

中小型变压器的铁芯损耗抑制技术与能效提升设计

王园凯¹ 林茂财² 林茂源³ 林岸彬⁴ 刘志强³

1.浙江海江电器有限公司; 2.浙江纽泰克互感器有限公司;

3.浙江齐特电气有限公司; 4.慧泽电气有限公司 浙江温州 325000

【摘要】在电力系统配网环节,中小型变压器是电能转换与分配的核心设备,其运行能效直接关乎电力传输的经济性与可靠性。铁芯损耗作为中小型变压器的主要能量损耗来源,不仅降低设备运行效率,还加剧能源浪费与环境负担。本文以中小型变压器铁芯损耗抑制与能效提升为核心,先阐述铁芯损耗的构成机理与影响因素,深入分析磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗的产生机制;再系统梳理铁芯材料优化、磁路结构改进、制造工艺提升等主流损耗抑制技术;最后结合应用需求,提出融合材料选择、结构设计与工艺控制的综合能效提升方案,为变压器节能设计与改造提供理论支撑,助力电力设备绿色化发展。

【关键词】中小型变压器;铁芯损耗;抑制技术;能效提升;磁路优化

Technologies for Core Loss Suppression and Energy Efficiency Enhancement in Small and Medium Transformers

Wang Yuankai¹ Lin Maocai² Lin Maoyuan³ Lin Anbin⁴ Liu Qiangzhi³

1.Zhejiang Haijiang Electric Co., Ltd.; 2.Zhejiang Nutek Transformer Co., Ltd.;

3.Zhejiang Qite Electric Co., Ltd.; 4.Huize Electric Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】In power system distribution networks, small and medium transformers serve as core equipment for energy conversion and distribution, with their operational efficiency directly impacting the economic viability and reliability of power transmission. Core losses, as the primary source of energy dissipation in these transformers, not only reduce operational efficiency but also exacerbate energy waste and environmental impacts. This paper focuses on core loss suppression and energy efficiency improvement in small and medium transformers. It first elucidates the mechanisms and influencing factors of core losses, then conducts an in-depth analysis of the generation mechanisms of hysteresis losses, eddy current losses, and additional losses. Subsequently, it systematically reviews mainstream loss-suppression technologies—including core material optimization, magnetic circuit structure improvements, and manufacturing process enhancements. Finally, based on practical application requirements, the study proposes an integrated approach combining material selection, structural design, and process control to optimize energy efficiency. This framework provides theoretical support for energy-efficient transformer design and retrofitting, contributing to the sustainable development of power equipment.

【Key words】small and medium-sized transformers; core loss; suppression technology; energy efficiency improvement; magnetic circuit optimization

一、引言

电力能源是现代社会的核心支撑,其高效利用是全球能源领域的研究重点。在电力传输链条中,变压器承担电压转换与电能分配职能,中小型变压器因安装灵活、适用场景广,被广泛应用于工业企业、居民社区等配网终端。但部分中小型变压器能效偏低,铁芯损耗占设备总损耗的40%至60%,长期运行累积损耗可观。随着“双碳”目标推进与节能标准提高,降低铁芯损耗、提升能效成为电力设备领域的迫切需求。传统损耗抑制手段侧重单一环节,缺乏系统性,难以适应复杂工况。因此,研究铁芯损耗机理,探索多维度损耗抑制与能效提升方案,对降低电力系统能耗、提高能源利用率具有重要意义。

二、中小型变压器铁芯损耗的构成与机理

2.1 铁芯损耗的基本构成

中小型变压器铁芯损耗(铁损)是额定电压下铁芯因电磁感应产生的能量损耗,与负载无关,主要由磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗构成。正常运行时,磁滞损耗和涡流损耗占主导,附加损耗占比小但特定条件下不可忽视。不同结构、材料的变压器,铁芯损耗构成比例不同,为损耗抑制技术的针对性选择提供依据。

磁滞损耗与铁芯材料磁滞特性直接相关。变压器运行时,铁芯处于交变磁场中,磁场强度周期性变化使磁畴不断转向、重新排列,磁畴壁间的相互作用与摩擦阻力将部分电能转化为热能,形成磁滞损耗。磁滞损耗与材料磁滞回线面积、磁场频率及铁芯磁感应强度最大值正相关,磁滞回线面积越大、频率越高、磁感应强度越大,损耗越高。

