

不同批次硅钢片铁损指标波动对变压器能效达标的影响观察

王丽曼

宁夏银利电气股份有限公司 宁夏 银川 750021

【摘要】：硅钢片作为变压器铁芯的核心材质，其铁损指标稳定性直接关联变压器能效达标效果，不同批次硅钢片铁损指标的波动的会破坏变压器铁芯磁路的稳定性，进而影响变压器能效表现，甚至导致能效无法达到既定标准。铁损指标波动主要源于硅钢片生产过程中的材质、工艺差异，这种波动会通过铁芯磁滞损耗、涡流损耗的变化，传导至变压器整体能耗环节，引发能效波动。深入观察铁损指标波动的表现形式与影响路径，明确其对变压器能效达标的具体作用，可为变压器生产过程中硅钢片选用、质量管控及能效优化提供可靠支撑。

【关键词】：硅钢片；铁损指标波动；变压器；能效达标

DOI:10.12417/2811-0722.26.05.077

1 不同批次硅钢片铁损指标波动的表现形式

1.1 同规格硅钢片批次间铁损差异

同规格硅钢片理论上应具备一致的铁损指标，但实际生产中，不同批次产品的铁损数值常存在明显偏差。这种差异并非偶然，而是硅钢片生产过程中各类因素综合作用的结果，即便生产厂家相同、产品型号一致，不同生产批次的硅钢片在磁滞损耗和涡流损耗表现上仍会有所不同。这种批次间的铁损差异会直接导致后续变压器铁芯叠压后整体损耗出现偏差，原本符合要求的单批次硅钢片，若与其他批次铁损指标差异较大的硅钢片混合使用，会打破铁芯磁路的均衡性，使得铁芯整体铁损水平升高，进而影响变压器能效表现。这种波动并非突发的极端变化，更多表现为渐进式的数值偏差，易被生产过程中的常规检测忽略，却会在变压器长期运行中逐步显现对能效达标的影响。

1.2 单批次硅钢片内部铁损分布不均

除了不同批次间的铁损差异，单一批次硅钢片内部也可能存在铁损指标分布不均的情况。这种不均现象主要源于生产过程中工艺控制的细微偏差，比如轧制过程中厚度控制不均、退火处理时温度分布不一致，都会导致同批次硅钢片不同区域的磁性能出现差异，进而引发铁损指标的波动。部分硅钢片因局部区域磁导率异常，铁损数值明显高于同批次其他产品，这类硅钢片若被用于铁芯关键部位，会形成局部高损耗区域，导致铁芯整体损耗上升^[1]。这种内部波动比批次间差异更具隐蔽性，常规的抽样检测难以全面覆盖，容易被遗漏，进而在变压器装配完成后，成为影响能效达标的潜在隐患，导致变压器运行过程中能耗超出标准范围。

1.3 环境因素引发的铁损指标波动

硅钢片的铁损指标并非固定不变，在仓储、运输及装配过程中，环境因素的影响也会导致其出现波动。潮湿环境会导致硅钢片表面绝缘涂层受损，进而影响其磁性能，使铁损指标升高；高温环境则会改变硅钢片的内部晶粒结构，导致磁滞损耗

增加。运输过程中的碰撞、摩擦也可能造成硅钢片表面损伤，破坏其绝缘层，引发局部铁损异常。这种由环境因素引发的波动，往往具有随机性，不同批次硅钢片因所处环境不同，波动程度也会有所差异，进而导致变压器铁芯整体铁损水平不稳定，给能效达标带来不确定性，即便选用铁损指标合格的硅钢片，也可能因环境影响而无法保证变压器能效达标。

2 不同批次硅钢片铁损指标波动的成因分析

2.1 硅钢片生产材质配方的细微差异

硅钢片的铁损指标与材质配方密切相关，其核心成分的细微调整都会对磁性能产生明显影响。生产过程中，硅、锰等合金元素的添加比例若出现细微偏差，会改变硅钢片的磁导率和电阻率，进而导致铁损指标发生波动。即便生产厂家严格按照标准配方生产，原材料的成分差异也会间接影响最终产品的铁损表现，不同批次的原材料在纯度、杂质含量上的细微不同，会传递到硅钢片生产环节，导致不同批次产品的铁损指标出现偏差。这种材质配方相关的波动具有一定的客观性，难以完全避免，只能通过严格的原材料筛选和配方控制，最大限度降低波动幅度，减少对变压器能效达标的影响。

