

变压器故障原因与试验策略分析

陆秀丽

安阳钢铁建设有限责任公司 河南 安阳 455000

摘要: 变压器是电力系统输配电核心设备,其运行稳定性直接影响电力供应安全。本文分析变压器绝缘系统、机械结构、过热、放电及外部因素五类典型故障的特征,探究故障源于设计制造、运行维护、环境干扰等根源性原因,介绍频域响应分析等先进试验技术,提出基于不同故障类型的试验策略优化方案。研究可为变压器故障精准诊断、高效防控及安全稳定运行提供理论支撑与实践参考,助力提升电力设备运维水平。

关键词: 变压器故障; 类型; 原因; 试验策略

引言: 随着工业生产对电力供应可靠性要求的不断提升,变压器作为能量转换与传输的关键设备,其故障频发易引发电力中断,造成经济损失。安阳钢铁建设领域中,变压器长期处于复杂工况,受多因素影响易出现各类故障,现有试验诊断策略仍存在针对性不足等问题。基于此,本文聚焦变压器故障类型、根源性原因及试验技术,结合工程实际优化试验策略,旨在明确故障特征、分析故障成因、完善诊断方案,为变压器安全运维提供技术保障,具有重要的工程应用价值。

1 变压器典型故障类型及特征分析

1.1 绝缘系统故障

绝缘系统是变压器安全运行的核心,故障主要表现为绕组绝缘老化和油纸绝缘击穿。绕组绝缘老化呈渐进式,初期绝缘电阻、介损值轻微异常,运行无明显声响,仅负荷波动时出现轻微局部过热;老化加剧后,绝缘层变脆脱落,易引发匝间、层间放电,严重时导致绕组短路。油纸绝缘击穿多为突发,击穿前油中水分、介损值骤升,绝缘油变深浑浊并带异味;击穿瞬间产生电弧声响,油位波动,油中乙炔、氢气等特征气体剧增,保护装置随即跳闸。

1.2 机械结构故障

机械结构故障源于制造缺陷或长期振动冲击,核心为绕组变形和铁芯松动,特征体现为振动、声响异常及电气参数波动。绕组变形后,运行振动幅值增大、频率改变,伴随不均匀“嗡嗡”声,严重时出现金属摩擦声;绕组直流电阻、变比偏差超标,频域响应曲线偏移,易诱发短路。铁芯松动时,空载电流和损耗上升,产生杂乱高频噪声,与正常噪声差异明显;严重时叠片绝缘破损,引发铁芯局部过热、表面焦痕,伴随绝缘油温度异常。

1.3 过热性故障

过热性故障是变压器常见故障,分为局部过热和油

温异常,核心特征为温度升高、油中特征气体异常。局部过热多发生在绕组接头、铁芯叠片等部位,初期无明显外观异常,仅局部温度偏高,红外检测可发现热点;过热加剧后,油中甲烷、乙烯等气体显著增加且增速加快,局部绝缘层碳化焦糊并带异味。油温异常表现为顶层及平均油温持续超额定范围,调整冷却系统仍无法降温;绝缘油粘度下降、颜色变深,油位波动明显,严重时触发温度保护跳闸。

1.4 放电性故障

放电性故障源于绝缘缺陷或电场不均,分为电弧放电和局部放电。电弧放电突发且剧烈,发生时产生电弧声响与火光,变压器油沸腾、油位骤升甚至喷油;电压电流剧烈波动,保护装置快速跳闸,油中乙炔含量剧增并伴随大量氢气、甲烷。局部放电呈渐进式,放电强度弱,仅能听到微弱“滋滋”声,无明显外观异常;局部放电信号幅值、频次持续上升,油中特征气体缓慢增长,长期发展会损坏绝缘系统。

1.5 外部因素故障

外部因素故障由环境或电气冲击引发,特征与干扰类型相关。雷击时,变压器遭雷电过电压冲击,绝缘子破损、引线烧断,保护装置跳闸,油中氢气、乙炔剧增,绕组绝缘电阻大幅下降,严重时绝缘击穿。短路冲击多由外部线路短路导致,电流骤增,产生强烈振动与轰鸣,绕组易变形、引线接头烧损,油中特征气体快速上升,相关保护装置动作。环境腐蚀呈渐进式,设备外壳、套管等部件锈蚀破损,绝缘层加速老化^[1]。

2 变压器故障的根源性原因分析

2.1 设计制造缺陷

变压器设计合理性直接决定其运行寿命与抗故障能力。常见绝缘结构设计缺陷包括绕组匝间绝缘厚度不足、油道间距过小,易引发局部放电或过热;材料选型失误,

如使用劣质绝缘纸、硅钢片,会加速绝缘老化或增加铁芯损耗;机械强度不足表现为绕组紧固不牢、引线固定不可靠,短路冲击下易变形断裂。制造工艺缺陷如真空干燥不彻底、器身装配偏差,会导致内部残留气泡或局部电场集中,埋下故障隐患。

