电力变压器混片铁心的优化设计

张长庚[1],王 锴[1],王春光[2],万振宇[1]
(1.河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室,天津 300130;
2.天津市特变电工变压器有限公司,天津 300450)

摘要:电力变压器是电力系统中的关键设备,对整个电力系统中发电和电能传送具有重要作用。变压器铁心的损耗与内部磁通密度的分布息息相关,采用混合叠片结构可以有效减少铁心叠片库存,提高变压器铁心叠片的利用率。本文作者利用 ANSYS Maxwell 软件对不同类型叠片混合的变压器铁心进行了三维瞬态电磁场模拟仿真,分析了采用不同类型叠片混合时铁心的磁通密度和损耗差异。研究结果显示,当铁心的最内层叠片采用常规晶粒取向电工钢,其余叠片采用高磁导率电工钢时,铁心的损耗最小;随着在高磁导率电工钢铁心主体中加入常规晶粒取向电工钢叠片,铁心损耗的增幅达到了 14.9%~49.4%。本文的研究成果可为变压器铁心的优化设计提供一定的依据。

关键词:电力变压器;混合叠片;铁心损耗
中图分类号:TM401+.2 **文献标识码**:B **文章编号**:1001-8425(2024)10-0001-05
DOI:10.19487/j.cnki.1001-8425.2024.10.010

Optimal Design of Hybrid Laminated Core for Power Transformer

ZHANG Changgeng[1], WANG Kai[1], WANG Chunguang[2], WAN Zhenyu[1]
(1.Province-ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2.TBEA Tianjin Transformers Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: Power transformer is regarded as a key link in the power system, and plays an important role in power generation and power transmission in the whole power system. The loss of transformer core is closely related to the distribution of internal magnetic flux density, and the use of hybrid laminated structure can effectively reduce the number of core laminations and improve the operational efficiency of the transformer. In this study, three-dimensional transient electromagnetic field simulations of transformer cores mixed with different types of laminations are carried out using ANSYS Maxwell software to analyze the magnetic flux density and losses of the core when mixed with different types of laminations. The results show that the core loss is minimized when the inner layer of the core is made of conventional grain-oriented electrical steel and the rest of the stacks are made of high-permeability electrical steel, and the increase in core loss reaches 14.9%~49.4% with the addition of conventional grain-oriented electrical steel stacks to the main body of the core made of high-permeability electrical steel. The research results of this paper can provide some basis for the optimized design of transformer cores.

Key words: Power transformer; Hybrid lamination; Core loss

0 引言

电力变压器在电力系统中扮演着非常关键的角色,其安全稳定的运行离不开铁心结构的优良性能。在变压器工作过程中,铁心会产生损耗,从而产生一定的热效应。过高的温度会加速铁心的老化并损害其性能,而铁心的性能直接影响到变压器的工作效率和使用寿命,选择合适的铁心叠片对于提高变压器的性能至关重要。混合叠片是一种常用的方法,即在变压器铁心主体中加入不同型号的硅钢片,既可以降低损耗,又能控制成本。

目前关于变压器铁心损耗的研究主要集中在单

中国知网 https://www.cnki.net

一型号硅钢片构成的铁心上，对于混合叠片的研究相对较为有限。曾有学者使用 ANSYS Maxwell 仿真软件成功实现了对变压器混合叠片的空载损耗计算，获得了在不同工况下铁心的磁密分布以及损耗变化趋势；有文献通过设置定位针的方法实现了变压器铁心的叠制工艺，通过降低空载设计裕度有效降低了变压器铁心材料成本；有文献运用有限元方法求解了三相三柱变压器铁心在空载条件下的磁通密度分布，并建立了数值计算模型，为预估变压器铁心振动噪声提供了更准确的分析手段；还有文献考虑叠片铁心的磁致伸缩和磁化特性的各向异性，建立了叠片铁心的三维磁–机械强耦合数值模型，有效实现了铁心损耗的计算。

