

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.02.010

铁心接缝对变压器振动噪声的影响研究

陈晓刚¹, 陈文通², 张俊杰³, 刘兰荣³, 聂京凯⁴, 吴雪峰²,
周旺², 何强⁴

(1. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310000; 2. 国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 浙江 金华 321001; 3. 保定天威保变电气股份有限公司, 河北 保定 071056; 4. 国网智能电网研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 变压器本体降噪是电网公司和制造厂家注重解决的问题。变压器铁心振动是变压器噪声主要来源, 而铁心接缝的振动噪声不容忽视。文中通过对变压器接缝区域进行硅钢单片级建模, 不同步进搭接形式、搭接宽度、每级叠片数进行仿真计算, 分析了接缝区域穿片磁通引起的洛伦兹力对铁心振动的影响, 从微观的角度提出了基于接缝形式的减振降噪处理方法。通过夹紧力试验, 进一步验证了洛伦兹力对振动噪声的影响, 为变压器本体降噪提供了有效的理论支撑。

关键词: 接缝; 铁心; 步进搭接; 洛伦兹力; 振动; 噪声

Study on the Influence of Core Joints on Vibration and Noise of Transformer

CHEN Xiaogang¹, CHEN Wentong², ZHANG Junjie³, LIU Lanrong³, NIE Jingkai⁴, WU Xuefeng²,
ZHOU Wang², HE Qiang⁴

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Jinhua Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhejiang Jinhua 321001, China; 3. Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd., Hebei Baoding 071056, China; 4. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Noise reduction in transformer proper is a key issue that both power grid companies and manufacturers focus on addressing. The main source of transformer noise is from the core vibration, while the vibration and noise at the core joints shall also not be ignored. In this paper, through modeling the single silicon steel at the transformer joint area, the different lapping forms, lapping width and the number of laminations at each stage are simulated and calculated, the influence of Lorentz force on the core vibration due to the magnetic flux passing through the joint area is analyzed, and the method of vibration reduction and noise reduction based on the joint form is proposed from the microscopic perspective. The influence of Lorentz force on vibration noise is further verified through clamping force test, which provides effective theoretical support for noise reduction of transformer.

Key words: joint; core; step lap joint; Lorentz force; vibration; noise

0 引言

随着城市化进程的加快, 城市变电站或郊区变电站的运行对周边居民的影响越来越大, 噪声已成为变电站环保的关键问题, 使得减振降噪成为电力设备必须解决的问题^[1]。

变压器等电力设备是变电站的主要声源设备,

噪声是衡量其性能指标的重要的参数。变压器的噪声主要来源于铁心、绕组、散热器等的振动。对制造厂家而言, 变压器本体降噪是降噪的终极措施。变压器本体振动产生噪声的根源在于铁心: ①铁心硅钢片在交流磁场中的磁致伸缩致使铁心随励磁频率的变化产生的周期性振动; ②硅钢片接缝位置和叠片间, 存在因漏磁产生的电磁力引起的铁心

收稿日期: 2025-07-27; 修回日期: 2025-10-27

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211JH2000RY)。

Project Supported by Technical Project of Stats Zhejiang Electric Power Co., Ltd.(5211JH2000RY).

振动。干式叠片铁心变压器运行时,可以明显听到噪声,噪声强的位置为角部接缝处。在噪声研究时,一般认为磁致伸缩的影响占主要地位^[2],但由于铁心多级接缝产生的噪声是在磁致伸缩噪声的基础上对角部噪声的叠加放大,使变压器噪声水平增加很多,因此接缝电磁力导致的铁心振动噪声不可忽视^[3]。定向、定位的振动噪声试验结果表明,接缝处电磁力的振动噪声超过磁致伸缩所带来的噪声影响^[4]。

