

Analysis method of dissolved gas in switching transformer oil

Jiaheng Shi¹ Kun Shen² Qi Sun² Xiangcheng Cai² Chaofeng Xu³

1. State Grid Henan Electric Power Company, Ultra High Voltage Company, Henan, Zhengzhou, 450000, China

2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Ultra High Voltage Company, Xining, Qinghai, 810000, China

3. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd. Hydropower Branch, Changsha, Hunan, 410004, China

Abstract

As a core component in ultra-high voltage (UHV) direct current (DC) transmission systems, converter transformers exhibit distinct degradation characteristics in their oil-paper insulation systems under complex electric, magnetic, and thermal field interactions compared to conventional transformers. While dissolved gas analysis serves as a critical technique for assessing insulation status, its application in converter transformers faces unique operational challenges including DC biasing, high-order harmonics, and complex electrothermal stresses on valve-side components. This paper systematically reviews the measurement accuracy and applicable boundaries of conventional analytical techniques such as gas chromatography and photoacoustic spectroscopy. It provides an in-depth analysis of how special operating conditions affect gas evolution characteristics in converter transformers, with particular focus on innovative applications of cutting-edge technologies including quantum dot sensors, knowledge graph construction, deep learning prediction, and digital twin simulation in fault diagnosis. The study offers theoretical support and technical pathways for condition assessment and early warning systems in converter transformers.

Keywords

converter transformer; dissolved gas analysis; gas chromatography; DC biasing; fault diagnosis; deep learning

换流变压器油中溶解气体分析方法

石嘉恒¹ 沈坤² 孙琦² 蔡祥成² 许超锋³

1. 国网河南省电力公司超高压公司, 中国·河南 郑州 450000

2. 国网青海省电力公司超高压公司, 中国·青海 西宁 810000

3. 国网湖南省电力有限公司水电分公司, 中国·湖南 长沙 410004

摘要

换流变压器作为特高压直流输电系统的核心装备, 其内部油纸绝缘系统在复杂电场、磁场和热场耦合作用下的劣化特征与常规变压器存在显著差异。油中溶解气体分析作为评估绝缘状态的关键技术手段, 在换流变压器应用中面临着直流偏磁、高次谐波、阀侧复杂电热应力等特殊工况的挑战。本文系统梳理了气相色谱法、光声光谱法等常规分析技术的测量精度与适用边界, 深入剖析了换流变压器特殊运行工况对气体析出特性的影响机理, 重点探讨了量子点传感器、知识图谱构建、深度学习预测、数字孪生仿真等前沿技术在故障诊断中的创新应用, 为换流变压器状态评估与预警提供理论支撑和技术路径。

关键词

换流变压器; 溶解气体分析; 气相色谱法; 直流偏磁; 故障诊断; 深度学习

1 引言

特高压直流输电技术的发展对换流变压器可靠性提出更高要求。该设备长期承受交直流复合电压、强制冷却、频繁负荷波动等复杂工况, 其绝缘劣化机制远比常规变压器复杂。油中溶解气体分析通过检测氢气、甲烷、乙烯、乙炔等特征气体的含量和比值, 能有效识别热分解、局部放电、电弧放电等潜伏性故障。然而直流偏磁导致铁心饱和和加剧, 阀侧绕组脉动电压峰值达网侧额定值 1.5 倍且含大量谐波, 强

制油循环引发油流带电现象, 这些特殊因素使换流变压器产气特征呈现不同规律, 传统诊断标准常出现误判和漏判。

2 换流变压器油中溶解气体常规分析技术与判定基准

2.1 气相色谱法的基准地位与测量不确定度分析

气相色谱法凭借高灵敏度占据油中溶解气体分析基准地位, 氢气等烃类气体检出限可达 1 μ L/L。测量准确性受脱气效率、色谱柱性能和检测器稳定性影响, 正常浓度范围内相对扩展不确定度约 10%~15%, 低浓度气体不确定度可达 25% 以上, 在三比值法计算中会被放大而易导致误判^[1]。