本文作者基于 ANSYS Maxwell 有限元仿真软件，建立了三相三柱式变压器铁心模型，变压器铁心采用不同型号的电工钢片叠制而成。通过仿真计算，分析采用不同铁心叠片叠置时变压器的磁通密度以及损耗的差异，选出最优的叠片组合，以降低变压器铁心损耗并提升变压器整体的工作效率。

1 混合叠片铁心参数的计算

1.1 磁通密度

在变压器铁心叠片中使用高磁导率电工钢片(HGO)和常规晶粒取向电工钢(CGO)，通过将 6 个宽度为 50mm、130mm 和 160mm 的铁心叠片进行组合，构建了所需的铁心结构。变压器铁心截面如图 1 所示。

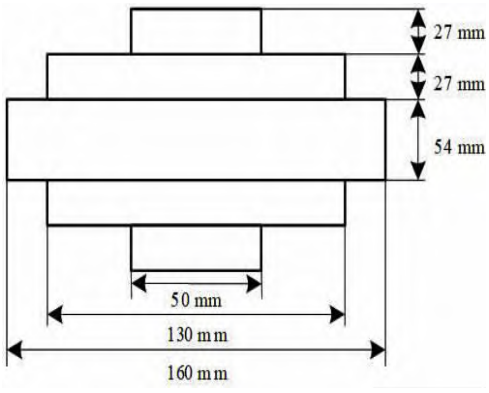


图 1 铁心横截面示意图

叠片的峰值磁通密度 B_{pk} 可表示为式(1)。

$$B_{pk}=\frac{V_{packet}}{4Af} \tag{1}$$

式中，V_{packet} 为次级绕组中的平均电压值，N 为次级绕组的匝数，A 是叠片横截面的面积，f 为磁化频率。

变压器的铁心在工作过程中承受着交变磁场的作用，导致磁通密度随电流变化而变化。当峰值磁通密度超过铁心材料的饱和磁通密度时，铁心会发生饱和，导致磁导率下降，磁路中的磁阻增加，从而引起能量损耗和温升。因此，在变压器设计中，需要合理选择铁心材料和铁心尺寸，以确保峰值磁通密度在可接受范围内，从而有效降低铁心损耗。

磁路中峰值磁场强度计算见式(2)。

$$H_{pk}=\frac{NI_{pk}}{l_m} \tag{2}$$

式中，I_{pk} 是实测的峰值磁化电流，l_m 是平均磁路长度。于是得到有效磁导率见式(3)。

$$\mu_{eff}=\frac{B_{pk}}{\mu_0 H_{pk}} \tag{3}$$

式中，μ_0 为真空磁导率。

1.2 铁心损耗

根据铁磁材料在交变磁场中产生损耗的机理不同，将铁心总损耗分为三个损耗分量，即磁滞损耗、涡流损耗和异常损耗。已知铁心的几何参数，通过求得的参数来建立铁心的几何模型，铁心损耗可以表示为式(4)。

$$P_{fe}=k_h f B_m^2+k_c f^2 B_m^2+k_e f^{1.5} B_m^{1.5} \tag{4}$$

式(4)中，k_h 为磁滞损耗系数，k_c 为涡流损耗系数，k_e 为异常损耗系数。可根据磁通密度峰值 B_m 和频率 f 计算单位体积的铁心损耗。

交变磁滞损耗 P_h 是指铁心材料在交变磁场中磁化和去磁化过程中产生的能量损耗，可以表示为式(5)。

$$P_h=\frac{1}{T}\int_0^T H\left|\frac{dB}{dt}\right|dt \tag{5}$$

其中，T 为磁化周期。每经历一个磁化周期，磁滞损耗在数值上等于一个完整磁滞回线包围的区域面积。

铁磁性材料放置在变化的磁场中，其内部会在垂直于磁场的方向上感应出涡旋状的闭合电流，即涡流。在交变磁场中，磁场的变化频率越快，感应产生的涡流越大。在导体内部，涡流流动使导体发热产生的能量消耗即为涡流损耗。在正弦交变磁场中，涡流损耗可以表示为式(6)。

$$P_c=k_c\frac{1}{T}\int_0^T\left|\frac{dB}{dt}\right|^2 dt \tag{6}$$

除了上述磁滞损耗与涡流损耗，铁磁材料在磁化过程中还会产生异常损耗，它包括了铁心材料中的各种非线性和附加损耗，如材料中的杂质、晶格缺陷等引起的能量损耗。异常损耗 P_e 可以表示为式