2.2 运行维护不当

科学的维护管理是保障变压器正常运行的关键,实际中常因操作失误或管理疏漏引发故障。过载运行会使绕组温度升高,加速绝缘纸聚合度下降,缩短设备寿命;油务管理缺失,未定期检测油中微水、溶解气体含量,或未及时滤油、换油,会导致油质劣化、绝缘性能下降;检修周期过长会使局部放电、铁芯接地不良等潜在缺陷逐步恶化,演变为突发性故障;保护装置配置错误,如差动保护定值不合理、瓦斯继电器误动,可能掩盖真实故障或扩大事故范围。

2.3 环境与外部干扰

复杂的运行环境常成为故障直接诱因。高湿度会加速绝缘受潮、降低击穿电压,绝缘子表面污秽堆积易引发闪络,尤其在雾霾、盐雾地区更为突出;蛇、鼠等动物进入内部,可能造成短路或引线损伤。雷击与短路冲击是主要外部机械应力来源,雷击过电压可击穿绝缘,系统短路产生的电动机会导致绕组变形、引线断裂;地震等自然灾害会破坏设备基础或连接部件,造成器身移位、漏油。

2.4 老化与寿命衰减

变压器长期运行后,材料性能会因物理、化学变化逐渐劣化。绝缘纸聚合度下降是老化核心指标,聚合度低于250时,机械强度显著降低,易被电场或机械应力破坏;油质劣化表现为酸值升高、介损增大,生成沉淀物堵塞油道,降低散热效率;铁芯锈蚀、螺栓松动等金属部件腐蚀,会增加涡流损耗或引发局部过热;密封件老化会导致漏油,绝缘油量不足,加剧内部过热。

2.5 人为操作失误

人为因素在变压器故障中占比不容忽视。带负荷拉刀闸、非全相合闸等误操作,会产生过电压、过电流,直接损伤设备;绝缘电阻测试未充分放电、直流电阻测试电流过大等不规范试验,可能掩盖缺陷或引发二次故障;数据记录缺失无法追溯设备历史状态,会错过最佳检修时机;应急预案不完善,故障发生时无法快速响应,会扩大事故影响^[2]。

3 变压器故障诊断的先进试验技术

3.1 频域响应分析(FRA)

频域响应分析是绕组变形检测的核心先进技术,试验前需对变压器充分停电、放电,清理绕组引线杂物并

确保接线接触良好,同时检查仪器接地情况。试验时采用专用仪器,向绕组施加1kHz至1MHz范围的正弦激励信号,同步采集输入输出电压信号并计算得到频域响应曲线,通过对比被测与标准绕组的曲线差异,分析幅值、相位及谐振频率变化,重点关注曲线偏移、峰值衰减等特征,精准识别绕组变形类型与程度,测试过程中需严格控制环境温湿度、避免电磁干扰,测试后对数据进行降噪校准以提升诊断精度。

3.2 溶解气体分析(DGA)的智能诊断

该技术依托传统DGA技术优化升级,核心是采用高精度设备抽取绝缘油样品,分离检测油中甲烷、乙炔、氢气等特征气体含量以保障数据精准。试验中运用三比值法,根据特征气体三组比值对照诊断标准初步判断故障类型与严重程度,同时结合人工智能构建故障诊断模型,输入特征气体含量数据通过算法训练实现故障识别与发展趋势预判,后期需定期优化更新诊断模型、校准检测设备,确保数据可靠性与模型适配性。

3.3 超声波局放定位技术

该技术主要用于变压器内部局部放电的空间定位,需结合变压器结构合理布置超声波传感器并避开附件干扰,安装前校准传感器以保证采集灵敏度。试验时启动仪器同步采集多个传感器的超声波信号,记录信号到达时间差并结合传感器坐标,通过定位算法计算放电源位置,同时采用信号降噪技术过滤干扰、提取局部放电信号特征参数以区分放电类型、提升定位准确性,测试中保持环境安静避免外界干扰,测试后交叉验证定位结果并结合其他试验数据确认放电源情况。

3.4 在线监测与大数据分析

该技术可实现变压器运行状态的实时监控与精准评估,需在变压器关键部位安装温度、电流、局部放电、绝缘油状态等多类传感器,实现多参数实时采集。通过搭建数据传输网络,将采集到的实时数据稳定安全地传输至监控中心,避免数据丢失或延迟,同时构建大数据分析平台,整理分析采集数据并提取状态特征参数、建立评估模型,实现设备健康状态实时评估,通过设置异常数据预警阈值实现自动预警,定期维护平台、优化算法以提升评估精准度。

3.5 数字孪生技术

该技术通过虚拟仿真实现变压器故障预测,核心是基于变压器设计参数、结构尺寸及材质特性,构建与实体设备一致的数字孪生模型。将在线监测的实时数据及历史试验数据输入模型,通过虚拟仿真模拟不同工况下设备的状态变化,还原故障发生发展全过程,结合故障