硅钢片磁致伸缩为其物理特性,在交变磁场的作用下,产生与交变磁场频率相关的机械振动。现代硅钢的磁致伸缩试验表明,无约束条件下硅钢片的磁致伸缩已小于 $0.6 \mu\text{m}/\text{m}$,经过特制的低磁致伸缩硅钢片其值更是微乎其微。但受轧制方向的压缩应力作用下,磁致伸缩的位移及振动会发生急剧变化,已有很多文献对变压器磁致伸缩及其振动噪声进行研究^[5-11]。而变压器的硅钢铁心主要承受夹件、扎带的夹紧力,方向为硅钢片的叠积方向(硅钢片的厚度方向),而硅钢片产生磁致伸缩的轧制方向上,基本不受外部应力。因此对于变压器,不必深究硅钢片主磁致伸缩方向拉压受力的问题。目前检索到进行铁心接缝研究的文献偏少,文[12-13]对多级接缝磁密分布、空载损耗,接缝对振动噪声进行了简单分析;文[14-15]考虑接缝区域进行了硅钢片振动噪声仿真,但文[14]接缝区域效果均与实际结构不能等效,文[15]采用硅钢片各相同性,接缝位置磁场与实际有区别。笔者认为变压器外施电源一定时,交变磁场一定,硅钢片磁致伸缩引起的振动认为不变。在此前提下,接缝区域应作为铁心振动噪声的主要因素进行分析。因此文中主要针对实际铁心接缝形式开展了硅钢单片级建模仿真研究,寻求降低变压器本体结构振动噪声的有效设计方案。

1 接缝区域受力理论分析

变压器铁心的主磁通方向为轧制方向,硅钢片轧制方向的应力、应变远大于垂直轧制方向的应力、应变^[7],由此认为磁致伸缩对轧制方向的振动贡献最大。

步进搭接二维磁力线分布见图1,变压器铁心接缝区域为每层 45° 斜接缝搭接,每层拼接存在气隙,气隙宽度远大于硅钢片层间漆膜厚度,使得硅钢片铁心主磁通在接缝前后位置,层间出现磁通穿片现象(如图1中两个气隙之间的部分)^[7],产生叠积

方向的磁通分量,进而引起硅钢片平面内的涡流。硅钢片涡流区域在主磁通方向磁场的作用下产生洛伦兹力,使其产生叠片方向的振动。



图1 步进搭接二维磁力线分布

Fig. 1 Two-dimensional magnetic field line distribution map of step lap joint

根据洛伦兹力定律,洛伦兹力^[16]可以用洛伦兹方程积分表达式为

$$F = \int_V (\rho E + J \times B) dV \quad (1)$$

式(1)中: F 为洛伦兹力, N ; V 为积分的体积, m^3 ; ρ 为电荷密度, C/m^3 ; E 为电场强度, N/C ; J 为电流密度, A/m^2 ; B 为磁感应强度, T 。

铁心只考虑交变磁场受力,忽略电场,用积分形式表示的洛伦兹力方程

$$F = \int_V J \times B dV \quad (2)$$

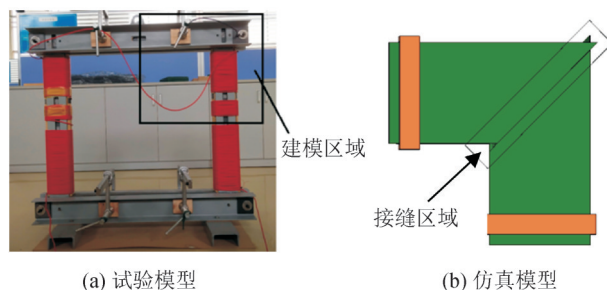
则洛伦兹力密度 f 表达式为

$$f = J \times B \quad (3)$$

进行仿真工作时,可以提取洛伦兹力和洛伦兹力密度进行接缝区域的受力分析。

2 不同接缝形式的仿真比较

目前在变压器产品中常用的接缝形式有2、3、5、6甚至7级步进搭接。步进级数的增加能降低接缝区域损耗,因此随着变压器能效等级要求的提高,步进搭接级数逐渐增加。文中以方铁心模型为基础^[4],分别对接缝区域建模,对搭接宽度、步进级数、叠片数量等接缝形式对铁心受力振动的影响进行了分析。铁心模型所用硅钢片片宽 100 mm ,总叠厚 20 mm ,见图2。取 $1/4$ 模型,厚度方向取 9 mm 共计30片叠片,以磁密 1.7 T 下磁场进行受力分析。