涡流损耗基于电磁感应原理产生。交变磁通穿过铁芯时,会感应出呈漩涡状分布的闭合电流(涡流),涡流在铁芯电阻作用下产生焦耳热,形成损耗。涡流损耗与铁芯材料

电阻率成反比,与磁场频率、磁感应强度最大值及铁芯厚度平方成正比。铁芯材料电阻率较低,若不采取措施,涡流损耗会十分显著,故抑制涡流损耗需围绕提高电阻率、减小铁芯厚度展开。

附加损耗(杂散损耗)是除磁滞、涡流损耗外的铁损,产生原因复杂,与加工工艺、结构设计及运行工况相关。如叠片绝缘损坏、铁芯接缝与气隙、磁场畸变等会产生附加涡流损耗;过电压或谐波污染会使附加损耗明显增大。正常运行时附加损耗占比小,但随设备运行年限增加和工况复杂化,其影响会逐渐凸显,需在损耗抑制设计中考虑。

2.2 铁芯损耗的影响因素

影响铁芯损耗的因素包括铁芯材料特性、变压器结构设计、制造工艺及运行条件。深入分析这些因素是制定有效损耗抑制技术的前提。

铁芯材料磁性能是决定损耗的核心因素。磁导率高的材料在相同磁场强度下磁感应强度更大,可降低励磁电流;矫顽力小的材料磁畴转向阻力小,磁滞损耗低;电阻率高的材料能抑制涡流产生。此外,材料磁滞回线形状、饱和磁感应强度等特性也影响损耗,不同牌号硅钢片的损耗水平差异显著。

变压器结构设计通过影响磁路合理性改变磁场分布,进而影响损耗。铁芯叠片方式、接缝形式、截面形状等参数至关重要。如交错叠片可减少接缝气隙与附加损耗;圆形或阶梯形截面比矩形截面磁通分布更均匀,能避免局部磁密过高。铁芯柱与铁轭的连接方式、铁轭高度等也会对损耗产生影响。

制造工艺精细化程度直接影响铁芯损耗控制。叠片裁剪精度不足产生的毛刺、叠装压力不均导致的铁芯间隙、绝缘涂层破损等,都会降低绝缘性能、增大磁阻,显著增加损耗。因此,优化制造工艺、提高加工精度是抑制铁芯损耗的重要保障。

运行条件是影响铁芯损耗的外部重要因素。运行电压过高会增大铁芯磁感应强度,提升损耗;谐波污染使磁场波形畸变,高次谐波会显著增加涡流损耗;运行温度变化则通过影响材料磁性能与电阻率间接影响损耗。这些工况波动会导致损耗偏离设计值,需在能效提升设计中充分考量。

三、中小型变压器铁芯损耗抑制技术

3.1 铁芯材料优化技术

优化铁芯材料选择、提升磁性能是抑制损耗最直接的技术路径。目前中小型变压器铁芯广泛采用硅钢片,其性能提升为损耗抑制提供了有力支撑。

应用高磁感低损耗硅钢片是材料优化的核心。这类硅钢片通过控制硅含量、优化晶体结构提升磁性能,磁滞回线面积小、矫顽力低,可降低磁滞损耗;同时通过细化晶粒、改善织构提高电阻率,抑制涡流损耗。如用30Q130牌号硅钢片替代普通硅钢片,可使铁芯损耗降低30%以上。设计中需结合变压器额定容量与工况,合理选择硅钢片牌号规格,在保证性能的同时最大化降低损耗。

铁芯材料表面处理技术也能抑制损耗。硅钢片表面绝缘涂层可防止叠片短路、减少摩擦磨损。传统氧化镁涂层性能有限,新型无机及有机-无机复合涂层电阻率更高、附着性与耐热性更好,能进一步降低涡流损耗。此外,硅钢片表面抛光处理可减少粗糙度,降低磁畴壁移动阻力,辅助减少磁滞损耗。

非晶合金是新型铁芯材料,通过快速凝固制成,原子排列无序,磁性能优异。其磁滞回线面积小,磁滞损耗仅为硅钢片的1/3至1/5,电阻率高,涡流损耗也较低,采用非晶合金的变压器铁芯损耗可降低60%以上。但非晶合金脆性大、加工难、成本高,限制了其广泛应用。随着加工技术进步与成本降低,其应用前景将更加广阔。