机理与仿真数据构建预测模型,分析模型运行参数以预判潜在故障类型、发生时间及严重程度,定期更新模型数据并融入检修、故障处理信息,结合人工智能优化仿真与预测精度,实现设备全生命周期管控^[3]。

4 基于故障类型的试验策略优化

4.1 绝缘故障的针对性试验组合

针对绝缘故障,优化试验组合聚焦油纸绝缘综合评估,核心要点如下:(1)整合绝缘电阻、介损、极化指数测试,搭配绝缘油色谱分析、油中水分测试,全面评估绝缘状态,避免单一试验局限。(2)优化试验时序与参数,先进行非破坏性试验再开展针对性检测,合理调整电压、时长,减少二次损伤,优化测试频率提升老化识别精度。(3)完善数据融合分析,关联比对不同试验数据,排除偏差,结合老化机理精准判断故障程度与趋势。(4)优化试验前后处理,试验前充分放电、清洁设备、规范环境,试验后做好防潮防尘,记录数据为后续维护提供依据。

4.2 机械故障的非破坏性检测方案

针对机械故障,优化非破坏性检测方案,核心要点如下:(1)采用振动检测与FRA联合模式,弥补单一方法不足,精准识别定位故障,避免破坏性检测损伤设备。(2)优化检测点位布置,结合设备结构在绕组、铁芯、油箱关键部位布置传感器与测试接线端,减少检测盲区。(3)优化信号处理与分析算法,对振动信号降噪滤波,提取故障特征频率,结合FRA曲线构建联合分析模型,精准区分故障类型。(4)优化检测周期与判定标准,根据运行负荷、年限调整周期,结合出厂与历史数据完善阈值,避免误判漏判^[4]。

4.3 过热故障的多参数关联诊断

针对过热故障,优化多参数关联诊断策略,核心要点如下:(1)构建温度、油中特征气体、运行负载三参数联动体系,同步采集多维度数据,实现综合诊断。(2)优化采集精度,选用高精度传感器与检测设备,优化负载数据采集频率,捕捉负荷波动与过热的关联性。(3)优化关联分析逻辑,建立联动模型,明确不同负载工况下温度与气体含量的对应关系,精准判断故障位置、类型及严重程度,排除正常温升干扰。(4)优化预警机制,设置合理预警阈值,数据超标时及时预警,调整检测频次跟踪故障趋势。

4.4 放电故障的定位与严重程度分级

针对放电故障,优化定位精度与分级策略,核心要点如下:(1)整合超声波与特高频局放检测技术,优化定位算法,结合放电源特征信号,精准定位故障位置。(2)优化局放模式识别,提取不同类型放电故障的特征参数,构建识别模型,精准区分故障类型。(3)完善严重程度分级标准,结合信号幅值、放电频次、定位结果,分为轻微、中度、严重三级,制定差异化检测处理策略。(4)优化检测流程,先全局检测确认故障存在,再精准定位与模式识别,结合分级确定处理方案,提升效率。

4.5 外部因素故障的预防性试验设计

针对外部因素故障,优化预防性试验设计,核心要点如下:(1)结合运行环境,设计针对性环境适应性测试方案,重点开展防潮、防尘、防腐蚀、抗雷击等试验,排查隐患。(2)优化环境模拟方式,模拟高温、高湿、粉尘等工况,测试部件耐受性能,结合实际调整试验强度与时长。(3)优化试验周期,根据环境恶劣程度调整周期,恶劣环境增加频次,重点检测防护设施与绝缘状态。(4)完善试验后防护优化,根据试验结果优化防护措施,更新数据,结合环境变化动态调整试验方案,提升有效性^[5]。

结束语:本文围绕变压器故障原因与试验策略展开系统分析,明确了五类典型故障的特征,剖析了设计制造、运行维护等多方面根源性原因,阐述了先进试验技术的应用要点,并优化了针对性试验策略。研究成果可有效提升变压器故障诊断与防控的精准度和效率。未来可进一步结合智能技术优化故障预测模型,完善全生命周期运维体系,弥补现有研究不足,为工业领域变压器安全稳定运行提供更全面、高效的技术支撑。

参考文献:

- [1]李松,尹晓辉.高温环境下变频器故障原因分析及应对策略[J].海洋工程装备与技术,2025,12(2):55-58.
- [2]田冲,曹洁玲.变压器故障原因与试验策略分析[J].电子技术,2024,53(12):190-191.
- [3]邢春琛,薛文杰.电气试验技术在变压器故障分析中的应用[J].集成电路应用,2023,40(9):206-207.
- [4]洪刚,刘超,陈战.一起110kV主变压器跳闸故障事件分析与防范措施[J].广西电力,2024,47(6):45-48.
- [5]郑玉平,潘书燕,柴济民,等.新一代调相机变压器组启机过流保护误动作原因及对策[J].电力系统自动化,2022,46(5):105-111.