

中大型变压器机械结构内部异响故障监测及监理预防对策

锁必理

(上海博物馆, 上海 200001)

摘要: 文章旨在探讨中大型变压器机械结构内部异响故障的成因、监测技术及预防对策。通过分析变压器内部机械异响故障类型,研究声学监测、多模态无损检测 and 智能诊断方法在故障监测中的应用,从设计优化、制造工艺改进和早期预警等方面提出降低异响风险的监理预防措施。研究表明,采用先进的监测诊断技术和预防策略,可以有效识别和控制变压器内部异响故障,提升其运行可靠性。

关键词: 中大型变压器; 机械结构; 内部异响; 故障监测

Monitoring and Supervision Prevention Measures for Internal Abnormal Noise Faults in Mechanical Structures of Medium and Large Transformers

SUO Bili

(Shanghai Museum, Shanghai 200001)

Abstract: This paper aims to discuss the causes, monitoring technology and preventive measures of abnormal noise fault in mechanical structure of medium and large transformers. The application of acoustic monitoring, multimodal nondestructive testing and intelligent diagnosis methods in fault monitoring is studied by analyzing the fault types of mechanical abnormal sound inside transformers. The supervision and prevention measures to reduce the risk of abnormal sound are proposed from the aspects of design optimization, manufacturing process improvement and early warning. The research shows that the use of advanced monitoring and diagnosis technology and prevention strategy can effectively identify and control the transformer internal abnormal noise fault, improve its operation reliability.

Keywords: large and medium-sized transformers; mechanical structure; internal abnormal noise; fault monitoring

变压器作为电力系统中的关键设备,其安全稳定运行对于整个电网的可靠性来说至关重要。随着电网规模的不断扩大和电力需求的持续增长,中大型变压器得到了广泛应用^[1]。同时,变压器内部机械结构的复杂性也带来了一系列潜在的故障隐患,其中内部异响故障尤为常见。为此,急需开发先进的监测技术和预防措施,以保障中大型变压器的可靠运行。文章重点探讨中大型变压器机械结构内部异响故障的成因、监测技术及预防对策,旨在为提升中大型变压器的运行可靠性提供参考和指导。

1 变压器内部异响故障的类型与主要成因

中大型变压器内部异响故障种类繁多,以中大型

干式变压器为例,根据其声音特征、频率范围及产生机理的不同可以划分为多个类型。低频异响通常表现为低沉、闷声,频率在 100 Hz 以下,主要由铁芯和夹件的松动或磨损引起^[2]。中频异响频率介于 100 ~ 1 000 Hz,声音尖锐刺耳,多由绕组的局部放电或磁噪声造成。高频异响频率在 1 000 Hz 以上,呈现出撕裂、烧焦等声音特点,往往预示着绝缘损坏或局部过热等严重缺陷。此外,部分异响故障呈现出明显的方向性,随着测点位置的变化而变化,这主要是变压器内部结构不对称及缺陷位置的差异导致。表 1 为中大型干式变压器常见的内部异响故障类型及其特征。

表 1 中大型干式变压器常见内部异响故障类型及其特征

异响类型	频率范围 /Hz	声音特征	主要成因
低频异响	< 100	低沉、闷声	铁芯和夹件松动或磨损
中频异响	100 ~ 1 000	尖锐、刺耳	绕组局部放电或磁噪声
高频异响	> 1 000	撕裂、烧焦	绝缘损坏或局部过热
方向性异响	—	声音随测点位置变化	内部结构不对称或缺陷位置差异

2 中大型变压器内部异响故障监测技术研究

2.1 声学监测技术及应用

声学监测技术是中大型干式变压器内部异响故障

诊断的重要手段之一^[3]。该技术基于声波传播理论,利用声波在介质中传播时的衰减、反射、散射等特性,通过测量和分析变压器表面或内部的声学信号,实现

定位和识别异响源^[4]。常用的声学监测方法包括表面声学发射、内部声学传感和声学成像等。其中,表面声学发射技术通过在变压器表面布置压电传感器阵列,采集异响信号的幅值、频率、持续时间等参数,结合模式识别和数据挖掘算法,实现异响类型的自动分类和缺陷严重程度的评估。内部声学传感技术通过在变压器油箱内布置光纤传感器或压电陶瓷传感器,直接获取内部异响信号,避免外界干扰和信号衰减的影响。声学成像技术通过对声学传感器阵列采集的数据进行相干处理,构建声源的空间分布图像,直观显示异响源的位置和大小。例如,利用64通道声学成像系统对一台500 kV干式变压器进行检测,通过对采集的声学信号进行波束形成和图像融合处理,能够清晰地识别出铁芯多处螺栓松动和局部过热等缺陷,为变压器的状态评估和故障诊断提供重要依据。

