integrated assessment and diagnostic methods for main transformer insulation, systematically outlining multi-dimensional monitoring technologies, data fusion preprocessing approaches, comprehensive insulation status evaluation methods, and fault diagnosis with decision support systems, offering valuable references for related research.

Keywords

Insulation status of main transformer in substation; Multi-dimensional online monitoring; Comprehensive evaluation; Diagnostic methods

变电站主变绝缘状态多维度在线监测综合评估与诊断方法

杜伟伟 于德

国网冀北电力有限公司承德供电公司, 中国·河北承德 067000

摘要

智能电网发展背景下, 变电站主变压器作为电力系统核心设备, 其绝缘状态关乎电网安全稳定运行。传统绝缘检测采用离线试验与周期性维护模式, 存在时效性差、成本高的问题。近年物联网与传感技术支持的多维度在线监测系统普及, 能实时采集电气、化学、机械等特征参数, 为绝缘评估提供海量数据, 但现有方法多聚焦单一指标分析, 缺乏多源数据融合与综合诊断能力, 难以实现故障早期预警和精准定位。为此, 本文研究主变绝缘综合评估与诊断方法, 依次阐述多维度监测技术、数据融合预处理方法、绝缘状态综合评估方法及故障诊断与决策支持方法, 为相关研究提供参考。

关键词

变电站主变绝缘状态; 多维度在线监测; 综合评估; 诊断方法

1 引言

变电站主变压器是电力传输的枢纽设备, 其绝缘故障占设备总故障的 60% 以上, 可能导致大面积停电甚至电网崩溃。传统绝缘检测依赖定期停电试验, 不仅影响供电可靠性, 且难以发现早期潜伏性缺陷。随着传感器技术与物联网的发展, 在线监测技术可实时获取设备运行状态, 但现有研究多集中于单一参数(如局部放电或溶解气体)分析, 忽视了多物理场耦合作用对绝缘劣化的影响。此外, 异构数据融合不足、诊断逻辑依赖人工经验等问题, 限制了在线监测系

统的智能化水平。本文针对上述问题, 提出一种多维度在线监测数据融合与综合诊断方法, 旨在实现主变绝缘状态的精准评估与故障的早期预警, 为智能运维提供技术支撑。

2 主变绝缘状态多维度监测技术

2.1 电气特征量监测

电气参数是反映绝缘系统电性能变化、诊断故障的核心依据。其中, 局部放电(PD)在线监测可捕捉绝缘劣化早期征兆: 超声波法通过油箱壁传感器检测 20-200kHz 机械振动信号, 抗电磁干扰强但灵敏度受限, 多用于定位放电区域; 特高频法(UHF)接收 300MHz-3GHz 高频电磁波, 灵敏度高且定位精准, 广泛用于 GIS 及大型变压器监测, 但需克服信号衰减与噪声干扰^[1]。介质损耗因数($\tan \delta$)

【作者简介】杜伟伟(1988—), 女, 中国河南南阳人, 本科, 副高级工程师, 从事超高压输变电设备运行维护研究。

与电容值监测可量化绝缘能量损耗及结构变化—— $\tan \delta$ 增大反映受潮或老化，电容异常可能由绕组变形或绝缘破损导致，在线监测通过高压电容分压器实现工频/低频实时跟踪。此外，泄漏电流监测通过穿心式传感器捕捉瞬态脉冲，可有效识别绝缘受潮或污秽，为绝缘状态评估提供多维数据支撑。

2.2 化学特征量监测

化学特征量监测通过捕捉绝缘材料劣化的直接表现，为评估绝缘寿命与故障类型提供关键依据。溶解气体分析（DGA）在线监测利用气相色谱或光声光谱技术，实时检测变压器油分解产生的 H_2 、 CO 、 C_2H_2 等特征气体（检测限达 ppm 级），其中 H_2 与 CH_4 反映低温过热， C_2H_2 指示电火花放电或高温过热， CO/CO_2 则揭示固体绝缘老化。微水含量监测通过库仑法（电解水测电流）或高分子薄膜传感器，连续跟踪油中水分（通常 $< 35 \text{ ppm}$ ），防止因水分超标导致介质损耗显著增大。糠醛含量监测作为绝缘纸老化的特异性指标，通过高效液相色谱定期检测油样中糠醛浓度（注意值 0.1 mg/L ），其与纸板聚合度的负相关性为评估剩余寿命提供量化依据。

