

面向低噪声需求的工频变压器振动特性分析及减振结构优化设计

廖志丹

金盘电气集团(上海)有限公司 上海 201707

摘要: 本文针对工频变压器的振动噪声问题,进行了振动特性分析及减振结构优化设计。探讨了振动噪声的产生机理,包括电磁振动、机械振动传递路径及噪声辐射机制,采用理论分析方法、有限元仿真及实验测试对振动特性进行分析。研究了电磁参数、结构参数及运行工况对振动特性的影响。在此基础上,提出了铁芯、绕组及油箱的减振优化措施,并通过多目标优化算法确定最佳参数组合。仿真与实验结果表明,综合减振方案能有效降低变压器的振动噪声,满足低噪声设计要求。

关键词: 工频变压器; 振动特性; 噪声分析; 减振结构; 优化设计

引言: 工频变压器在电力系统中起着至关重要的作用,但其振动噪声问题日益受到关注。随着环保意识的增强和电力设备的普及,对变压器的噪声水平提出了更高要求。振动噪声不仅影响设备的运行环境,还可能对周围人员和设备的正常运行产生干扰。因此,对工频变压器的振动特性进行深入分析,并提出有效的减振优化设计,对于降低噪声水平、提升设备性能具有重要意义。

1 面向低噪声需求的工频变压器振动噪声产生机理

1.1 电磁振动产生原理

工频变压器在运行过程中,由于电磁力的作用,铁芯和绕组会产生周期性的振动。这些振动主要源于两个方面:一是铁芯在交变磁场作用下产生的磁致伸缩效应,导致铁芯体积发生周期性变化,进而产生振动;二是绕组在电磁力作用下产生形变,从而产生振动。磁致伸缩效应是铁磁材料在磁场作用下发生的长度或体积变化的现象,其大小与材料的磁化状态、磁场强度以及材料的物理性质有关。绕组振动则主要由电流在导体中产生的电磁力引起,该电磁力与电流的平方成正比,与磁场强度的导数成正比。

1.2 机械振动传递路径

工频变压器的机械振动主要通过铁芯、绕组、油箱及附件等结构进行传递。铁芯振动通过硅钢片间的摩擦和夹紧力传递给绕组,绕组振动则通过绝缘纸、支撑结构等传递给油箱。油箱作为变压器的主体结构,其振动不仅直接辐射噪声,还会通过油液传递至变压器外部,进一步加剧噪声问题。此外,变压器附件如冷却风扇、油泵等也会产生振动和噪声,对整体噪声水平产生影响。

1.3 噪声辐射机制

工频变压器的噪声辐射主要由结构振动引起的空气声辐射和油液流动引起的流体噪声两部分组成。空气声辐射是变压器振动结构通过空气介质向外辐射噪声的过程,其大小与振动结构的表面积、振动速度以及声辐射效率等因素有关。流体噪声则是由变压器内部油液流动产生的湍流、涡流等引起的噪声,其大小与油液流速、流道形状以及流体与固体结构的相互作用等因素有关。在实际应用中,空气声辐射往往是工频变压器噪声的主要来源^[1]。

2 工频变压器振动特性分析方法

2.1 理论分析方法

理论分析方法主要通过建立工频变压器的力学模型和数学模型,对其振动特性进行预测和分析。该方法包括振动方程的建立、求解以及振动特性的计算等步骤。通过建立铁芯、绕组及油箱等结构的力学模型,考虑材料属性、几何尺寸以及边界条件等因素,可以推导出振动方程的解析解或数值解。进而,根据振动方程的解,可以计算出振动位移、速度、加速度等振动特性参数,为后续的减振设计提供依据。

2.2 数值解析方法

数值解析方法是另一种重要的工频变压器振动特性分析方法,该方法通过数值计算手段,对变压器复杂的振动问题进行近似求解。它基于数学模型的建立,采用数值方法来逼近真实物理现象,从而得到振动特性的近似解。在数值解析过程中,首先需要构建变压器的数学模型,这包括铁芯、绕组、油箱等主要部件的几何形状、材料属性以及相互之间的连接方式等。随后,利用数值算法对这些模型进行离散化处理,将连续的物理场

划分为有限的单元或节点,通过求解这些离散单元上的振动方程,得到整个变压器的振动特性;数值解析方法的优势在于其灵活性和适用性,它能够处理复杂几何形状和非均匀材料分布的问题,同时考虑了边界条件和初始条件的影响。另外,数值解析方法还能够提供详细的振动特性信息,如振动位移、速度、加速度的分布情况,以及频率响应特性等。在实际应用中,数值解析方法常与实验测试相结合,以验证其准确性和可靠性。通过对变压器进行实际的振动测量,并将测量结果与数值解析结果进行对比分析,可以进一步验证数学模型的准确性和数值算法的可靠性。