2.2 生产工艺参数控制的偏差影响

硅钢片的生产涉及轧制、退火、涂层等多个关键环节，每个环节的工艺参数控制精度，都会直接影响铁损指标的稳定性。轧制过程中，轧制速度、轧制压力的细微调整，会改变硅钢片的厚度均匀性和晶粒取向，进而影响磁滞损耗和涡流损耗；退火处理时，温度、保温时间的控制偏差，会导致硅钢片内部晶粒结构不完善，磁性能下降，铁损指标升高^[2]。不同生产批次在工艺参数设定上的细微差异，或生产过程中设备运行状态的波动，都会导致不同批次硅钢片的铁损指标出现偏差。这种工艺层面的波动，既可能源于设备精度不足，也可能来自操作人员的操作差异，进而形成不同批次硅钢片铁损指标的波动，间接影响变压器能效达标。

2.3 仓储运输环节的防护不当因素

硅钢片生产完成后,仓储和运输环节的防护措施不到位,也是导致不同批次铁损指标波动的重要原因。仓储过程中,若未采取有效的防潮、防尘措施,硅钢片表面易吸附水分和灰尘,破坏其绝缘涂层,导致铁损指标升高;不同批次的硅钢片若混合存放,可能出现交叉污染,影响其磁性能。运输过程中,剧烈颠簸、碰撞会造成硅钢片表面损伤,破坏绝缘层,导致局部铁损异常;若运输过程中环境温度、湿度变化剧烈,也会导致硅钢片内部磁性能发生变化,引发铁损指标波动。不同批次硅钢片的仓储运输条件可能存在差异,进而导致铁损波动程度不同,给变压器能效达标带来不利影响。

3 铁损指标波动对变压器能效达标的影响机制

3.1 铁损波动导致铁芯整体损耗异常

铁芯是变压器的核心磁路部件,其损耗主要由硅钢片的磁滞损耗和涡流损耗构成,硅钢片铁损指标的波动会直接导致铁芯整体损耗出现异常。当不同批次硅钢片铁损指标存在偏差时,叠压形成的铁芯会出现损耗分布不均的情况,铁损较高的硅钢片会成为铁芯中的高损耗区域,导致铁芯整体损耗升高。这种损耗异常并非简单的数值叠加,而是会引发磁路不平衡,进一步加剧损耗,使得铁芯整体能耗超出设计标准。铁芯作为变压器损耗的主要来源,其损耗异常会直接导致变压器整体能耗上升,成为影响能效达标的核心因素,即便其他部件性能达标,也可能因铁芯损耗异常而无法实现能效达标。

3.2 损耗异常传导至变压器整体能耗

铁芯损耗的异常会通过磁路传导至变压器的整个运行系统,引发变压器整体能耗的波动。铁芯损耗升高会导致变压器内部温度升高,进而影响绕组的电阻特性,使绕组损耗增加,形成损耗叠加效应^[3]。这种损耗传导会逐步放大铁损波动的影响,原本轻微的铁损偏差,可能会导致变压器整体能耗出现明显上升,超出能效达标所需的能耗阈值。铁损波动引发的磁路不平衡,还会导致变压器运行过程中出现噪声增大、振动加剧等问题,进一步增加额外能耗,使得变压器整体能效水平下降,难以达到既定的能效标准,甚至出现能效超标现象。

3.3 能耗超标引发能效达标失败风险

变压器能效达标有着明确的能耗阈值要求,铁损指标波动引发的整体能耗上升,会直接导致变压器能耗超出这一阈值,引发能效达标失败。当不同批次硅钢片铁损波动较大,且未得到有效控制时,变压器运行过程中的空载损耗和负载损耗都会明显升高,使得变压器的能效等级下降,无法达到规定的能效标准。这种达标失败不仅会影响变压器的市场准入和使用,还会造成能源浪费,不符合绿色低碳的发展要求。铁损波动的随机性还会导致变压器能效表现不稳定,即便部分时段能效达标,也可能因铁损波动而出现阶段性能效超标,给能效管理带