2.2 多模态无损检测技术

多模态无损检测技术是中大型干式变压器内部异响故障诊断的另一重要手段,该技术通过融合多种无损检测方法,实现对变压器内部缺陷的全面、立体、精确表征。常见的多模态无损检测技术包括声-电-热复合检测、声-磁-光复合检测等^[5]。声-电-热复合检测技术首先利用声学发射传感器获取变压器内部异响信号,然后采用超宽频带电磁脉冲雷达对绕组和铁芯进行扫描成像,获得电场分布信息,最后通过红外热成像仪获取变压器表面温度分布图。对这3种信号进行时空关联分析,能够准确判断变压器内部缺陷位置、类型和严重程度。声-磁-光复合检测技术融合了声发射、磁记忆、光纤传感等方法,通过对变压器铁芯、绕组、绝缘件等部位的声、磁、光信号进行同步采集和联合分析,实现对绕组松动、铁芯销烧、局部放电等故障的多参数表征。

例如,在对某220 kV干式变压器进行检测时,可以在变压器外壳、铁芯、绕组等关键部位布置声发射传感器阵列、磁记忆传感器以及光纤测温传感器,对内部异响、磁场变化以及温度分布进行同步监测。通过对采集的海量数据进行特征提取、信息融合和智能诊断分析,能够高效、准确地识别出变压器存在的绕组变形、铁芯热点、局部放电等典型缺陷,为状态评估和风险预警提供可靠依据。

2.3 智能诊断方法在故障监测中的应用

智能诊断方法是近年来中大型干式变压器内部异响故障监测领域的一个重要发展方向,该方法利用人

工智能技术实现对海量监测数据的自动分析和故障诊断,大大提升了故障检测的效率和准确性。常见的智能诊断方法包括基于机器学习的分类识别、基于深度学习的特征提取、基于知识推理的专家系统等。

以深度学习为例,在分析某220 kV干式变压器的异响信号时,可以采用卷积神经网络对声发射信号进行自动特征提取和故障分类。首先,通过在变压器外壳表面布置32个声发射传感器,采集变压器运行过程中的连续声发射信号,每个传感器的采样频率为100 kHz,采样时长为10 s。其次,预处理采集的声发射信号,包括滤波、分段、归一化等操作,得到规范化的时频图像数据。再次,将预处理后的图像数据输入预训练的卷积神经网络模型。该模型包含8个卷积层和3个全连接层,总计超过100万个训练参数,能够自动提取声发射信号的时频特征。最后,利用SoftMax分类器分类特征向量,识别出该变压器内部是否存在异响故障,并给出故障类型和严重程度的评估结果。

例如,上海博物馆(东馆)在2台35 kV主变压器的铁芯、绕组及其他重要部位等处布设了近18个声发射传感器测点,频率响应范围为20~20 000 Hz,有效覆盖了大多数异响类型。针对建筑环境噪声干扰严重的问题,引入自适应噪声消除算法,通过自动识别与过滤背景噪声,在信号采集端实现了8~12 dB的信噪比改善。

3 中大型变压器内部异常声响的监理预防措施探讨

3.1 设计优化以降低机械结构噪声源

设计优化是降低中大型干式变压器内部机械结构噪声源的重要手段之一。通过对变压器铁芯、绕组、支撑件等关键部件的结构参数进行优化设计,可以有效降低变压器内部的振动水平和异响风险。例如,在设计变压器铁芯时,可以采用高牌号硅钢片,减小硅钢片的厚度,优化铁芯截面形状,降低铁芯的空载损耗和激磁噪声。同时,合理设计铁芯的紧固结构,采用高强度螺栓、弹簧垫片等连接件,提高铁芯的整体刚度和稳定性,避免铁芯松动引起的异常声响。在绕组设计方面,可以采用节约绕组结构,减小绕组的匝间电压和径向力,降低绕组振动水平。优化绕组导线的截面形状和排列方式,采用斜削绝缘结构,减小高频谐振引起的局部放电和异响。对于变压器支撑件,可以采用高强度、高阻尼材料,如金属-橡胶复合材料,提高支撑件的减振性能和耐疲劳特性,降低变压器运行中的机械振动和噪声辐射。