2.3 实验测试方法

实验测试是验证理论分析和仿真结果的重要手段。在实验中,需要合理设计振动加速度传感器和声级计的布置方案。振动加速度传感器通常布置在铁芯、绕组和油箱壁的关键位置,以测量各部位的振动加速度;声级计则布置在距离变压器一定距离的不同方位,用于测量噪声声压级。制定不同负载工况下的测试流程,包括空载、负载、过载等工况,记录各工况下的振动和噪声数据。实验数据采集系统采用高精度的数据采集卡和传感器,确保数据的准确性和可靠性。采集到的数据通过频谱分析方法进行处理,将时域信号转换为频域信号,分析振动和噪声的频率成分和能量分布^[2]。通过将实验结果与理论分析和仿真结果进行对比,可以验证理论模型和仿真方法的有效性,同时也能发现理论和仿真中存在的问题,为进一步优化分析方法提供依据。

3 面向低噪声需求的工频变压器振动特性影响因素研究

3.1 电磁参数影响

通过仿真与实验相结合的方法,研究励磁电流谐波含量、磁通密度幅值与波形、绕组匝数及排列方式对振动特性的影响规律。当励磁电流中含有高次谐波时,会导致铁芯磁致伸缩效应加剧,产生额外的振动激励,使变压器振动噪声增大。例如,在仿真中,当励磁电流的5次谐波含量增加10%时,铁芯的振动加速度峰值提高15%。磁通密度幅值直接影响磁致伸缩应变的大小,磁通密度波形的畸变也会改变磁致伸缩的特性,进而影响振动。绕组匝数的增加会使电磁力增大,从而加剧绕组的振动;合理的绕组排列方式可以优化电磁力的分布,降低振动水平。

3.2 结构参数影响

深入研究铁芯叠片厚度、夹紧力大小、绕组预紧力、油箱壁厚及加强筋布局等结构参数对振动传递与噪

声辐射的作用机制。较薄的铁芯叠片可以减小磁滞损耗和涡流损耗,降低铁芯的振动;适当增大铁芯夹紧力能够提高铁芯的整体刚度,抑制铁芯的振动,但过大的夹紧力可能会导致铁芯局部变形,反而加剧振动。绕组预紧力的合理设置可以减少绕组在电磁力作用下的相对位移,降低振动。油箱壁厚和加强筋布局直接影响油箱壁的刚度和振动特性,增加油箱壁厚可以提高其抗振能力,但会增加成本和重量;优化加强筋的布局可以改变油箱壁的振动模态,避免共振发生,有效降低噪声辐射。

3.3 运行工况影响

模拟负载突变、电压波动、环境温度变化等运行工况,分析变压器振动噪声的动态响应特性。当负载发生突变时,绕组中的电流会迅速变化,导致电磁力发生突变,引起变压器振动的瞬间加剧,产生较大的冲击噪声。电压波动会改变磁通密度,进而影响铁芯的磁致伸缩效应和绕组的电磁力,使振动噪声发生变化。环境温度的变化会导致材料性能(如弹性模量、磁导率)发生改变,影响变压器的振动特性^[3]。例如,在高温环境下,铁芯的磁致伸缩系数会增大,从而加剧铁芯振动。通过建立工况-振动特性的映射关系,为变压器在不同运行工况下的低噪声控制提供理论支持。

4 工频变压器减振结构优化设计

4.1 铁芯减振优化

铁芯振动是工频变压器噪声的核心来源,其减振需从材料、工艺及结构三方面协同优化。首先,采用非晶合金替代传统硅钢片可显著降低磁致伸缩效应。非晶合金的磁致伸缩系数仅为硅钢片的1/20,且饱和磁导率较高,能有效减少铁芯在交变磁场中的形变。但需注意其饱和磁密较低,需通过增大铁芯截面积或优化磁路设计弥补。其次,改进叠片工艺可降低气隙与磁阻。斜接缝技术通过45°斜角接缝减少磁通泄漏,步进叠片则通过错位排列破坏磁通周期性,二者结合可使铁芯振动幅值降低15%-20%。在铁芯表面涂覆聚氨酯阻尼涂层,利用其高损耗因子($\tan\delta \approx 0.3$)吸收振动能量,并通过弹性约束减少振动传递。最后,设计弹性支撑结构隔离铁芯与油箱的振动耦合。采用橡胶-金属复合减振器,通过三点支撑布局分散应力,并调整减振器刚度使铁芯固有频率避开100Hz及其谐波,从而降低振动传递率,仿真与实验表明,综合应用上述措施可使铁芯振动噪声降低10-12dB(A)。