中国知网 https://www.cnki.net

(7)。

$$P_e=k_e\frac{1}{T}\int_0^T\left|\frac{dB}{dt}\right|^{1.5}dt \qquad (7)$$

2 混合叠片的变压器铁心仿真

2.1　混合叠片铁心仿真模型

采用 ANSYS Maxwell 仿真软件对变压器铁心建立模型，对铁心设置适当的材料、激励和边界条件，对铁心内部的磁通密度的分布进行三维瞬态场的模拟仿真。在仿真过程中，忽略变压器铁心的集肤效应和邻近效应，铁心模型如图 2 所示。

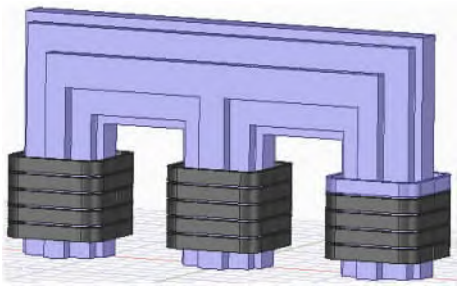


图 2　变压器铁心仿真模型

2.2　仿真分析

2.2.1　磁通密度分布

仿真过程中保证绕组所加激励不变，铁心尺寸不变，通过改变硅钢片的类别，分析不同铁心叠片混合时的变压器磁通密度分布，仿真结果如图 3 所示。

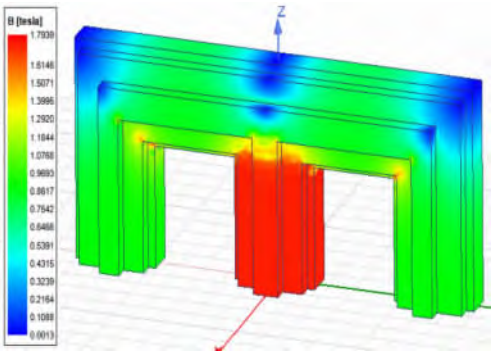


图 3　铁心磁密分布图

将变压器三相铁心分成六种组合进行分析，在铁心达到磁饱和之后选取不同铁心叠片中心柱上同一高度上的点来观察磁通密度的数值。测量数据见表 1。

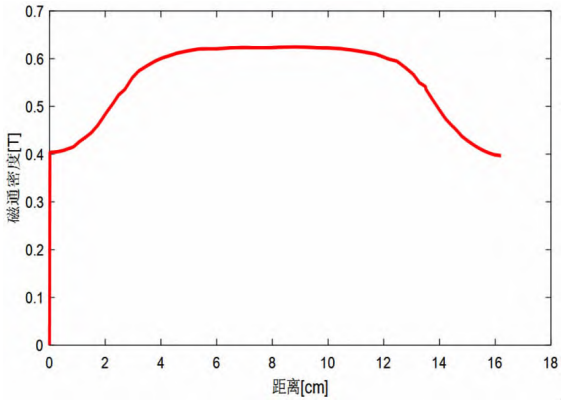
由表 1 数据可知，当铁心全部由 HGO 叠片叠置时磁通密度具有最大值，而当铁心全部由 CGO 叠片叠置时磁通密度具有最小值，不同规格的铁心叠片的磁通密度值差异不大。HGO 铁心叠片的磁通密度约为 1.83T，CGO 叠片的磁通密度约为 1.72T。

