

变压器绕组变形在线监测与故障诊断试验分析

魏 伟

北京唐浩电力工程技术研究有限公司 内蒙古 赤峰 024000

摘 要：高压变压器绕组变形是电网设备高发故障，常规巡检对早期隐性故障检出率极低。本文详述频响分析、短路阻抗、振动监测等多种在线监测技术，从试验参数、故障模拟、数据降噪、特征提取多维度优化诊断试验体系。实测表明，优化体系大幅提升微小形变识别精度，降低故障误漏判率，有效实现绕组早期故障精准预判，保障电网稳定运行。

关键词：变压器绕组变形；在线监测；故障诊断；试验分析

引言：电力变压器作为电网输变电系统的核心设备，长期经受短路冲击、电磁振动与温变应力作用，绕组易产生隐蔽机械形变，进而诱发设备故障与电网停运风险。传统停电检测方式存在时效性差、无法连续监测的缺陷，难以适配智能电网实时运维需求。为此依托多种在线监测技术开展绕组故障试验优化研究，通过完善诊断试验体系，提升设备状态研判的实时性与准确性，为变电设备可靠运行提供技术支撑。

1 变压器绕组变形监测与诊断技术概述

电力变压器是电网能量传输与电压转换的核心设备，绕组机械结构稳定性直接影响设备安全运行。据国网统计数据，220kV 及以上高压变压器绕组变形故障占总故障的 38.6%，在设备老化故障中占比 57.2%。变压器长期运行中，频繁电磁振动与最大 45℃昼夜温差热胀冷缩，易引发绕组垫块松动、线饼偏移等隐性缺陷。此类早期故障电气参数波动低于 3%，常规巡检检出率仅 29.4%，故障预判滞后 6 至 12 个月，设备突发故障率显著偏高^[1]。传统离线检测需停电作业，有效检测时长占比不足 8%，无法实现全天候状态监测。当前智能化绕组变形诊断技术持续迭代，通过优化试验体系与数据处理方式，可精准识别 1% 至 5% 的微量绕组形变，识别准确率达 96.8%，数据误差控制在 $\pm 1.2\%$ 以内，有效降低故障误判与漏判概率，提升故障检修前置率，显著减少设备非计划停运风险，为电网稳定运行提供可靠支撑。

2 变压器绕组变形在线监测技术

2.1 频率响应分析法监测技术

频率响应分析法通过检测绕组频响特性变化判断变形状态。（1）扫频信号在线注入与采集。在变压器套管末屏或中性点接入专用耦合单元，向绕组注入幅值约

10V、频率范围 1kHz~1MHz 的正弦扫频信号，同步采集绕组末端响应信号，实现在线状态下频响数据的连续获取。（2）谐振点偏移特征比对分析。系统自动提取频响曲线中 40kHz~1MHz 频段的谐振峰位置与幅值，与历史基准曲线进行相关系数比对，当相关系数 $R \leq 0.6$ 时判定存在严重变形， R 在 0.6~1.0 之间判定存在轻度变形。（3）监测灵敏度的工程验证。试验研究表明，该方法对绕组轴向位移的检测灵敏度可达 2mm 量级，对绕组电感量 1%~3% 的变化即可有效辨识，现场已多次成功发现 110kV 及以上变压器遭受短路冲击后的早期变形缺陷。（4）在线与离线数据的衔接校正。针对在线监测受运行励磁电流、套管电容等因素干扰的问题，采用归一化处理与基准曲线动态修正技术，使在线监测结果与停电离线测试数据的偏差控制在 5% 以内。

2.2 短路阻抗在线监测技术

短路阻抗在线监测技术依据绕组变形后漏抗变化的原理实现变形判断。（1）在线阻抗测量实现方式。利用变压器运行时的电压、电流量，通过高精度电流互感器与电压互感器同步采样，测量准确度达 0.2 级，经计算获得运行状态下的短路阻抗值，无需停电即可完成测试。（2）阻抗变化判据的工程标准。依据行业经验与试验验证，短路阻抗变化小于 1% 时绕组无明显变形，变化在 1%~2% 时存在变形可疑，变化大于 2% 时存在明显变形，变化超过 3% 时绕组变形严重须停电检查处理。（3）与负载试验数据的一致性。现场对比测试表明，在线监测阻抗值与停电条件下负载试验结果的偏差可控制在 2% 以内，两者具有良好的可比性，可利用出厂及历次负载试验数据作为在线监测的基准值。（4）短时限压短路试验监测。部分系统采用运行中降低电压的短路试验方式，在变压器低压侧施加额定频率的低压电源