(a) 试验模型

(b) 仿真模型

图2 方铁心模型

Fig. 2 Square core model

2.1 步进搭接宽度不同的影响

模型以3级步进搭接为例,两片一叠,步进搭接宽度(尖角伸出部分长度)分别取5、7.5、10 mm建模。由于洛伦兹力主要集中于接缝区域,对接缝区域硅钢片采取独立建立,见图2(b)。模型未建立独立的硅钢片绝缘涂层,MagNet软件中表面设置为良绝缘(perfect electric insulator)边界(免去了 μm 级的气隙剖分和求解)^[17-18],硅钢片设置磁各向异性和各向同性电导率。

取同一接缝区域的硅钢片进行数据分析。相同工作磁密1.7 T下不同搭接宽度时的磁场和洛伦兹力密度分布云图,见图3、4。随着步进搭接宽度的增加,接缝区域内相邻两个接缝之间的距离变大,相同的主磁通穿过相邻硅钢片的位置向远离接缝的方向移动,由于磁通相对分散,磁密略有降低。但随着步进搭接宽度的增加,接缝区域叠片内的洛伦兹力增大比较明显,易在片间形成更大的振动,引起更大的噪声。

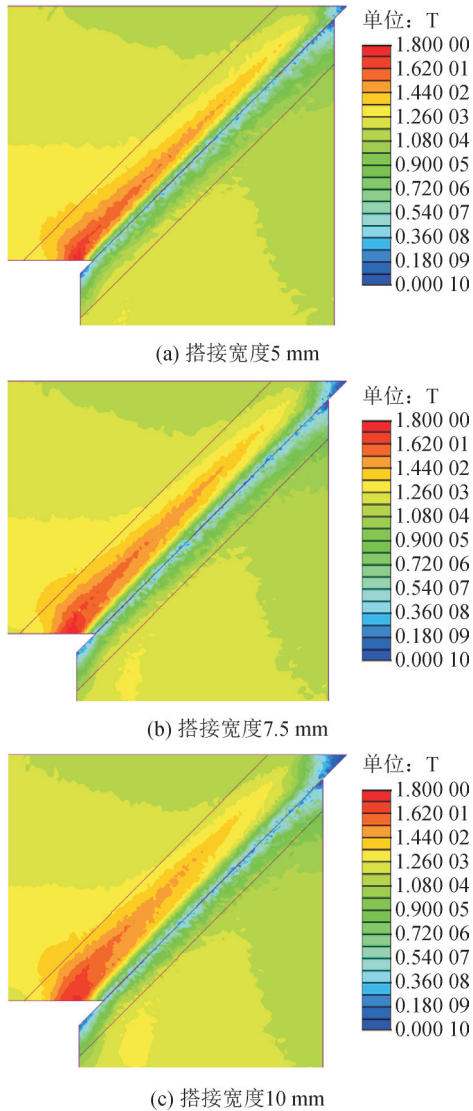


图3 3级步进不同搭接宽度时接缝区域磁场分布图
 Fig. 3 The magnetic field distribution of the joint area with different three-step lap widths