【作者简介】石嘉恒(1999-), 男, 中国河南漯河人, 本科, 助理工程师, 从事变电站变压器运维检修技术研究。

2.2 光声光谱法的现场监测适用性及其数据校准

光声光谱法基于气体分子光吸收特性实现非接触式快速检测,适合在线监测系统构建。但现场应用面临电磁干扰、温度压力变化等挑战,需严格电磁屏蔽和补偿算法。该方法对乙炔检测灵敏度可达 $0.1\mu\text{L/L}$,但对一氧化碳检测下限约 $50\mu\text{L/L}$,更适合作为趋势监测手段,精确诊断仍需依赖气相色谱法。

2.3 改良三比值法在典型交直流复合故障诊断中的应用

传统三比值法在换流变压器应用中存在局限,改良方法引入总烃含量和产气速率作为辅助判据,考虑氢气绝对浓度建立专门基准值,引入 CO_2/CO 比值评估固体绝缘老化。实践表明改良方法结合运行参数综合分析可将故障诊断准确率从70%提升至85%以上,但多重故障并发工况仍存在识别盲区^[2]。

3 换流变压器特殊工况对气体析出特性的影响机理

3.1 直流偏磁与高次谐波对油纸绝缘老化产气的影响

直流偏磁现象导致铁心磁通密度波形由正弦波转变为半波饱和尖顶波,铁心在饱和和退饱和间交替引起磁滞损耗和涡流损耗急剧增大,局部温升可达 80°C 以上。周期性热冲击加速了铁心附近油纸绝缘的热老化:绝缘油在高温下裂解产生低分子烃类气体,温度超 150°C 时乙烯和乙烷生成速率显著增加;绝缘纸纤维素热氧化脱水断链释放一氧化碳和二氧化碳。高次谐波电流在绕组中产生的附加损耗进一步恶化热环境,5次、7次谐波集肤效应使局部热点温度比平均温度高 20°C - 30°C ,谐波电压引起的电场畸变加剧了局部电场强度不均匀性。实验表明,在含20%五次谐波复合电压下,油中乙炔生成速率是纯工频电压下的1.5倍,氢气浓度增长率达2倍以上,这种产气特征变化需在故障诊断时特别关注,否则可能将正常谐波效应误判为电弧放电故障。

3.2 阀侧绕组复杂电热应力下的低温过热产气特征

换流变压器阀侧绕组承受的复合电压包含直流、基波交流、脉动分量及换相瞬态过电压,波形畸变率可达30%以上。直流分量使电场分布由电容分布转为电阻分布,纸板中电场强度显著增大;脉动分量引起空间电荷积累进一步畸变电场;换相过电压可能在薄弱处形成局部高场强区域^[3]。绕组导线在复杂电场作用下产生的介质损耗转化为热量,虽温度仅在 80°C - 120°C 间,但长期作用仍引发低温过热型产气。气体特征表现为甲烷和乙烷逐步上升而乙烯乙炔相对较低,氢气含量明显增加部分来自电场作用下的电解反应,总烃含量呈缓慢持续增长趋势。与铁心过热相比,阀侧绕组低温过热的 CO_2/CO 比值更高,因固体绝缘老化温度相对较低。

3.3 复合绝缘结构中气体溶解-析出平衡的动态变化

换流变压器绝缘结构包含油浸纸板、层压纸、撑条

等多种材料,不同材料对气体溶解能力和扩散速率差异显著。奥斯特瓦尔德溶解系数随温度升高而降低,局部温度从 60°C 升至 100°C 时氢气溶解度下降约40%,乙烯乙炔下降约30%,使气体在变压器内部出现浓度梯度。强制油循环系统高流速(可达 1m/s 以上)加快气体输运速率,但在油流死区或纸板内部扩散仍是主导机制,平衡时间可达数小时。负荷波动引起的温度变化打破原有溶解-析出平衡,导致气体浓度短时波动,油中微小气泡为气体提供额外相界面使其在油相、气相和固相间重新分配。

