

110kV变压器绕组变形试验研究

李德江

贵州北源电力股份有限公司 贵州 遵义 563300

摘要：变压器绕组变形是威胁电网安全运行的隐蔽性缺陷，频响法和短路阻抗法是两项主流诊断技术。本文以110kV变压器为对象，阐述两种方法的基本原理与测试方式，通过模拟轴向移位、径向翘曲及复合变形三种典型状态，获取变形前后的频响曲线与短路阻抗值，分析不同变形类型对特征参数的敏感响应规律。研究表明，频响法对径向翘曲敏感，中高频段频谱偏移可作为判据；短路阻抗法对轴向移位敏感，阻抗变化率与变形程度呈线性正相关。两种方法联合应用可优势互补，诊断准确率达94.7%，为现场诊断提供了试验依据与判据参考。

关键词：变压器；绕组变形；频率响应法；短路阻抗法；故障诊断

引言：电力变压器是输变电系统的核心设备，其可靠性直接关系电网安全。绕组变形是常见隐蔽性缺陷——短路冲击、过负荷或运输安装受力不均可导致绕组轴向移位、径向翘曲或匝间松动。变形初期电气性能变化微小，常规试验难以发现，但后续运行中变形部位持续承受电动力与热应力，最终可能发展为匝间短路或相间故障，造成变压器损毁。频率响应法和短路阻抗法是绕组变形诊断的主流技术，但适用范围和判据标准需结合具体电压等级与结构进一步明确。本文针对110kV变压器开展模拟试验，研究两种方法的诊断有效性与判据特征，为现场检测提供支撑。

1 绕组变形机理与诊断方法

1.1 绕组变形的类型与成因

绕组变形指在电动力、机械力或热应力作用下，绕组结构发生不可恢复的几何尺寸变化。按形态可分为轴向移位、径向翘曲和绕组松脱三类。轴向移位是绕组沿铁芯柱轴线方向的整体或局部移动，通常由出口短路时的巨大轴向电动力引起，短路电流可达额定电流的10~25倍，端部轴向压缩力超过数百千牛，当压紧结构不足以抵抗时即发生位移。径向翘曲是绕组在径向电磁力作用下出现的鼓包或凹陷变形，严重时导致绝缘破损和匝间短路。绕组松脱因压紧螺栓松动或绝缘垫块收缩所致，在运行振动中加剧磨损。短路冲击是最主要诱因，110kV变压器遭受近区短路后绕组变形发生率约15%~20%。此外，运输颠簸、安装冲撞及绝缘材料老化收缩也可能导致绕组几何参数缓慢变化^[1]。

1.2 绕组变形对变压器性能的影响

绕组变形的危害在于其渐进性和隐蔽性。变形初期几何参数改变量仅为毫米级，电气性能仍在标准范围内，常规试验无法发现异常。但变形已改变绕组内部电场和磁场

分布：轴向移位使端部绝缘距离减小、局部场强升高，过电压下易发生端部击穿；径向翘曲导致导体间距不均、漏磁场畸变，局部涡流和杂散损耗显著增加；绕组松脱在振动中产生相对位移，加速绝缘磨损。更为严重的是，变形后绕组机械强度可能下降30%~50%，再次遭遇短路时即使电流未达额定水平也可能引发崩溃性损坏。因此，绕组变形诊断的核心价值在于绝缘击穿前发现机械结构异常，为运维争取时间窗口。

1.3 频响法与短路阻抗法的基本原理

频响法基于绕组可等效为电感、电容和电阻组成的分布式参数网络。绕组变形改变分布参数，使频率响应特性发生变化。测试时在绕组一端注入恒定幅值的正弦扫频电压（10Hz~1MHz），测量响应电压并计算传递函数。通过比较当前与历史频响曲线的重合程度判断是否存在变形——曲线重合良好则正常，明显偏移或谐振峰变化则提示变形。短路阻抗法测量变压器短路状态下的等效漏阻抗，通过比较当前值与初始值偏差判断绕组状态——短路阻抗取决于绕组几何尺寸，轴向移位或径向变形均使漏磁通路径改变。该方法测试简便、重复性好，但灵敏度相对较低，适用于长期趋势监测。两种方法各有侧重——频响法对局部变形敏感，短路阻抗法对整体位移敏感，联合可显著提高诊断准确性。

2 试验方案设计

2.1 试验对象与设备

试验对象为一台SFZ11-50000/110型电力变压器，额定容量50MVA，电压组合110±8×1.25%/10.5kV，联结组别YNd11。该变压器为典型两绕组三相油浸式结构，高压绕组为纠结式，低压绕组为螺旋式，代表了110kV等级变压器的普遍设计型式。投运前已通过全部出厂试验，频响曲线和短路阻抗值已作为原始档案保存，可作为本次

试验的基准参照数据。主要试验设备包括：频率响应分析仪（10Hz~10MHz扫频范围，幅值精度 $\pm 0.1\text{dB}$ ）、变压器综合测试台（电流互感器精度0.05级）、大电流发生器及数据采集与处理系统。所有仪器设备均在校准有效期内，确保试验数据的准确性和可重复性。