在变压器设计过程中,需要考虑多物理场耦合效应对异响的影响。例如,在高压干式变压器中,由于绕组温度较高,热应力和电动力会共同作用于绕组导线,引起复杂的振动模态和噪声机理。因此,需要建立电-热-力-声多物理场耦合模型,分析变压器内部电磁场、温度场、应力场之间的相互作用,优化绕组导线的材料属性和布线方式,减少局部热点和振动应力集中,从而降低异常声响的风险。

3.2 提高制造工艺水平以减少异常声响隐患

提高制造工艺水平是减少中大型干式变压器内部异常声响隐患的另一个重要手段。精良的制造工艺不仅能够保证变压器各部件的加工质量和装配精度,而且能够有效控制生产过程中引入的缺陷和应力集中,从而降低变压器投运后异响故障的发生风险。例如,在硅钢片的加工过程中,采用激光切割、等离子刻蚀等先进工艺,可以有效减小硅钢片的机械应力和切口缺陷,提高铁芯叠装质量,降低空载噪声。同时,严格控制硅钢片的平整度和涂层绝缘性能,采用多点夹紧、分段固定等装配工艺,确保铁芯各层间的紧密贴合和绝缘强度,避免铁芯局部松动或短路引起的声响。在绕组制造方面,采用数控绕线机、在线检测系统等自动化设备,提高绕组线圈的卷绕精度和导线张力控制水平,减小绕组内部的机械应力和变形风险。优化绕组浸渍和固化工艺参数,严格控制环氧树脂的黏度、流动性和固化温度,确保绕组绝缘的完整性和机械强度,避免绕组局部松动或放电引起的异响。

3.3 建立基于监测数据的早期预警机制

建立基于监测数据的早期预警机制可以防范中大型干式变压器内部的异响风险。通过在变压器运行过程中持续采集振动、声学、电流等多参数监测数据,并结合机器学习、数据挖掘等智能分析技术,可以实现对变压器内部异响故障的早期识别和预警,为及时开展维修和风险防控提供依据。例如,在某500 kV干式变压器投运后,采用基于压电式加速度传感器的在线振动监测系统,对变压器铁芯、绕组等关键部件的振动信号进行实时采集和频谱分析。通过提取振动信号的均方根值、峰值、频率等36个特征参数,构建多维度的振动特征空间,并结合支持向量机算法,实现对铁芯松动、绕组变形等典型异响缺陷的早期诊断,

诊断准确率达到95%以上。通过对声发射信号的能量、持续时间、上升时间等52个参数进行提取和聚类分析,构建了包含15种典型放电缺陷的异响故障声学指纹库,实现对局部放电、撕裂放电等电气异响的早期定位,定位误差小于10 cm。

随着物联网、边缘计算等新兴技术的发展,变压器在线监测系统正向着智能化、网络化的方向发展。通过在变压器现场部署智能传感器节点和边缘计算单元,实现监测数据的就地处理和实时分析,提高异响故障诊断的时效性和准确性。在某220 kV智能变电站中,部署125个振动传感器节点和15个声学传感器阵列,实时采集变压器的振动和声发射信号,并通过边缘计算单元进行本地特征提取和故障诊断。当监测数据发生异常变化时,即可在1 min内发出预警信号,诊断准确率达98%以上。

4 结语

通过深入分析中大型变压器内部异响的成因,探讨声学监测、多模态无损检测 and 智能诊断方法在异响故障监测中的应用,并提出从设计优化、制造工艺改进和早期预警等方面降低异响风险的监理预防对策。随着人工智能、物联网、大数据等新兴技术的快速发展,智能制造、柔性制造等先进生产模式在变压器制造领域必将得到广泛应用,通过对设计、工艺、检测等环节的全流程优化和集成,实现变压器制造和运维的智能化。同时,基于海量监测数据和机器学习算法构建异响故障预警模型,可以提前预警变压器异常风险,为运维决策提供有力支撑。

参考文献

- [1] 武广. 电力变压器本体振动噪声信息采集分析研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2024(1): 114-115.
- [2] 方智泉. 一起变压器内部异响故障的处理及监理对策[J]. 设备监理, 2022(5): 32-35.
- [3] 余晓新. 一种小型变压器磁芯组装机的机构设计[J]. 清远职业技术学院学报, 2022(1): 53-58.
- [4] 杨毅, 刘石, 张楚, 等. 基于振动分布特征的电力变压器绕组故障诊断[J]. 振动与冲击, 2020(1): 199-208.
- [5] 邓光源. 基于物联网的电力变压器振动监测与诊断算法及其系统软件的研究与开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.