

整流变压器阀侧绕组结构优化 降低杂散损耗技术方案研究

孙涛, 郭朋英, 祖鹤琼

(辽宁华冶集团发展有限公司, 辽宁鞍山 114000)

摘要 在工业整流系统中, 整流变压器阀侧绕组杂散损耗偏高的问题严重影响设备运行效率与能耗水平。为降低阀侧绕组杂散损耗, 本研究以漏磁通调控与电磁结构优化为核心, 从导线结构、绕制方式、排布间距及屏蔽结构四个维度开展阀侧绕组结构优化设计, 通过仿真建模、损耗计算分析完成方案验证, 并经样机试制与实测量化损耗改善效果。研究表明, 所提结构优化方法可有效调控阀侧绕组漏磁通分布, 显著降低杂散损耗, 同时保障变压器谐波抑制、阻抗匹配等核心电磁性能, 为整流变压器杂散损耗抑制提供了技术方案参考。

关键词 整流变压器; 阀侧绕组; 结构优化; 杂散损耗

中图分类号: TM4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.004

0 引言

工业整流系统的稳定高效运行对工业生产至关重要。整流变压器作为系统核心换能设备, 其损耗特性直接影响整机能耗与运行效率。阀侧绕组作为整流变压器的低压大电流绕组, 受漏磁通分布畸变、电磁耦合作用显著等因素影响, 易产生大量杂散损耗, 成为制约变压器节能降耗的关键环节。当前针对整流变压器的损耗优化多聚焦整体结构, 针对阀侧绕组杂散损耗的针对性结构优化研究仍有待深入。本文围绕整流变压器阀侧绕组开展结构优化设计研究, 通过多维度结构优化调控漏磁通分布, 实现杂散损耗的有效降低, 为整流变压器的节能设计提供技术参考。

1 整流变压器阀侧绕组杂散损耗问题剖析

1.1 阀侧绕组杂散损耗的形成机制

阀侧绕组杂散损耗是变压器运行过程中, 泄漏磁通在绕组本体及周边金属结构件中感应生成的涡流损耗。绕组通电运行时形成工作主磁通, 其中一部分磁通无法沿铁心闭合形成有效磁路, 转而成为漏磁通, 持续切割绕组导线、夹件、油箱等金属构件, 在构件内部激发感应电动势并形成涡流, 最终以热能形式向外耗散^[1]。漏磁通的空间分布特征直接决定杂散损耗的产生位置与数值大小, 阀侧绕组作为整流变压器的低压大电流部件, 导线电流密度显著偏高, 其绕制结构与空间布局易造成漏磁通局部聚集。此外, 该绕组与金属结构件间距较小, 磁耦合强度更高, 进一步加

剧涡流效应, 进而形成明显的杂散损耗。其损耗数值与漏磁通密度的平方、感应频率均呈正相关关系, 且随两者的升高呈现快速增大的趋势。

1.2 阀侧绕组杂散损耗的影响因素

阀侧绕组杂散损耗的影响因素聚焦漏磁通分布与金属部件电磁特性, 绕组结构参数是核心影响因子。导线截面尺寸、宽厚比直接影响电流集肤效应与邻近效应, 进而改变绕组内部漏磁通的分布状态。绕制方式决定绕组空间排布形态, 饼式与层式绕制的漏磁通路径差异明显, 绕制节距与饼间间隙的变化会导致漏磁通在绕组端部与饼间集中。绕组轴向高度、辐向宽度与变压器铁心的配合尺寸, 直接关联漏磁通磁路磁阻, 磁阻越小则漏磁通密度越高。阀侧绕组与金属夹件、油箱的相对位置, 以及结构件材质的磁导率与电导率, 会改变漏磁通耦合效率与涡流损耗产生强度, 间距越小、结构件电导率越高, 杂散损耗越突出。

1.3 阀侧绕组杂散损耗的实测表征

阀侧绕组杂散损耗的实测表征依靠电磁测试手段获取损耗数值与分布特征, 测试过程依托变压器额定运行工况, 采用负载损耗分离法, 测量变压器总负载损耗, 计算分离绕组直流电阻损耗与涡流损耗, 剩余部分即为杂散损耗。红外热成像技术可实现杂散损耗的空间表征, 检测阀侧绕组及周边结构件的温度分布, 温度异常升高区域对应杂散损耗集中产生的位置, 温度差值可间接体现损耗大小。借助罗氏线圈与功率分