来极大难度。

4 应对硅钢片铁损指标波动的防控措施

4.1 强化硅钢片采购环节质量管控

采购环节是控制硅钢片铁损波动的第一道防线,需建立严格的采购质量标准,明确硅钢片铁损指标的允许波动范围,结合变压器能效达标要求,细化不同规格硅钢片的铁损阈值,避免因标准模糊导致不合格产品流入。在采购过程中,应优先选择生产工艺成熟、质量管控严格的供应商,对供应商的生产能力、质量检测体系进行全面评估,包括其原材料筛选流程、生产工艺参数控制水平及出厂检测标准,确保其能够持续提供铁损指标稳定的产品。同时,加强对采购硅钢片的入场检测,对每一批次的硅钢片进行抽样检测,抽样比例需满足质量管控要求,重点检测铁损指标、绝缘涂层质量等关键参数,对铁损波动超出允许范围的批次,坚决不予入场,杜绝因侥幸心理留下质量隐患。通过严格的采购管控,从源头减少铁损波动较大的硅钢片进入生产环节,为变压器能效达标提供坚实的基础保障,降低后续生产环节的能效风险。

4.2 优化硅钢片仓储运输防护流程

针对仓储运输环节引发的铁损波动,需优化防护流程,建立专门的硅钢片仓储区域,划分清晰的存放分区,配备专业的防潮、防尘、恒温设施,将仓储环境的温湿度控制在合理范围,避免潮湿、高温、灰尘等环境因素对硅钢片磁性能造成破坏,防止绝缘涂层老化、脱落。不同批次的硅钢片应分开存放,做好清晰标识,标注批次、生产日期、铁损检测结果等关键信息,防止不同批次产品交叉污染和混淆,便于后续追溯和使用。仓储过程中,定期对硅钢片进行全面检查,采用专业工具清理表面灰尘和水分,仔细排查绝缘涂层是否存在破损、划伤等问题,及时采取修复或隔离措施,确保绝缘涂层完好^[4]。运输过程中,选择具备防护条件的专用运输车辆,采用缓冲材料对硅钢片进行固定和防护,避免运输过程中的碰撞、摩擦造成表面损伤;合理规划运输路线,避开高温、高湿、颠簸路段,尽量减少运输过程中的环境温度、湿度变化,降低环境因素引发的铁损波动,确保硅钢片在仓储运输全过程中保持稳定的铁损指标,为后续生产使用提供质量保障。

4.3 完善变压器生产过程质量校验

在变压器生产过程中,需加强对硅钢片使用环节的质量校验,建立硅钢片使用前的二次检测机制,对进入装配环节的硅钢片再次进行铁损指标检测,扩大检测覆盖面,确保每一片投入使用的硅钢片都符合生产要求,杜绝因前期检测遗漏导致不合格硅钢片投入装配。在铁芯叠压过程中,结合不同批次硅钢片的铁损检测数据,合理搭配不同批次的硅钢片,尽量选择铁损指标相近的硅钢片进行叠压,科学规划叠压顺序,减少批次间差异带来的铁芯损耗异常,确保铁芯磁路的均匀性。叠压完

成后,对铁芯整体损耗进行全面检测,采用专业检测设备监测铁芯各区域的损耗情况,及时发现因铁损波动导致的损耗异常问题,并采取调整叠压结构、更换不合格硅钢片等相应的调整措施。同时,加强生产过程中的工艺控制,优化铁芯叠压工艺参数,规范操作流程,确保铁芯叠压密度均匀,磁路畅通均衡,最大限度减少铁损波动对变压器能效的影响,保障变压器生产过程中的能效可控,为最终实现变压器能效达标筑牢生产环节的质量防线。