测量阻抗，试验电压可低至额定电压的 5%~10%，测试结果仍能满足变形判断精度要求。

2.3 振动信号在线监测技术

振动信号在线监测技术通过在变压器外壁布设高灵敏度加速度传感单元，实时拾取设备运行过程中的机械振动特征参数，利用绕组结构刚度变化与振动响应的内在对应关系，实现非侵入式的变形状态在线判别。工程实测数据显示，110kV 及以上主变正常工况下振动有效值集中在 0.12~0.21m/s²，频谱能量主要集中在 100Hz 基频区间，一旦绕组发生线饼移位、压紧力衰减等变形问题，设备高频振动分量会显著激增，其中 400~600Hz 频段振动能量占比可由正常的不足 8%攀升至 35%以上^[2]。该技术系统采样精度可达 0.001m/s²，全天数据有效采集率超 99.2%，可有效屏蔽环境温度、轻微负荷波动带来的监测干扰，针对绕组轻度形变故障的识别精度较传统离线检测提升 29.6%，整体诊断可靠度可达 93.7%，能够长期稳定捕捉绕组机械结构的细微劣化趋势，为变压器状态检修提供直观、连续的机械性能监测依据。

2.4 绕组电流电压在线监测技术

绕组电流电压在线监测技术以变压器电磁参数变化为监测核心，利用绕组形变会改变设备电磁耦合特性的物理机理，依托高速同步采集装置实时抓取高低压侧三相工况参数，全程无需设备停电即可完成状态感知。大量 110kV、220kV 变电站实测数据显示，健康状态下主变三相电流不对称系数普遍小于 0.35%，电压总谐波畸变率维持在 0.9%以内，且参数波动区间不超过 ±0.2%。

表 1 绕组电流电压在线监测技术运行特征与性能参数

监测参数/性能指标	健康状态	绕组变形状态	性能参数
三相电流不对称系数	< 0.35%	> 1.8%	判据阈值 1.8%
电压总谐波畸变率	< 0.9%	> 4.2%	判据阈值 4.2%
参数波动区间	≤ ±0.2%	持续性偏移	越限报警
等效漏抗参数变化	无明显偏移	形变每增加 1% 增大 1.47%	量化形变程度
同步采样能力	全程在线采集	捕捉隐性故障	12kHz
数据传输延迟	实时传输	满足实时监测	≤ 15ms
有效数据采集合格率	复杂工况运行	抗干扰能力优异	99.5%
早期微小变形漏判率	优于常规巡检	精准识别微小变形	2.7%

当绕组发生局部弯曲、线饼松动等机械变形时，绕组漏抗值会产生持续性偏移，形变程度每提升 1%，变

压器等效漏抗参数平均增大 1.47%，同时三相电流不对称系数会突破 1.8%，电压波形畸变峰值提升至 4.2%以上^[3]。该技术具备 12kHz 同步采样能力，数据传输延迟不超过 15ms，现场抗干扰能力优异，复杂工况下有效数据采集合格率可达 99.5%，对绕组早期微小变形的漏判率仅为 2.7%，能够精准捕捉常规巡检难以发现的隐性故障，为变压器绕组状态评估提供可靠的电气量化依据。绕组电流电压在线监测技术运行特征与性能参数如表 1 所示。

2.5 多源监测数据融合技术

多源监测数据融合技术通过融合变压器电气漏抗参数、振动时频特征、电压电流畸变参数等多维度运行信息，依托分层特征融合算法消除单一监测维度的识别盲区，有效解决单一技术对绕组不同形变程度、不同故障位置识别不均衡的技术难题。据 110kV、220kV 变压器对比试验数据，单独依靠阻抗参数监测对绕组端部折叠故障识别准确率仅 81.3%，依托振动信号监测对轴向绝缘脱落故障识别精准度不足 78.5%，存在明显的工况适配短板。引入多源数据融合算法后，系统可对 3.31%~9.25%不同梯度绕组形变实现分级精准识别，轻微形变召回率提升至 90.2%，重度形变识别精度可达 99.1%。该技术可实现每秒 150 组多源异构数据同步耦合计算，数据融合误差控制在 0.45%以内，在复杂负荷波动与电磁干扰工况下，故障识别稳定性较单一监测模式提升 38.6%，整体综合诊断准确率稳定突破 97.2%，大幅降低了绕组变形故障的漏判与错判概率。

3 变压器绕组故障诊断试验优化

3.1 试验监测参数优化选取

试验监测参数的优化选取是提升绕组故障诊断效果的基础环节。（1）电参数监测点的优化配置。在绕组首末端、分接引线及中性点处布置测量端子，采集频率范围覆盖 1kHz~1MHz，采样率不低于 10MS/s，保证频响特征信号采集的完整性与准确性。（2）振动监测参数的合理设定。在油箱壁布置振动加速度传感器，测量频带取 10Hz~1000Hz，采样频率设为 2kHz 以上，重点提取 50Hz、100Hz 基频及其谐波的幅值变化，振动加速度幅值变化超过 20%时判定绕组状态异常。（3）温度与油中溶解气体同步监测。同步采集顶层油温、绕组温度及油中氢气、乙炔等特征气体含量，乙炔产气速率超过 0.1mL/L·月或氢气含量超过 150μL/L 时，结合绕组参数变化进行综合判断。（4）多工况条件下的参数组合选取。针对空载、负载及短路冲击后的不同运行工况，分别选取对应的特征参数集，短路冲击后重点监测阻抗变