作者简介: 孙涛 (1966-), 男, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 电机与变压器。

析仪可检测阀侧绕组谐波电流与漏磁通密度,结合电磁感应定律计算杂散损耗实时数值,通过改变运行负载测试不同负载率下的损耗变化趋势,建立损耗与负载率的量化关系,实现对杂散损耗的全面实测表征。

1.4 阀侧绕组杂散损耗的问题症结

阀侧绕组杂散损耗的问题症结集中在绕组结构设计的固有缺陷与漏磁通的不可控分布^[2]。现有阀侧绕组设计多侧重满足电流承载能力,忽视绕组结构对漏磁通分布的调控,导线截面设计未充分考虑大电流下的集肤效应,宽厚比选取不合理,造成绕组内部漏磁通集中,加剧局部涡流损耗。绕组绕制的空间排布缺少对漏磁通路径的优化,端部绕组的漏磁通未做有效疏导,使得绕组端部与金属结构件磁耦合过强,形成损耗集中区域。绕组饼间、层间的绝缘间隙设计未结合漏磁通的磁路特性,间隙尺寸不合理使漏磁通在间隙处形成局部高密区。绕组与金属结构件的间距设计未考虑磁屏蔽效应,缺少针对性的空间阻隔措施,漏磁通大量耦合至结构件并转化为杂散损耗。绕组导线的换位设计不足,造成绕组各股导线电流分布不均,进一步加剧漏磁通的畸变与集中。

2 整流变压器阀侧绕组结构优化设计

2.1 阀侧绕组导线结构的优化选型

阀侧绕组导线结构的优化选型以抑制集肤效应和邻近效应、降低漏磁通耦合为核心,优先选用扁形铜导线并采用多股绞合的换位导线结构,导线截面尺寸根据阀侧绕组额定电流与允许电流密度精准设计,同时严格控制导线宽厚比在合理区间,兼顾导电性能与电磁特性。导线的轴向高度 m 与辐向宽度 n 需满足涡流损耗最小化的匹配关系,通过式(1)计算涡流损耗占比,以此迭代优化导线尺寸参数,确保 F_{ed} 处于低数值区间。

$$F_{ed} = \frac{15I^2 N^2 m^2}{1.07(100H)^2 J^2} \quad (1)$$

导线材质选用高电导率无氧铜,表面做绝缘涂层处理,涂层厚度根据绕组绝缘等级确定,既保证导线间的绝缘性能,又避免因涂层过厚增加绕组体积导致漏磁通分布畸变,实现导线结构与杂散损耗抑制的精准匹配。

2.2 阀侧绕组绕制方式的优化设计

阀侧绕组绕制方式的优化设计采用双饼连续式并联绕制结构,针对整流变压器阀侧大电流特性,合理设定并联饼数 M ,并通过饼间均流设计保证各并联饼的电流分布均衡,消除因电流不均引发的局部漏磁通集中。绕制节距的设计结合漏磁通路径优化,通过公式 $X_{kxy} = \omega(L_{x\sigma} + L_{y\sigma} - M_{xy\sigma} - M_{yx\sigma})$ 计算绕组间短路电抗,以此调控绕制节距使绕组漏感处于合理范围,避免漏感过大或过小导致杂散损耗增加。绕制过程中保证绕组

线匝的紧密性与规整性,绕组端部采用阶梯式收匝设计,替代传统平直式端部结构,疏导端部漏磁通的扩散路径,减少端部漏磁通与金属结构件的磁耦合,同时在绕制中预留饼间散热与绝缘间隙,兼顾电磁性能与热性能,提升绕制结构对杂散损耗的抑制效果。