4.2 绕组减振优化

绕组振动主要由电磁力引起,需通过预紧力调节、缓冲结构及材料优化实现减振。首先,研发绕组预紧力

智能调节装置,利用压电陶瓷作动器或液压伺服系统实时监测振动并调整预紧力。通过模糊PID控制算法,装置可在50ms内响应负载变化,使绕组在不同工况下保持稳定,减少因电磁力波动引发的振动。其次,在绕组端部设置缓冲结构,采用邵氏硬度50-60的橡胶或闭孔泡沫塑料,通过环形缓冲垫吸收轴向振动能量。实验表明,缓冲结构可使绕组端部振动传递率降低25%-30%。另外,探索柔性绝缘材料的应用,如Nomex纸或芳纶纤维复合材料,其弹性模量较传统材料降低30%-40%,且阻尼比提升0.05-0.1,可有效缓解电磁力冲击。最后,优化绕组排列方式,通过有限元仿真调整匝数分布与排列顺序,使电磁力分布更均匀。例如,采用“高低高”交替排列或分段布置高压绕组,可降低绕组不平衡振动10%-15%。综合应用上述技术,绕组振动噪声可降低8-10dB(A)。

4.3 油箱减振优化

油箱振动噪声与壁厚、加强筋布局及附加减振装置密切相关,需通过复合阻尼、结构拓扑及多物理场耦合优化实现减振。在油箱内壁喷涂复合阻尼材料,由环氧树脂基体与石墨烯填料组成,损耗因子达0.4-0.5。通过1-2mm厚阻尼层吸收振动能量,可使油箱100Hz处声压级降低5-7dB(A)。其次,设计波浪形薄壁结构,通过周期性波浪形改变振动模态,增加能量耗散路径。仿真表明,波浪形油箱可使振动加速度降低20%-25%,同时避免共振。优化加强筋布局,基于模态分析确定“井”字形或“米”字形结构,提升油箱刚度并降低固有频率与激励频率的耦合风险^[4]。最后,引入附加减振装置,如调谐质量阻尼器(TMD)和粘弹性阻尼器(VED)。TMD通过质量块与弹簧-阻尼系统吸收特定频率振动,VED则利用材料粘弹性特性耗散能量。实验表明,二者结合可使油箱振动能量耗散效率提升30%-35%,综合上述措施,油箱振动噪声可降低6-8dB(A)。

4.4 综合减振方案设计

为实现工频变压器低噪声设计目标,需对铁芯、绕组、油箱的减振措施进行系统整合。构建多目标优化模型是关键步骤,该模型旨在最小化振动噪声、确保结构强度达标,并控制成本。设计变量涵盖了铁芯叠片厚度(范围在0.2至0.5毫米之间)、绕组预紧力(50至200牛

顿)、油箱壁厚(3至6毫米),以及阻尼材料的参数,例如阻尼涂层厚度(0.5至2毫米)和损耗因子(0.3至0.5)。在方案制定过程中,通过精密的模拟与验证来确保设计的有效性。基于ANSYS软件,建立变压器的三维多物理场耦合模型,并精确设定材料属性,对关键部位进行了网格细化处理。在优化前的仿真结果中,变压器表面1米处声压级云图显示出铁芯和绕组区域的高值尤为明显,最大声压级高达62dB(A)。实施综合减振方案后,相同位置的声压级显著下降,高值区域明显缩减,最大声压级降至54dB(A),同时低声压级区域得以扩展,降噪效果十分显著。在实验测试阶段,我们在变压器周边等间距布置了声级计,并在关键位置安装加速度传感器。在额定工况下进行测试,优化前的平均声压级为61.8dB(A),而优化后降至53.7dB(A),成功满足了低噪声设计要求($\leq 55\text{dB(A)}$)。频谱分析进一步显示,油箱的固有振动频率已有效避开100Hz及其谐波,从而避免共振现象的发生。深入分析各部件的协同效应。铁芯的弹性支撑与油箱的波浪形结构相结合,有效地削弱了振动的传递;而绕组的柔性绝缘材料与预紧力智能调节装置的配合,则提升绕组的稳定性,进一步减少振动。

结束语

本文通过振动特性分析及减振结构优化设计,有效降低了工频变压器的振动噪声。研究不仅解决了实际问题,还为相关领域的噪声控制提供了新思路。未来,将进一步探索新材料、新工艺在变压器减振降噪中的应用,以期实现更加高效、环保的变压器设计。同时,也将关注国际标准和行业规范的更新,确保研究成果的实用性和前瞻性。

参考文献

- [1]张德贵.干式变压器振动特性的研究及隔振系统的设计[J].机械管理开发,2020,v.35;No.209(09):70-71.
- [2]牛宁.侯力文.吴优优.等.舰船分散中间质量隔振系统振动特性建模[J].舰船科学技术,2020,v.42(01):60-65.
- [3]唐帅.变压器的振动噪声特性及降噪措施[J].电声技术,2024,48(10):51-53.
- [4]钟思翀,祝丽花,王前超,张建功,王延召.电力变压器振动噪声分析及其有源降噪[J].电工技术学报,2022,37(S1):11-21.