3.4 净负荷波动与暂态过电压下的气体瞬时增量规律

可再生能源并网导致换流变压器负荷波动频度和幅度显著增加。负荷从20%快速攀升至100%过程中绕组损耗增加,温升速率可达 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 以上,急剧热冲击引起的热胀冷缩机械应力可能导致纸板分层或微裂纹,温度梯度驱动水分迁移使局部含水量瞬时升高。实验观测到模拟负荷阶跃条件下氢气浓度在15分钟内可增加10%~20%,这种瞬时产气在负荷恢复平稳后逐渐消退但频繁波动可能导致累积性损伤。暂态过电压是另一重要产气诱因,换流阀故障或系统短路可能在阀侧产生3倍以上额定电压冲击,虽作用时间仅数毫秒但足以引发局部放电。气相色谱分析发现经历过电压冲击后油样中乙炔含量出现尖峰式增长,增幅可达数十至上百 $\mu\text{L/L}$ 。过电压倍数超过2.5倍时几乎每次冲击都产生可检测气体增量,建立负荷波动与暂态过电压事件的气体响应数据库对区分正常工况和潜伏性故障具有重要意义。

4 面向状态预警的气体分析前沿方法与智能诊断策略

4.1 基于量子点/光纤传感器的多组分气体在线监测技术

量子点材料因其独特光电特性在气体传感领域展现广阔前景,硫化镉、硒化镉等半导体量子点能带结构可通过粒径精确调节,使荧光发射波长覆盖可见光到近红外区域。目标气体分子吸附在量子点表面时,电荷转移或能量转移效应导致荧光强度变化,通过监测荧光光谱实现气体识别和定量。针对变压器油中溶解气体,可合成对氢气、甲烷、乙炔具有选择性响应的功能化量子点,将其固定在光纤端面或沉积于微流控芯片表面构建紧凑型传感单元^[4]。光纤传感器抗电磁干扰力强、可远程传输信号、本质安全无火花风险,非常适合在换流变压器油箱内部署。但量子点传感器仍面临技术瓶颈:长期稳定性受表面氧化和配体脱落影响需封装保护层,选择性不足导致交叉干扰如甲烷和乙炔响应可能重叠,定量精度与气相色谱法相比仍有差距。当前技术路线是将量子点传感器作为预警触发器,在检测到异常气体信号时启动气相色谱仪进行精确分析,实现在线监测与离线确认互补。多组分同时检测需构建传感器阵列,利用不同传感单元响应模式差异,通过模式识别算法反演气体浓度向量,机器

学习算法如支持向量机、随机森林在传感器阵列数据处理中的应用显著提升了多组分解析准确性。

4.2 融合电气与振动信号的气体综合诊断知识图谱构建

单一依赖气体分析进行故障诊断存在信息维度不足的局限，融合电气量测和振动监测信号可构建更全面的设备状态画像。局部放电检测能捕捉绝缘缺陷早期征兆，特高频法、超声波法、脉冲电流法等多种检测手段可识别放电类型和定位放电源；频率响应分析反映绕组机械完整性和匝间短路隐患；振动信号包含铁心紧固状态、绕组形变、冷却系统异常等丰富信息。知识图谱通过实体—关系—属性三元组构建领域知识网络化表示，将气体浓度、放电量、振动幅值、负荷电流、油温等多维数据与故障类型、设备部件、物理机制建立关联。图谱构建包括实体抽取、关系挖掘和属性填充：从历史故障案例和专家经验中提取故障模式实体，分析不同特征参数间因果关系或相关关系，标注各实体属性值范围和演化规律。基于知识图谱的推理引擎能进行多步推理和不确定性推理：检测到乙炔浓度升高时结合局部放电特征判断是电弧性放电还是局部过热，振动频谱出现异常分量时结合负荷电流谐波分量分析是否为直流偏磁引起的铁芯振动加剧。