3.2 磁路结构改进技术

改进磁路结构可优化磁通路径、减少磁场畸变与磁阻,有效抑制损耗。针对中小型变压器特点,磁路结构改进主要包括叠片方式优化、接缝结构改进、截面形状优化等。

优化叠片方式是降低损耗的重要手段。传统直接搭接叠片在接缝处气隙大、磁阻高、磁场畸变严重,附加损耗大。交错叠片通过错开相邻叠片接缝,使磁通平稳通过,降低磁阻与附加损耗,还能改善铁芯机械性能。小型变压器可采用卷铁芯结构,硅钢片连续卷制而成的铁芯无缝隙,磁路完整、磁通均匀,损耗比传统叠片铁芯降低15%至20%,且体积小、重量轻,在小型配电变压器中应用日益广泛。

改进接缝结构可进一步降低损耗。除交错叠片外,将直角接缝改为斜角接缝可增大接触面积、减少气隙等效长度;特殊裁剪工艺能使叠片紧密贴合。大型中小型变压器可采用阶梯式接缝,将接缝叠片分多个阶梯,使磁通逐步过渡,避免磁场突变,减少附加损耗。接缝改进需结合制造工艺与成本,确保加工可行。

优化铁芯截面形状可改善磁通分布。传统矩形截面加工简单但磁通不均,角落易磁密集中。圆形截面磁通路径最短均匀,损耗最小但加工难;阶梯形截面由不同宽度矩形叠片组成,磁通分布接近圆形且加工易,在中小型变压器中应用广泛。优化截面形状能使磁密分布均匀,避免局部过载,降低损耗。

3.3 制造工艺提升技术

制造工艺水平是损耗抑制的重要保障,即使材料与结构优良,落后工艺也无法有效控制损耗。制造工艺提升主要包括叠片加工优化、叠装工艺改进、铁芯固化工艺提升等。

叠片加工优化是铁芯质量的基础。传统机械剪切易产生毛刺、翘曲,降低绝缘性能、增加涡流损耗。高精度激光或等离子裁剪能提高裁剪精度,减少缺陷。激光裁剪精度高、切口平整、热影响区小,可最大限度降低加工缺陷对损耗的影响。裁剪时还需结合硅钢片磁晶各向异性,使易磁化方向与磁通方向一致,降低磁滞损耗。

叠装工艺改进是保证叠装质量的关键。叠片对齐精度、叠装压力均匀性及表面清洁度均影响磁性能与损耗。自动化叠装设备可提高对齐精度、减少人为误差,精确控制叠装压力,确保叠片贴合紧密、减少气隙。叠装中需清洁叠片表面,去除油污杂质,避免影响绝缘性能。叠装后还需紧固铁芯,

防止运行中振动导致叠片松动产生附加损耗。

铁芯固化工艺提升可提高稳定性与可靠性。树脂固化的温度、时间等参数影响固化效果与铁芯性能,优化参数能确保树脂充分固化,提高机械强度、减少振动噪声,增强绝缘性能、降低附加损耗。采用低损耗环氧树脂等新型固化材料,可在保证效果的同时进一步降低损耗。固化中需控制升降温速率,避免铁芯产生内应力影响磁性能。

四、中小型变压器能效提升的综合设计方案

4.1 设计理念与原则

中小型变压器能效提升综合设计方案以“损耗最小化、性能最优化、成本合理化”为核心理念,在满足基本性能要求的前提下,通过多维度设计实现铁芯损耗抑制与能效提升。设计需遵循系统性、针对性、经济性、可靠性原则,充分考虑各环节关联,结合应用场景选择技术方案,平衡技术与成本,保障设备运行稳定。

4.2 材料与结构的协同设计

材料与结构协同优化是综合设计的核心。不同铁芯材料磁性能不同,需匹配相应磁路结构才能最大化发挥优势。如高磁感低损耗硅钢片需配合交错叠片或卷铁芯结构减少接缝损耗;非晶合金因脆性大、磁性能对机械应力敏感,需采用特殊叠装与紧固结构避免应力影响。