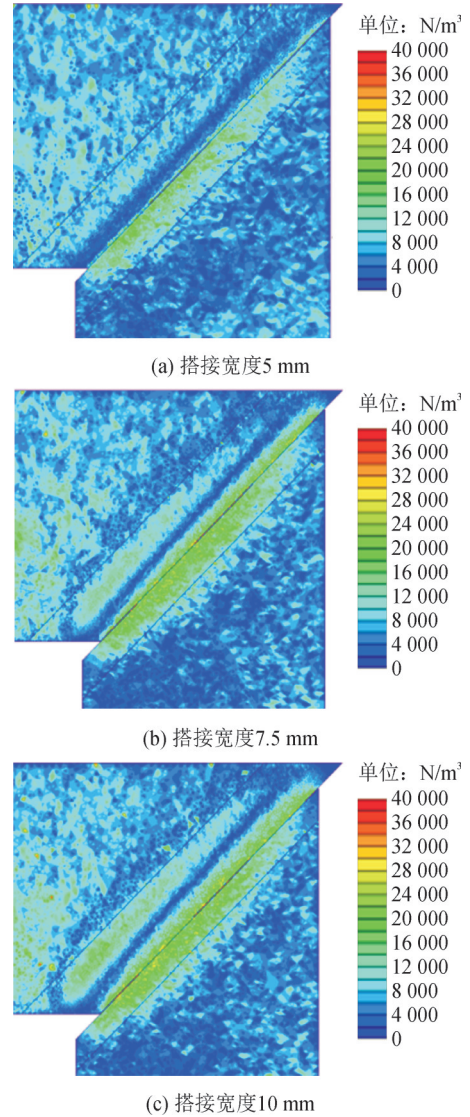


图4 3级步进搭接宽度不同时,接缝区域叠片方向洛伦兹力密度分布云图

Fig. 4 The Lorentz fore density distribution of the joint area with different three-step lap widths

搭接宽度10 mm接缝区域矢量图见图5。图5(a)为一个10 mm 3级步进循环的硅钢片排布。接缝区域的涡流矢量和洛伦兹力矢量见图5(b)、(c)。从图5可以看出,硅钢片接缝区域存在明显的涡流和洛伦兹力。仿真得到图示A区域的洛伦兹力为466 N,其方向朝向 $-z$ 方向,该区域表面受洛伦兹力平均压强约为0.364 MPa。对于B区域,洛伦兹力一部分方向朝向 $+z$ 方向,即左右两部分受力方向相反,使该区域的硅钢片发生弯曲变形。A、B区域在交变磁通作用下,洛伦兹力正负交变,从而产生叠积方向的振动,这便深入的解释了第1节接缝产生振动的原理,并说明了其振动形态。

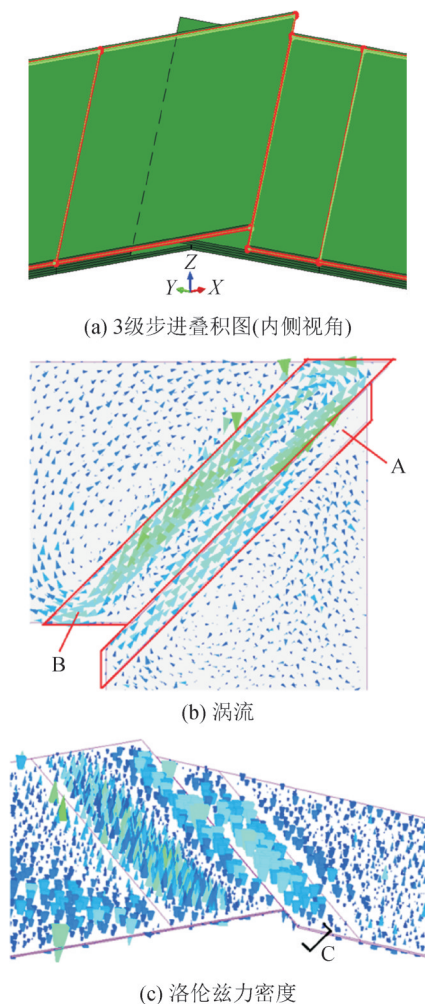


图5 搭接宽度 10 mm 接缝区域矢量图

Fig. 5 The joint area vector diagram of 10 mm lap width

对不同搭接宽度一个3级步进循环C区域内6片硅钢片进行洛伦兹力和表面平均压强统计结果见表1。随步进搭接宽度的增加,每片硅钢片的洛伦兹力产生变化,所在区域内的压强随着搭接宽度的增加而增大,显然,振动强度增大。在实际产品制造中,需要满足机械强度的前提下,减小搭接面积^[12],设计磁密1.7 T时,对铁心的夹紧力控制压强不应小于表中数值。

表1 三级步进洛伦兹力及压强仿真结果

Table 1 Calculation results of Lorentz force and pressure

片号	洛伦兹力/N			表面平均压强/MPa		
	5 mm	7.5 mm	10 mm	5 mm	7.5 mm	10 mm
1	499	473	436	0.280	0.309	0.340
2	-550	-509	-466	-0.309	-0.332	-0.364
3	-711	-988	-1 225	-0.256	-0.326	-0.373
4	235	357	443	0.084	0.118	0.135
5	425	395	408	0.186	0.173	0.179
6	81	281	405	0.036	0.123	0.178