表 1　叠片铁心的磁通密度　　T

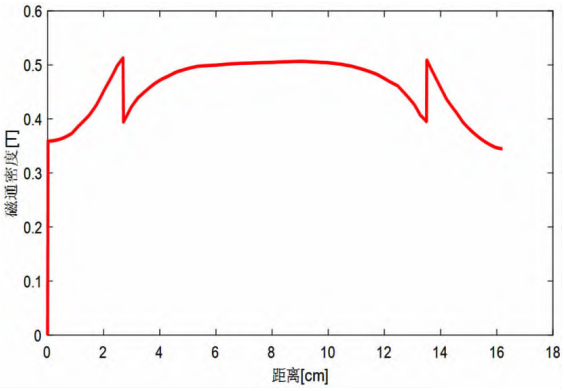
铁心规格/mm	50	130	160
HGO	1.8280	1.8292	1.8305
50C+130H+160H	1.7255	1.8288	1.8304
50C+130C+160H	1.7228	1.7230	1.8295
50H+130H+160C	1.8290	1.8291	1.7229
50H+130C+160C	1.8306	1.7248	1.7249
CGO	1.7145	1.7185	1.7231

为了更加直观清晰地观测到各个叠片之间的磁通密度的关系，对垂直于铁心方向磁通密度的变化进行了分析，结果如图 4 所示(以 A 柱为例)。

HGO 与 CGO 不同分组混合的差异导致变压器铁心磁通密度发生不同变化。仿真结果表明，在材料均匀一致的 HGO 和 CGO 铁心中，随着叠片尺寸的增加，其磁通密度的值逐渐增大，尺寸为 160 mm 的叠片磁通密度值最大，其次是 130 mm 的叠片，尺寸为 50 mm 的叠片磁通密度最低；由于 CGO 叠片的磁导率小于 HGO 电工钢片，磁通多集中于 HGO 电工钢片中，因此 CGO 电工钢片中的磁通密度要小于 HGO 电工钢片。以 50H+130C+160C 的铁心为例，磁