2.3 阀侧绕组排布间距的优化设定

阀侧绕组排布间距的优化设定围绕绕组间漏磁通分布调控展开,包括阀侧绕组与铁心、滤波绕组的径向间距,以及绕组饼间、层间的轴向间距,所有间距参数均以近似零等值漏阻抗为设计目标,通过式(2)计算绕组等值漏阻抗:

$$Z_{213} = \frac{Z_{k21} + Z_{k23} - Z_{k13}}{2} \quad (2)$$

迭代优化间距尺寸使:

$$|Z_{213}| \leq \frac{Z_{k21min}}{10} \quad (3)$$

铁心与阀侧绕组的径向间距选取 15 ~ 40 mm 区间的最优值,既避免间距过小导致铁心对绕组漏磁通的屏蔽作用过强引发局部损耗,又防止间距过大增加变压器体积且造成漏磁通扩散。阀侧绕组与滤波绕组的间距设计兼顾谐波屏蔽与杂散损耗抑制,通过调整间距改变漏磁通的磁路磁阻,使漏磁通尽可能沿绕组间预设路径闭合,减少向金属结构件的泄漏,饼间轴向间距根据绕组散热需求与漏磁通分布特性确定,实现间距参数与杂散损耗、滤波性能的协同优化^[3]。

2.4 阀侧绕组屏蔽结构的优化配置

阀侧绕组屏蔽结构优化采用磁屏蔽与电屏蔽复合配置,从磁路疏导与电场抑制两方面协同管控漏磁通。绕组端部与金属夹件间设置高磁导率硅钢片磁屏蔽层,其厚度依据漏磁通分布密度进行精细化设计,使端部集中的漏磁通沿屏蔽层形成闭合回路,有效阻断与金属夹件的直接磁耦合,进而削弱涡流生成条件。绕组与油箱间设置铜质电屏蔽层,经可靠接地处理后,利用其内部感应涡流抵消部分向外扩散的漏磁通,降低周边结构件损耗。电屏蔽层截面面积按感应电流大小合理确定,屏蔽层与绕组之间设置绝缘支撑结构,保证间距均匀、受力稳定^[4]。屏蔽整体空间布置与绕组排布形式相匹配,磁屏蔽层完整覆盖端部漏磁通集中区域,电屏蔽层以圆筒状包裹绕组径向外侧,两层屏蔽之间预留适当空气间隙,避免相互干扰引发附加电磁耦合损耗。该复合屏蔽结构可有效改变漏磁通传播路径,显著降低金属结构件中的感应涡流,实现对杂散损耗的高效抑制。整体设计充分兼顾变压器内部空间与整体布局,不影响绕组正常装配与后期检修维护,具备较强的工程实用性与推广价值。

3 整流变压器阀侧绕组结构优化损耗验证

3.1 优化方案的仿真模型搭建

优化方案的仿真模型搭建依托 Ansys Maxwell 3D 的 Magnetic Transient 瞬态求解器完成,建模过程参照整流变压器实际结构与几何参数开展。为提升计算效率与仿真精度,模型中仅保留铁心、绕组等核心电磁部件,省略垫块、绝缘纸、紧固件等对磁场分布影响较弱的辅助结构件,绕组部分采用圆环形导体进行等效近似处理,在保证精度的同时简化计算流程。仿真模型完整匹配阀侧绕组优化后的导线结构、绕制方式与排布间距参数,精准还原变压器三相四绕组拓扑结构与外部电路连接形式。仿真步长设置为 $10\ \mu\text{s}$,总仿真时长设定为 $80\ \text{ms}$,合理的时间参数配置可有效捕捉变压器内部动态电磁特性与瞬态变化规律。模型中阻抗、匝数、电流等关键参数均采用理论设计值,铁心材料选用宝钢 30Q120 硅钢片,磁滞系数与涡流损耗系数严格依照行业设计规范赋值,确保仿真模型的电磁特性、损耗分布与实际变压器保持高度一致。

3.2 杂散损耗的仿真计算分析

杂散损耗的仿真计算分析依托搭建的三维电磁仿真模型,通过磁场仿真获取阀侧绕组及周边金属结构件的漏磁通密度分布云图,提取不同位置的磁通密度与感应电流数据。杂散损耗计算遵循 IEEE Std C57.110 标准,先分离绕组直流电阻损耗与涡流损耗,再依据谐波影响因子计算杂散损耗,其中涡流谐波影响因子按式(4)计算:

$$H_{h-cd} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{h\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \right)^2 h^2}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{h\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \right)^2} \quad (4)$$