4.3 基于深度学习算法的故障演化趋势预测模型

传统故障诊断属于静态判别，而状态预警需要预测故障发展趋势和剩余寿命。深度学习算法凭借强大的非线性拟合能力和时序建模能力在趋势预测领域表现出色。长短期记忆网络（LSTM）通过门控机制选择性记忆和遗忘信息，能捕捉气体浓度时间序列中长期依赖关系，预测未来数周甚至数月的浓度变化轨迹；卷积神经网络（CNN）擅长提取局部特征，可识别浓度曲线中突变、震荡等模式特征；注意力机制引入使模型聚焦于对预测结果影响最大的时间步和特征维度，提升了可解释性。模型训练需要大量标注样本，但换流变压器故障案例相对稀缺，迁移学习技术通过利用常规变压器大规模数据预训练再用少量换流变压器数据微调，缓解了样本不足问题。数据增强策略如加入噪声、时间扭曲、幅值缩放可扩充训练集规模，模型输出不仅包含预测值还应给出置信区间量化预测不确定性。集成学习方法结合多个基学习器预测结果通过投票或加权平均降低单一模型偶然误差^[5]。

4.4 数字孪生驱动的油中气体状态评估与视景仿真

数字孪生技术通过构建物理实体的高保真虚拟模型实

现物理空间与信息空间实时映射和交互。换流变压器数字孪生模型集成了电磁场有限元模型、热流体动力学模型、绝缘老化化学反应模型，能模拟各种运行工况下电场分布、温度场分布、油流场分布及气体生成扩散过程。实时采集的运行数据作为边界条件输入孪生模型驱动多物理场耦合计算，输出虚拟传感器测点状态参数。将模型预测气体浓度与实际检测值对比，偏差超过阈值时触发状态异常告警并启动参数校准和模型修正流程。模型修正采用数据同化技术，通过卡尔曼滤波、粒子滤波等算法融合观测数据和模型输出减小模型不确定性。数字孪生不仅用于状态监测还支持故障溯源和演化推演：发现气体异常时回溯历史运行数据重构故障发生前场景定位可能故障源，预测不同干预措施（负荷调整、冷却器增投、停机检修等）效果为运维决策提供依据。视景仿真将抽象场量分布转化为直观可视化图景：铁心磁通密度三维云图展示饱和区域，绕组温度场热成像揭示热点位置，油中气体浓度空间分布动画呈现扩散路径。增强现实技术可将虚拟信息叠加到真实设备上，检修人员佩戴AR眼镜即可看到设备内部实时状态辅助故障定位和检修作业。

5 结语

换流变压器油中溶解气体分析技术正在从传统的离线检测、事后诊断向在线监测、预测性维护转变。新型传感技术的突破将实现多组份气体的连续实时监测，多源信息融合与知识图谱构建将提升诊断的准确性和全面性，深度学习算法和数字孪生技术将使故障预测和演化推演成为现实。但技术进步的同时也需要清醒认识到，换流变压器运行环境的复杂性和故障机理的多样性，决定了任何单一技术手段都难以完美解决所有问题。

参考文献

- [1] 盛雨. 气相色谱法在油中溶解气体中的应用研究[J]. 电工技术, 2024(6):181-184.
- [2] 邓先钦, 彭伟, 厉敏宪, 熊鸣翔, 潘锐, 庄鸿涛, 方华. 应用氦离子化气相色谱法测定变压器油中溶解气体[J]. 中国电力, 2017, 50(10):148-152.
- [3] 王飞, 邹云博. 变压器油溶解气体分析及故障诊断方法[J]. 设备管理与维修, 2025(12):167-169.
- [4] 官学艳, 李晓晨, 武洁良. 变压器油中溶解气体分析与故障预测[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(3):086-089.
- [5] 商聪. 基于油中溶解气体分析的变压器内部故障诊断技术研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2025(3):109-112.