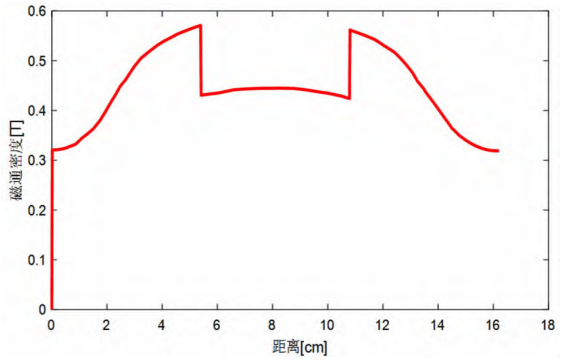


(a)HGO

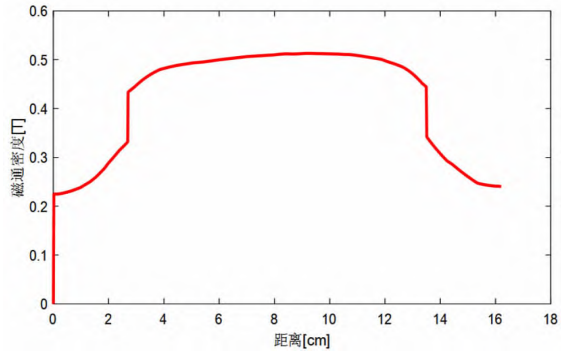


(b)50H+130C+160C

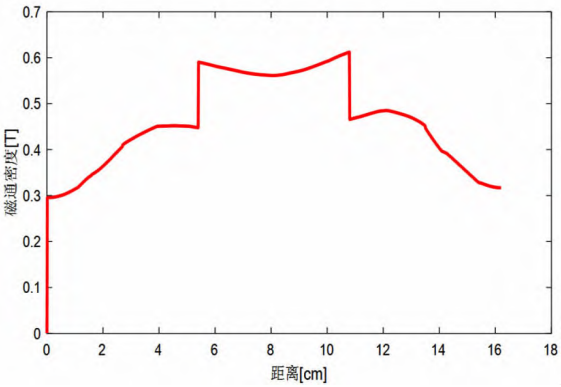
中国知网　https://www.cnki.net



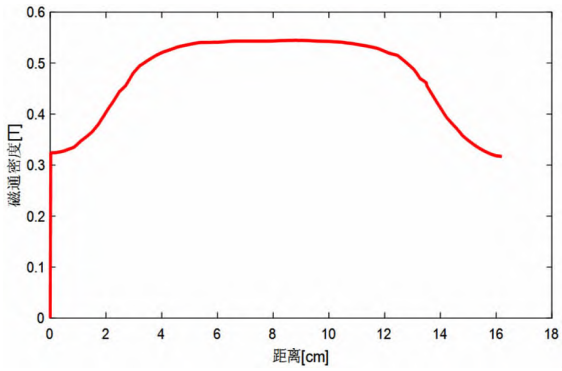
(c)50H+130H+160C



(d)50C+130H+160H



(e)50C+130C+160H



(f)CGO

图 4 不同类型铁心磁通密度

通密度首先随着叠片尺寸增大而增大，随后在与 160mm 的叠片交界处磁通密度急剧下降，后逐渐增大。在所有的混合叠置而成的铁心中，50C+130H+160H 铁心具有最大的磁通密度值，50H+130C+160C 的铁心的磁通密度数值最小。

2.2.2 损耗分析

为了选出最优的混合叠片铁心组合，分别对由常规晶粒取向电工钢和高磁导率电工钢叠片构成的铁心的整体损耗进行分析。仿真过程中改变变压器铁心叠片的材料和规格，观察不同规格铁心叠片混合下的整体的损耗值。在频率为 50Hz 时，设置电流峰值为 1A，测得变压器的铁心损耗有效值见表 2。

表 2 三相三柱式变压器铁心损耗

铁心	规格	CGO 占比/%	HGO 占比/%	铁心损耗/mW
1	HGO	0	100	30.71
2	50C+130H+160H	15	85	35.29
3	50C+130C+160H	47	53	42.42
4	50H+130H+160C	54	46	34.37
5	50H+130C+160C	85	15	41.43
6	CGO	100	0	45.89

由表 2 数据可知，对同尺寸的铁心叠片而言，HGO 叠片的磁导率大于 CGO 铁心叠片，因此其损耗值要小于 CGO 叠片。因此，全部采用 HGO 材料制成的铁心的损耗具有最小值，为 30.71mW，而全部由 CGO 材料制成的铁心的损耗会达到 45.89mW。在混合材料叠置而成的铁心中，损耗的大小与混合材料的比例与尺寸有关。随着在 CGO 电工钢铁心主级中依次加入 HGO 电工钢叠片，总的铁心损耗会降低；同理，在 HGO 电工钢铁心主级中加入 CGO 电工钢片，会使总的铁心损耗增大，最大增幅达 49.4%。在混合叠片的变压器铁心中，50H+130H+160C 叠置成的铁心的损耗值较小，其值为 34.37mW，而 50C+130C+160H 的损耗值较大，其值为 42.42mW。

3 结论

本文笔者建立了变压器三维仿真模型，对变压器的磁通密度和铁心损耗进行了分析与计算。结果表明，在由高磁导率电工钢叠置而成的铁心中，随着加入常规晶粒取向电工钢片尺寸和数量的增加，变压器铁心的磁通密度逐渐降低。相反，在常规晶粒取向电工钢叠置而成的铁心中随着加入 HGO 电工钢片尺寸和数量的增加，变压器铁心的磁通密度逐渐增大。在所有类型的混合铁心中，50H+130H+160C

中国知网 https://www.cnki.net

叠置成的铁心损耗具有最小值，而 50C+130C+160H 的铁心损耗最大。

参考文献：

[1] 李　洁，李金辉，齐红育. 影响变压器空载损耗的铁心叠片结构改进[J]. 电工电气，2013，(11)：53-56.