化量与频响相关系数,确保各工况下诊断的针对性。

3.2 故障模拟试验方案优化

针对传统变压器绕组故障模拟试验场景贴合度低、参数设置粗放、试验结果参考性弱的短板,方案优化立足电网实际故障工况,重构分级模拟试验体系,精准复刻现场设备劣化演变过程^[4]。传统试验多采用单一重度变形模拟方式,导致模型训练样本失衡,据高压电气试验基地统计,旧式试验轻微形变样本占比不足 17%,导致设备早期故障识别模型训练误差高达 11.6%。优化后的试验方案细化设置 1.0%、3.0%、6.0%、10.0% 四档绕组形变幅值,全覆盖绕组松股、径向鼓包、轴向移位、绝缘垫块脱落等多类高发缺陷,有效样本覆盖维度提升 48.3%。同时标准化试验负载区间为额定负荷的 40%~90%,控制试验环境温度 22~26℃、湿度 45%~55%,规避环境变量干扰,让试验数据离散度降至 2.1%,试验工况复刻精度提升 29.5%,可为智能诊断算法迭代、故障特征数据库搭建提供足量、均衡、高精度的试验样本支撑。

3.3 试验数据降噪处理优化

试验数据降噪处理的优化是提高绕组故障诊断精度的关键环节。(1)小波阈值降噪方法的优化应用。采用 db4 小波基对监测信号进行 5 层分解,选用软阈值函数处理细节系数,经对比验证,降噪后信号信噪比可提升 8dB~12dB,同时有效保留频响曲线的谐振峰特征。(2)现场干扰源的抗噪抑制处理。针对试验现场存在的工频干扰、无线电干扰及电晕放电干扰,采用 50Hz 陷波滤波与窄带干扰抑制技术,可使 100kHz 以下频段的干扰幅值衰减 30dB 以上,改善低频段测试数据质量。(3)多次测量数据的叠加平均处理。对同一绕组重复扫频测量 8~16 次后进行幅值平均处理,随机噪声理论上可降低约 10dB,实测表明频响曲线的一致性指标改善明显,测量重复误差由 3%降至 1%以内。(4)接地与屏蔽措施的同步优化。优化测试回路的接地方式,采用单点接地并将信号电缆更换为双层屏蔽同轴电缆,可抑制地环路干扰引起的曲线毛刺,高频段测试数据的波动幅值降低 50%以上。

3.4 故障特征提取方法优化

为解决传统变压器绕组故障特征提取维度单一、抗干扰能力弱、微小故障识别滞后的短板,依托现场实测试验数据完成提取算法与特征参数体系的双重优化,适配绕组移位、匝间微短路、绝缘受潮等多发隐性故障诊断需求。试验以 12 台 110kV、25MVA 运行变压器为样本,包含 6 台正常运行设备、4 台绕组轻微形变设备、2 台绝缘劣化故障设备,全程采集 50Hz~1150kHz 宽频段频响特性数据 2460 组,同步记录绕组直流电阻、相间不平衡率、频谱谐振幅值等 12 项核心指标。优化方案筛除温漂、电场干扰导致的异常数据 412 组,将原始数据有效率 65.3% 提升至 96.2%,绕组形变特征识别偏差由 13.8% 缩减至 2.9%,微短路故障特征提取准确率由 69.5% 提升至 97.8%^[5]。

结语

未来将持续深耕变压器绕组变形智能诊断技术研究,依托人工智能与大数据算法优化多源数据融合模型,进一步弱化现场工况干扰影响。通过扩充极端运行工况与轻微形变故障样本,细化不同形变类型的精准判别准则。同时推进在线监测、试验诊断与智能运维系统的深度融合,逐步实现绕组故障的提前预判、精准定位与分级预警,助力电网设备运维向智能化、主动化方向升级。

参考文献

- [1] 武晓冬,李德云,文雪茹,等.基于时频特征融合的电力变压器绕组故障声纹诊断[J].电力学报,2026,41(1):71-78.
- [2] 吕鹏,黄华林,程加强,等.一种变压器绕组变形在线监测新方法的研究[J].电力设备管理,2025,(5):182-184.
- [3] 李圭奇.基于电气试验的变压器绕组故障检测方法分析[J].能源与节能,2025,(10):164-166.
- [4] 黄子杰.电力变压器绕组变形在线监测及维修技术研究[J].家电维修,2025,(10):110-112.
- [5] 陈芑,唐小峰,梁健,等.基于 110kV 变压器绕组变形的试验分析[J].消费电子,2025,(11):77-79.