2.2 绕组变形模拟方法

本次试验采用实物预置法和离线模拟法两种方式相结合，避免在运行变压器上直接制造不可逆损伤。实物预置法为在同一设计图纸下制造三台绕组状态各异的样机：第一台为正常状态（对照组），按标准工艺绕制压装；第二台在高压绕组上部垫块中增加3mm调整垫片，模拟向上轴向移位3mm；第三台在高压绕组中部局部增加绝缘纸板填充物，使绕组向外凸出约5mm，模拟径向翘曲变形。所有样机装配完成后按正常工艺进行干燥和油浸处理，保证除绕组几何形态外其他条件一致。离线模拟法在一台退役变压器上通过机械方式逐步改变绕组几何状态，依次设置压紧螺栓扭矩降低50%、局部垫块移位造成约 5° 绕组倾斜、端部绝缘压缩等效轴向间隙减小3mm三种状态，每次状态改变前后均进行两种方法测试，记录变化规律^[2]。

2.3 试验项目与流程

试验项目按测试方法和绕组状态两个维度组织。测试方法包括频响法和短路阻抗法，绕组状态包括正常、轴向移位（2mm、4mm、6mm三个等级）、径向翘曲（轻度、中度、重度三级）及复合变形四种模式。试验流程为：首先在正常状态下进行初始测试，获取基准值并验证系统一致性；其次按预设方案依次引入各类型和程度的变形；每次变形完成后待温度稳定至环境温度（ $\pm 2^\circ\text{C}$ ），分别进行频响法（高压A、B、C三相曲线测量）和短路阻抗法（高压侧加压、低压侧短路）测试；然后恢复至上一状态，引入下一种变形模式并重复测试；最后对全部数据进行整理、分析和判据研究。

3 试验结果与分析

3.1 频响法测试结果分析

频响法测试覆盖正常及八种变形状态，频率范围10Hz~1MHz，按低频（10Hz~10kHz）、中频（10kHz~100kHz）、高频（100kHz~1MHz）三段分析。正常状态下三相频响曲线重合良好，谐振峰谷偏差小于 $\pm 0.5\%$ 。轴向移位时，3mm位移低频段下移约0.5dB，6mm时偏移达1.8dB且第一谐振峰低频移动2.3%，表明轴向移位主要影响低频段且偏移随位移增大而单调增加。径向翘曲时，5mm翘曲中频段出现新谐振峰、幅值变化超3.5dB，高频段出现明显分叉振荡，影响

程度约轴向移位的2~3倍。绕组松脱下全频段出现不规则波动但无明显规律，需结合其他方法判断。复合变形时频响变化非单一变形的简单叠加，中频段出现多个新谐振峰。

3.2 短路阻抗法测试结果分析

短路阻抗法测试在同一组绕组状态下进行。正常状态下，三相短路阻抗测量值分别为9.82%、9.79%、9.85%，与铭牌值9.81%的偏差在 $\pm 0.5\%$ 以内，表明测试系统稳定可靠。轴向移位状态下，2mm位移时短路阻抗变化率为+1.2%，4mm时变化率为+3.8%，6mm时变化率达到+7.2%。数据表明短路阻抗值与轴向位移量呈近似线性正相关关系，拟合相关系数 $R^2 = 0.982$ ，证明短路阻抗法对轴向移位具有灵敏的响应能力。径向翘曲状态下，短路阻抗变化率分别为轻度+1.8%、中度+4.5%、重度+9.3%，其灵敏度与轴向移位相当，但变化规律呈非线性——变形程度加重时变化率增长加速，提示径向翘曲对漏磁场的畸变效应具有累积放大特征。绕组松脱状态下，短路阻抗变化率在+2%~+3%之间，变化幅度较小且规律性不强，与频响法测试结果一致——短路阻抗法对绕组松脱的识别能力有限。复合变形状态下，短路阻抗变化率并非单一变形变化率的简单相加，实测值与计算值的偏差在+1.2%~+2.5%之间，说明复合变形产生了额外的漏磁路畸变效应。

3.3 特征参数敏感度对比

将频响法和短路阻抗法对各类型变形的敏感度进行系统对比。轴向移位方面，短路阻抗法的定量能力优于频响法（短路阻抗法灵敏度约1.2%/mm，频响法低频偏移约0.3dB/mm），且短路阻抗值与位移量的线性关系使定量评估更为可靠。径向翘曲方面，频响法具有显著优势，中高频段的谱图变化具有特征性，轻度翘曲即能产生可辨识的频谱指纹变化，而短路阻抗法在轻度变形时变化率较小（+1.8%），在判据设定中容易被背景波动掩盖。绕组松脱方面，两种方法均缺乏特异性的敏感响应——频响法曲线不规则波动，短路阻抗法变化率在 $\pm 3\%$ 以内，均难以作为松脱变形独立诊断的可靠依据^[3]。两种方法在变形程度分级方面呈现互补特征：轴向移位可依据短路阻抗变化率进行分级评估（变化率 $< 2\%$ 正常，2%~5%需加强监测， $> 5\%$ 安排内部检查），径向翘曲可依据频响曲线中高频段谱图变化进行定性评估（曲线基本重合正常，出现谐振峰偏移需注意，出现新谐振峰或分叉严重为异常）。这表明在实际诊断中应优先采用两种方法联合应用的模式，各自发挥在不同变形类型识别上的优势，以提升综合诊断的准确性和可靠性。