2.3 机械与物理特征量监测

机械与物理特征量监测通过追踪振动、温度及油压等参数，可间接评估绝缘系统完整性。变压器运行时，绕组在电磁力作用下产生振动，其频谱变化能揭示结构异常：若出现 2 倍频、3 倍频等非工频分量，表明绕组可能变形；振动能量集中于 100Hz 以下低频段，则可能为铁芯松动所致，监测系统通过油箱壁布置的加速度传感器，结合小波变换或经验模态分解提取故障特征。绕组热点温度是决定变压器负载能力与寿命的关键参数，光纤测温技术利用荧光或拉曼散射原理直接测量最热点温度，具有抗电磁干扰、响应快等优势，测温范围 $-40^\circ\text{C} \sim +300^\circ\text{C}$ ，精度达 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。此外，油压异常可能由内部故障或冷却系统堵塞引发，油位下降则可能因漏油或呼吸器故障导致，系统通过压力变送器与液位传感器实时监测，结合阈值报警与趋势分析，预防绝缘油劣化及设备损坏。

2.4 声纹和红外测温监测

绝缘状态与变压器运行中的声纹特征、温度分布紧密相关，声纹和红外测温监测能为其评估提供关键信息。声纹监测方面，变压器运行中内部作用力产生不同声音信号，高灵敏度声学传感器布置在油箱表面采集声音，经预处理和先进算法处理，提取频率、幅值等特征参数。不同故障有特定声纹，如局部放电有高频脉冲声，建立对应关系数据库比对分析，可判断绝缘故障类型与程度，实现早期预警。红外测温监测中，变压器运行产生热量，绝缘故障会致局部过热、温度分布异常。红外测温设备可无接触测温生成热像图，分析能发现热点，判断故障，结合历史数据趋势分析可预测故障发展，保障变压器安全运行。

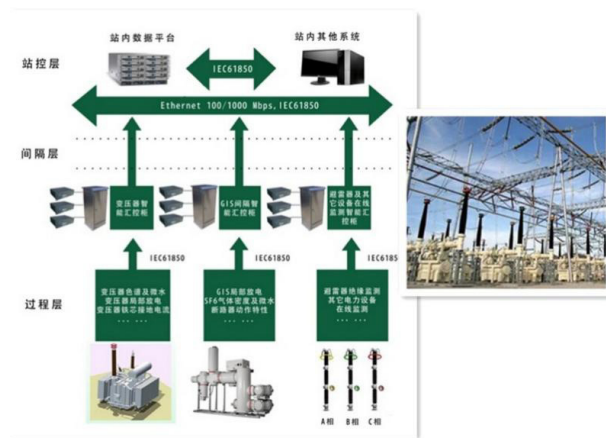


图 1 变电站智能监测系统图

3 多维度监测数据融合与预处理

在设备状态监测与故障诊断领域，多维度监测数据融合与预处理是后续分析和诊断得以高质量开展的关键前提，下面从三方面展开论述。其一，数据来源与类型分析。设备监测会收集电气、化学、机械等异构数据，它们来自不同传感器，采集时空有差异，需用时间戳同步和空间坐标映射进行时空对齐，为融合分析奠定基础。同时，不同数据对采样频率和同步性要求不同，电气信号变化快需高频采样，化学数据变化慢采样频率低，机械数据依情况确定，融合时要通过插值或降采样实现同步^[2]。其二，数据清洗与异常值处理。数据可能缺失，可用插值、均值替代或回归模型填补；数据还有噪声，小波变换和滑动平均法可有效去噪。其三，数据标准化与归一化。多维度数据差异大，Min - Max 标准化可将其变换到指定区间，熵权法能客观确定权重，提高分析准确性与可靠性。

4 主变绝缘状态综合评估方法

4.1 评估指标体系构建

主变绝缘状态评估指标体系构建至关重要。指标选取遵循代表性、独立性与可量化性原则，代表性如局部放电特征量反映绝缘早期劣化；独立性要求合理筛选关联指标，避免信息重复；可量化性如振动信号参数可精确测量，为评估提供量化依据。同时，构建分层指标体系利于系统全面评估，分健康状态层与特征参量层。健康状态层是顶层宏观描述，涵盖不同等级；特征参量层为底层，细分为电气、化学、机械物理、环境与运行工况等子类，各子类指标从不同角度反映绝缘状态，共同支撑健康状态层评估。

4.2 综合评估方法

主变绝缘综合评估方法多样。改进层次分析法先建层次结构模型，确定各层次指标相对重要性构建判断矩阵，经一致性检验调整后计算指标权重，为评价提供基础。模糊综合评价法针对主变绝缘受多因素影响、存在大量不确定性信

息的情况,利用模糊数学理论,先确定评价因素集与评语集,再通过隶属度函数构建模糊关系矩阵,结合改进层次分析法确定的权重进行模糊合成运算,有效处理模糊性与不确定性。灰色关联分析法可分析多参数关联的复杂系统中各特征参量间的关联性,挖掘内在联系,提供全面信息。证据理论(D-S理论)能融合多源异构数据,充分发挥不同数据源优势,提高评估的准确性与可靠性,共同助力主变绝缘状态精准评估。