杂散谐波影响因子按式(5)计算:

$$H_{h-st} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{h\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \right)^2 h^{0.8}}{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(\frac{I_{h\text{rms}}}{I_{1\text{rms}}} \right)^2} \quad (5)$$

选取 31 次以下谐波为有效谐波参与运算。通过仿真计算分别获取优化前后阀侧绕组杂散损耗的数值与分布特征,定位损耗集中区域,为损耗改善效果的量化分析提供数据支撑。

3.3 优化样机的试制与测试

优化样机试制与测试依据仿真模型确定的优化参数展开,全过程遵循电力变压器设计制造规范与工艺要求^[5]。阀侧绕组按优化后的导线结构选型、绕制方式进行精密绕制,排布间距、屏蔽结构按理论设计值装配,确保样机物理结构与优化方案高度一致。样机在额定工况下完成全面性能测试,采用负载损耗分离法开展

杂散损耗测试,测量整机总负载损耗后,通过计算分离出直流电阻损耗与涡流损耗,得出阀侧绕组杂散损耗实测值。借助罗氏线圈与功率分析仪同步检测阀侧绕组谐波电流与漏磁通密度,利用红外热成像技术直观获取绕组及周边金属结构件温度分布,验证优化方案对损耗集中区域的改善作用。测试过程中同步记录阻抗电压、温升、电流密度等关键指标,全面校验样机运行稳定性,保障各项性能符合设计约束与工程应用要求,为结构优化效果的验证提供可靠试验依据。

3.4 杂散损耗的实际降低效果

杂散损耗的实际降低效果通过优化前后的损耗数据对比进行量化分析,提取仿真计算与样机实测中优化前后的阀侧绕组杂散损耗数值,计算损耗降低幅度与变化规律,对比损耗分布特征及区域差异,直观验证优化方案对损耗集中区域的改善作用。结合变压器整机总损耗数据,分析阀侧绕组杂散损耗降低对整机损耗水平与运行效率的影响,验证样机滤波性能,检测高压侧电流谐波畸变率变化,确保杂散损耗有效降低时,变压器谐波抑制、阻抗匹配等核心电磁性能保持稳定可靠。仿真数据与样机实测数据相互印证、互为支撑,精准量化表征优化方案对阀侧绕组杂散损耗的改善效果,验证结构优化设计的工程实用性与技术有效性,为同类整流变压器杂散损耗抑制与节能优化提供可复制、可推广的技术方案与设计参考。

4 结束语

整流变压器阀侧绕组杂散损耗偏高,通过导线结构、绕制方式、排布间距及屏蔽结构的多维度结构优化,可有效调控漏磁通分布,减少与金属结构件的电磁耦合,抑制杂散损耗的产生。仿真验证与样机实测表明,该方法在保障变压器阻抗匹配、谐波抑制等核心电磁性能的前提下,显著降低阀侧绕组杂散损耗,优化设计的合理性与工程可行性得到充分验证。相关优化思路与技术方法,可为整流变压器及同类电力设备的杂散损耗抑制提供参考,为电力设备节能降耗设计提供新的思路与方向。

参考文献:

- [1] 杜丽,蔡龙,张晓同,等.基于复合漏磁场的箔绕变压器负载损耗仿真计算[J].电气技术,2024,25(11):37-41,47.
- [2] 刘乾易,杨伊,刘芳,等.一种低损耗的感应滤波变压器结构参数分层设计方法[J].电工技术学报,2025,40(06):1695-1706.
- [3] 金承祥,李宁,王圳,等.变压器低压箔式绕组进出排模式性能分析与研究[J].变压器,2025,62(04):41-46.
- [4] 迟主升,王仁,罗振武,等.换流变压器阀侧绕组出线区域的电场仿真[J].机电工程技术,2021,50(08):177-180.
- [5] 杨在葆,梁红胜,刘永,等.换流变压器阀侧交流外施耐压试验故障的分析与判断[J].变压器,2023,60(05):42-47.