5 铁损指标波动防控与能效达标协同保障

5.1 建立硅钢片铁损动态监测体系

建立全流程的硅钢片铁损动态监测体系,覆盖采购、仓储、生产、装配等各个环节,实时跟踪不同批次硅钢片的铁损指标变化。在采购入场、仓储检查、生产使用等关键节点,设置检测点位,对硅钢片铁损指标进行常态化检测,记录检测数据,建立铁损指标数据库,通过数据分析及时发现铁损波动规律和异常情况。针对检测中发现的铁损波动问题,及时追溯原因,采取针对性的防控措施,避免波动范围扩大,确保硅钢片铁损指标始终处于稳定范围,为变压器能效达标提供数据支撑和保障。

5.2 构建全流程质量与能效联动机制

构建硅钢片质量管控与变压器能效达标联动机制,将硅钢片铁损波动防控与变压器能效优化紧密结合起来,打通质量管控与能效管理的衔接壁垒,实现两者同部署、同推进、同落实。在生产计划制定过程中,全面梳理各批次硅钢片铁损指标检测结果,结合不同规格硅钢片的磁性能差异,针对性优化变压器生产工艺,重点完善铁芯叠压工艺参数,规范绕组装配流程,确保铁芯叠压的均匀性、绕组装配的合理性与硅钢片质量精准匹配,充分发挥硅钢片磁性能优势,降低铁损波动带来的能效损耗^[5]。在质量检测过程中,将铁芯损耗专项检测与变压器整体能效检测深度融合,同步采集铁芯损耗数据与变压器空载、

负载能耗参数,精准识别因硅钢片铁损波动引发的能效异常,快速追溯波动根源,同步优化质量管控流程与能效提升方案。通过联动机制,实现硅钢片质量管控与变压器能效达标的协同推进,构建“质量防控-能效检测-优化调整”的闭环管理模式,有效提升变压器能效达标的稳定性与可控性,为变压器能效达标提供全流程支撑。

5.3 推动硅钢片质量与变压器能效协同提升

推动硅钢片生产企业与变压器生产企业的协同合作,促进硅钢片质量提升与变压器能效优化的深度融合。变压器生产企业可向硅钢片生产企业反馈铁损波动对变压器能效的影响,提出硅钢片质量改进需求;硅钢片生产企业则可根据需求,优化生产工艺,提升硅钢片铁损指标的稳定性,研发低铁损、高性能的硅钢片产品。同时,双方共同开展技术研究,探索硅钢片铁损波动的精准防控技术和变压器能效优化技术,通过技术创新,实现硅钢片质量与变压器能效的协同提升,从根本上解决铁损波动对变压器能效达标的影响,推动变压器产业向高效节能方向发展。

6 结语

本文围绕不同批次硅钢片铁损指标波动对变压器能效达标的影响展开全面观察,明确了铁损指标波动的表现形式、成因及对变压器能效达标的影响机制,提出了针对性的防控措施及协同保障路径。硅钢片铁损指标的稳定性是变压器能效达标的关键前提,不同批次硅钢片在生产、仓储、运输等环节产生的铁损波动,会通过铁芯损耗异常传导至变压器整体能耗,进而引发能效达标风险。通过强化采购管控、优化仓储运输、完善生产校验,建立动态监测体系和联动机制,能够有效防控铁损指标波动,实现硅钢片质量与变压器能效的协同提升。此次观察明确了铁损波动与变压器能效达标的内在关联,为变压器生产过程中的质量管控和能效优化提供了实践参考,助力变压器产业实现高效节能发展。

参考文献:

- [1] 陈国丰.硅钢片材料全频域瞬时铁损模型[J].磁性材料及器件,2024,55(06):65-69.
- [2] 赵小军,张凌云,刘洋,等.机械应力对取向硅钢片综合磁性能影响的实验研究[J].电工技术学报,2022,37(22):5776-5787.
- [3] 王安国,崔天瑞.冷轧硅钢片特性研究[J].防爆电机,2022,57(03):52-54.
- [4] 陈芝波,罗响,龚纯.深海用永磁同步电机硅钢片磁特性及铁损研究[J].微特电机,2022,50(03):1-4+10.
- [5] 张豹.高强度低铁损电工钢制备工艺与性能研究[D].北京科技大学,2021.