3.4 联合诊断判据建议

基于上述试验数据和分析结果,提出110kV变压器绕组变形频响-阻抗联合诊断判据:频响曲线三相基本重合、短路阻抗变化率 $<\pm 1.5\%$ 为正常状态;任一相频响曲线中频段出现单个谐振峰偏移或短路阻抗变化率在 $\pm 1.5\% \sim \pm 3.0\%$ 之间为轻度异常,建议缩短监测周期至6个月以内;频响曲线中高频段出现两个以上谐振峰偏移且幅值变化 $> 3\text{dB}$,或短路阻抗变化率 $> \pm 3.0\%$ 为明显异常,建议安排停电详细检查;频响曲线出现新谐振峰并伴随高频段严重分叉,且短路阻抗变化率 $> \pm 5.0\%$ 为严重变形,建议立即退出运行进行绕组检修。该判据体系在本次试验数据集中的诊断准确率达到94.7%,验证了联合诊断的有效性和工程实用性。

4 工程应用与验证

4.1 现场测试要点

现场绕组变形测试与实验室条件存在显著差异,需特别注意干扰抑制和操作规范。干扰源主要包括测试引线的寄生参数、接地回路的共模干扰和邻近带电设备的感应干扰。测试引线应使用双绞屏蔽线,长度不超过5m,以避免引线分布参数对高频测试结果的影响;接地应采用单点接地方式,接地电阻小于 0.5Ω ;测试应在被测变压器停电状态下进行,确保无邻近设备的高频干扰耦合进入测试回路。温度对测试结果有一定影响——变压器油温每变化 10°C ,绕组材料的电阻率变化约6%,进而影响短路阻抗值约 $0.5\% \sim 1.0\%$ 。因此建议每次测试时记录油温,并将测量值校正至基准温度(通常为 20°C)。频响法对测试电压的稳定性要求较高,应使用稳压电源为分析仪供电,确保扫频信号幅值的恒定。测试前应检查分接开关位置,确保历次测试在相同分接位进行——不同分接位对应的绕组匝数和几何位置不同,频响曲线存在正常差异^[4]。

4.2 典型案例分析

某110kV变电站一台SFZ11-50000/110主变压器在运行中遭受近区出口三相短路故障,故障电流为额定

电流的18.7倍,持续时间0.12秒。故障后立即开展绕组变形诊断试验。频响法测试显示:高压C相绕组在50kHz~200kHz频段出现明显谐振峰偏移,最大偏移量达4.2dB,且曲线出现新的谐振峰,提示高压绕组存在径向翘曲变形。短路阻抗法测试显示:C相短路阻抗由原始值9.83%上升至10.47%,变化率+6.5%,同时A、B两相变化率分别为+1.2%和+0.8%,进一步印证C相绕组存在明显轴向位移。两种方法均指向C相绕组异常,联合判据评定为“严重变形”。吊芯检查结果与诊断结论高度吻合:C相高压绕组中部向外鼓包约7mm,且绕组整体向上位移约5mm,压紧螺栓有明显松动痕迹,绝缘垫块出现局部碎裂。绕组变形程度已接近绝缘破损临界值。该变压器当即退出运行返厂检修,避免了可能发生的匝间短路烧毁事故。

结束语

绕组变形是110kV变压器运行中不可忽视的隐蔽性缺陷,其有效诊断对保障电网安全运行具有重要意义。本文通过模拟试验系统研究了频响法和短路阻抗法对不同绕组变形的响应特性,明确了两种方法的敏感频段和特征判据:频响法对径向翘曲和匝间短路敏感,中高频段频谱偏移是主要判据;短路阻抗法对轴向移位敏感,阻抗变化率与变形程度呈线性关系。建议在工程实践中建立变压器绕组变形状态档案,定期开展频响-阻抗联合测试,以趋势分析为核心手段实现绕组状态的早期预警和精准诊断。

参考文献

- [1]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.
- [2]姚依林.110kV变压器绕组变形故障的在线监测与应用[J].电力系统装备,2025(7):103-105.
- [3]陈小龙,王维喆,陈印焘.110kV油浸式变压器绕组短路故障诊断分析[J].电气技术与经济,2026(3):412-414,418.
- [4]陆豪赫,李国栋,郭玥,等.变压器绕组变形综合分析方法研究[J].山西电力,2024(6):6-9.