协同设计中,需先结合变压器额定参数与运行要求选材料:小容量、长运行时间的配电变压器优先用非晶合金以最大化降损;大容量、复杂工况的工业变压器选高磁感低损耗硅钢片,兼顾损耗抑制与机械可靠性。确定材料后,针对性设计磁路结构,如硅钢片铁芯用阶梯形截面与交错叠片,非晶合金铁芯用卷铁芯或低应力叠装。同时需优化绕组布置,减少其磁场对铁芯的影响,避免附加损耗。

4.3 工艺与质量的全程控制

制造工艺的全程控制是确保能效提升设计方案落地的关键。从原材料采购到成品检验,每个环节都应建立严格的质量控制标准,确保工艺参数符合设计要求。在原材料采购环节,应严格检验硅钢片或非晶合金材料的磁性能参数,如铁损值、磁导率、矫顽力等,确保材料质量符合设计标准;在叠片加工环节,采用高精度裁剪设备,控制叠片的尺寸精度和边缘质量,避免出现毛刺、翘曲等缺陷;在叠装环节,采用自动化叠装设备,精确控制叠装压力和对齐精度,确保叠片紧密贴合,减少气隙;在固化和紧固环节,优化固化工艺参数,确保铁芯充分固化,同时采用合理的紧固方式,避免产生机械应力。

参考文献

- [1]王俊亭,王宇,魏超. 中小型变压器能耗分析与应对措施[J]. 商品与质量,2015(48):184-185.
- [2]彭平,周新军,由凯. 铁芯不接地对变压器绕组介质损耗因素和电容量测量的影响[J]. 湖南电力,2016,36(3):47-49,53.
- [3]沈雅静,张帅,姜潇,等. 带有温度因子的 Steinmetz 磁芯损耗预测模型[J]. 长春理工大学学报(自然科学版),2025,48(2):127-133.

此外,还应加强对成品变压器的损耗检测和性能测试,通过空载损耗测试、负载损耗测试等手段,验证铁芯损耗抑制效果和整体能效水平。对于检测不合格的产品,应及时分析原因,采取针对性的改进措施,确保产品质量符合设计要求。同时,建立完善的质量追溯体系,对每个环节的质量数据进行记录和管理,为后续的产品改进和优化提供依据。

4.4 运行维护的能效优化

变压器的运行维护对其能效水平也具有重要影响,合理的运行维护措施能够有效减少铁芯损耗,延长设备使用寿命,确保能效提升效果的长期稳定。运行维护的能效优化主要包括以下几个方面:一是合理控制运行电压,避免变压器长期在过电压工况下运行,减少因磁感应强度高导致的铁芯损耗增加;二是加强对运行环境的监测和治理,避免变压器处于谐波污染严重的环境中,减少高次谐波引起的附加损耗;三是定期对变压器进行维护检查,及时发现并处理铁芯绝缘损坏、叠片松动等问题,防止损耗异常增加;四是建立变压器运行能效监测体系,实时监测变压器的损耗情况和能效水平,为运行维护决策提供数据支持。

六、结论与展望

6.1 结论

本文以中小型变压器铁芯损耗抑制与能效提升为核心,分析了铁芯损耗构成机理与影响因素,梳理了材料优化、磁路改进、工艺提升等损耗抑制技术,提出了融合多环节的综合能效提升方案。研究表明,铁芯损耗与材料、结构、工艺、运行条件密切相关;采用高磁感硅钢片或非晶合金材料,配合优化磁路与工艺,可使空载损耗降低40%以上,非晶合金方案降幅可达60%以上,节能与经济效益显著。

本文成果明确了损耗抑制关键技术路径,为变压器节能设计与改造提供技术支撑,对推动电力设备绿色化、降低电力系统能耗具有重要意义。

6.2 展望

未来可围绕四方面展开研究:一是研发纳米晶合金等新型铁芯材料,降低铁损、改善机械性能与加工性;二是结合大数据、AI技术建立损耗预测模型,实现设计参数智能化优化;三是探索铁芯与绕组损耗抑制、散热优化一体化技术,实现整体损耗最小化;四是研究老旧变压器回收利用与节能改造技术,提高能源利用率。

随着材料、工艺与设计理念的进步,中小型变压器损耗抑制技术将不断完善,能效水平持续提升,为实现“双碳”目标与构建绿色电力系统贡献力量。