[2] 李永建，闫鑫笑，张长庚，等. 基于磁-热-流耦合模型的变压器损耗计算和热点预测[J]. 电工技术学报，2020，35(21)：4483-4491.

[3] 张长庚，王家俊，李永建，等. 特高压换流阀阳极饱和电抗器动态铁心损耗模拟[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2158-2168.

[4] 余　凯. 配电变压器铁心混合叠片损耗研究[J]. 电器工业，2019，(9)：65-67，76.

[5] 彭　勇. 电力变压器铁心叠片新工艺[J]. 变压器，2015，52(11)：16-17.

[6] 杨　威，奚延辉，陈国坤. 考虑叠片效应的变压器铁心多场仿真模型[J]. 科学技术与工程，2018，18(15)：112-117.

[7] 祝丽花. 叠片铁心磁致伸缩效应对变压器、交流电机的振动噪声影响研究[D]. 天津：河北工业大学，2013.

[8] 龚文军，黄劭刚，杨玉文，等. ANSYS Maxwell硅钢片铁耗系数提取方法的实现[J]. 电机与控制应用，2016，43(4)：82-85.

作者简介：

张长庚(1985-)，男，黑龙江绥化人，教授。

本文彩图可以网上浏览，网址见本期 53 页

收稿日期：2022-06-30

《变压器》杂志入选“我国高质量科技期刊分级目录(2022 版)”

为探索认定发布供我国科技工作者使用、供学术文献成果评价参考的高质量科技期刊分级目录，推动同等水平的国内外期刊等效使用，体现应用实践类科研成果的应有价值，引导国内科技工作者将更多优秀成果在我国高质量科技期刊首发，推动建设适应世界科技强国需求的科技期刊体系，助推世界一流科技期刊建设，中国科协经过统一部署，2018 年起，开展了高质量科技期刊分级目录发布工作。

2019 年 7 月，中国科协、中宣部、教育部、科技部联合印发《关于深化改革培育世界一流科技期刊的意见》，明确提出要遴选发布高质量科技期刊分级目录，遵照同行评议、价值导向、等效使用原则，形成全面客观反映期刊水平的评价标准。

根据安排，《能源电力领域高质量科技期刊分级目录》，由中国电机工程学会负责组织评审。在评审委员会上，中国电机工程学会理事长，国际电工委员会主席，中国华能集团有限公司党组书记、董事长，能源电力领域高质量科技期刊分级目录评审委员会主任委员舒印彪主持会议并指出，按照习近平总书记提出的“广大科技工作者要把论文写在祖国大地上”的期许，期刊分级目录的编制工作要立足于国家科技与学术发展的客观需要，评审结果要能够体现国家在科技进步中的成就和自信。此次期刊分级目录评审工作充分体现了评审专家们认真负责、实事求是的态度，引导优秀科研成果在高质量中文期刊首发，不断增强我国在世界能源电力领域的影响力和话语权。

由中国电机工程学会公布的《能源电力领域高质量科技期刊分级目录》涵盖“能源与电力综合”、“能源与发电技术”、“电力系统及其自动化”、“电工理论与装备”四个方向，遴选源期刊 769 种，其中包括中国期刊 186 种，其他国家和地区期刊 583 种，最终选定 121 种高水平科技期刊进入分级目录。

《变压器》杂志入选“电工理论与装备”T3 目录。

T1 类表示已经接近或具备本学科领域国际顶级水平的期刊；T2 类是指本学科领域国际上知名和非常重要的较高水平权威期刊；T3 类为本学科领域国内外重要、且被学术界认可的期刊。

由于 T3 表中的外文期刊都被收录 SCI 扩展索引，因此根据国家制定的等效使用原则，《变压器》杂志上刊登的论文，在国内可等效于被 SCI 收录使用。

中国知网　https://www.cnki.net