4.3 状态分级标准

为直观呈现主变绝缘状态,将其划分为良好、注意、异常、严重四个等级。良好意味着绝缘性能佳,无明显劣化,可正常运作;注意是绝缘有轻微异常,需加强监测;异常表明劣化加剧,可能影响安全运行,要及时检修;严重则是绝缘严重受损,随时可能故障,需立即停运检修。而绝缘状态分级阈值的设定,要综合考量行业标准与历史数据统计。行业标准具权威性与指导性,历史数据统计能结合设备自身特点,分析特征参量分布规律确定个性化阈值,二者结合使阈值设定更科学合理,提升状态分级与评估的准确性。

5 绝缘故障诊断与决策支持

5.1 故障特征模式识别

绝缘故障诊断中,故障特征模式识别常用基于规则的专家系统,像国际广泛应用的 IEC 60599 三比值法,它通过计算油中不同气体组分比值,依特定编码规则和故障对应关系判断变压器绝缘故障类型。但传统方法编码组合有限,复杂故障难准确判断,故需改进,如增加编码组合、引入更多气体特征参数,结合专家经验与实际案例优化编码规则。此外,构建典型故障案例库也很关键,以局部放电为例,收集相关试验数据和故障案例,提取特征参数绘制模式图谱,分类存储形成案例库,诊断时比对实时信号与图谱,依相似度判断故障类型,为诊断提供直观准确依据。

5.2 故障诊断流程

在绝缘故障诊断流程里,先开展单维度异常预警与多维度关联验证。要对电气、化学、机械物理以及环境与运行工况等众多监测维度进行监测,一旦某维度参数超正常范围,系统便发出单维度异常预警信号^[1]。但此信号可能误判,所以需多维度关联验证,通过分析不同维度参数关联性,判断多个异常是否源于同一故障,如局部放电异常且油中乙炔含量升高,可初步判断电弧放电故障。完成多维度关联验证

后,要定位故障类型,常见有绕组故障、绝缘老化、受潮等。绕组故障可通过电气参数和振动信号判断;绝缘老化可依据化学和电气参数变化识别;受潮故障可测量绝缘电阻、吸收比并结合环境湿度判断。综合多维度数据与故障特征识别结果,能准确确定故障类型,为维修决策提供依据。

5.3 维修决策支持

确定故障类型后,需开展维修决策支持工作。首先是风险评估与剩余寿命预测,风险评估要考量故障严重程度、发生概率及对设备运行的影响等因素,借助分析历史与实时监测数据建立评估模型,对不同故障风险量化评估。剩余寿命预测采用趋势分析法,分析绝缘性能参数随时间的变化趋势来建立预测模型,比如依据油中溶解气体产气速率和含量增长趋势,结合变压器运行年限与检修情况,预测绝缘系统剩余寿命,为维修决策提供科学依据。接着根据评估与预测结果制定检修策略,风险高、剩余寿命短的故障立即检修^[4];风险适中、剩余寿命长的安排计划检修;风险低、剩余寿命长的监测运行。同时制定策略时,还要综合考虑设备运行重要性、检修成本、停电损失等因素,确保变压器安全可靠运行。

6 结语

本文针对变电站主变绝缘状态监测与诊断难题,提出一套多维度在线监测综合评估与诊断方法。该方法通过阐述电气、化学等多维度监测技术,全面感知主变绝缘状态;利用多维度数据融合与预处理,提升数据质量与分析效率;基于构建的评估指标体系和综合评估方法,精准分级评估绝缘状态;借助故障特征模式识别与诊断流程,实现故障早期预警与精准定位;结合风险评估与剩余寿命预测,为维修决策提供科学依据。展望未来,随着物联网、大数据和人工智能技术发展,主变绝缘监测诊断将更智能自动,可探索深度学习算法应用,加强跨领域合作,推动智能电网高质量发展。

参考文献

- [1] 彭潇,胡泽民.主变10kV侧绝缘损坏造成跳闸的分析与处理[J].农村电气化,2025,(12):41-44.
- [2] 邓雄耀.变电站保护监控系统架构多维度评估研究[D].华北电力大学(北京),2024.
- [3] 李培,李颖,郭良峰,等.一起110 kV变电站主变压器绝缘故障分析[J].山东电力高等专科学校学报,2023,26(06):34-37.
- [4] 金佳杰.电力变压器多维度检测与状态评估技术研究及应用[D].杭州电子科技大学,2021.