2.2 步进级数不同的影响

为了明显显示步进级数的影响,以3级步进和6级步进、搭接宽度5 mm为例,进行接缝磁场和受力分析。3级步进、6级步进搭接的磁场分布云图见图6、7。

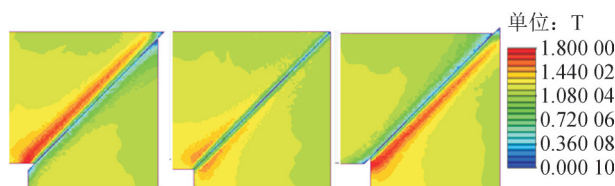


图6 3级步进各层硅钢片的接缝区域磁场分布图

Fig. 6 Magnetic field distribution of silicon steel sheet joint area

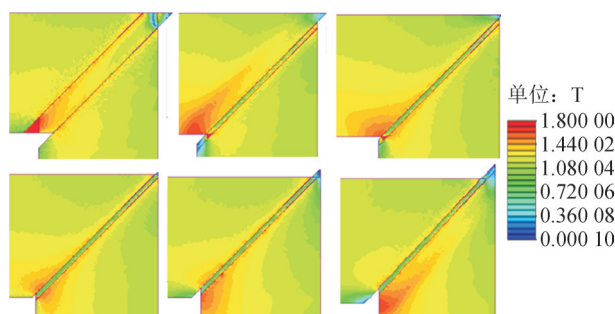


图7 6级步进各层硅钢片的接缝区域磁场分布图

Fig. 7 Magnetic field distribution of silicon steel sheet joint area steel sheets

3级步进搭接时,1、3级接缝区域内存在饱和区。而6级步进搭接时,每级接缝区域磁密降低很多,明显低于3级步进。由于磁致伸缩随着磁密的降低而降低,增加步进级数,可以降低非叠积方向磁致伸缩引起的振动噪声。

6级步进搭接可以采用2种搭接形式,见图8。图8(a)硅钢片叠积顺序为123456,图8(b)硅钢片叠积顺序为135246,均为2片一叠。图7结果为叠积顺序123456。2种搭接形式中序号为1的两片硅钢片的洛伦兹力密度见图9,差异很明显:135246搭接的洛伦兹力密度明显小于123456搭接。其他对应各片也可以得到相应结果。

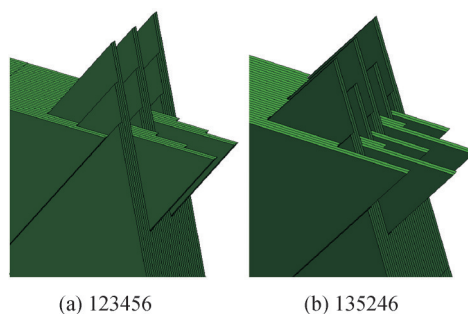


图8 6级步进搭接形式

Fig. 8 Six-step lap joint form

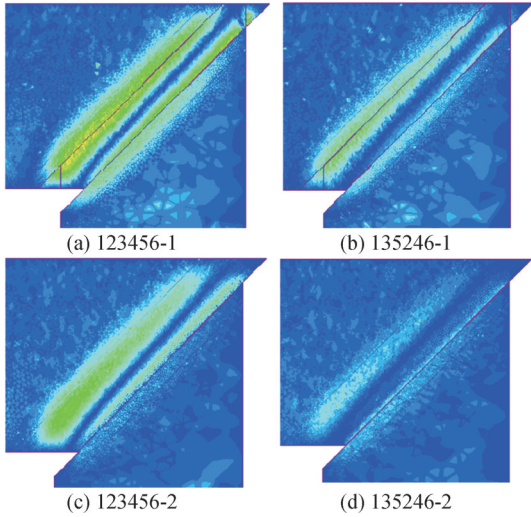


图9 第1级硅钢片接缝区域洛伦兹力密度

Fig. 9 The Lorentz force density of the first-step silicon steel sheet in the joint area

进一步从二维磁力线的角度分析改变叠片顺序对洛伦兹的影响,见图10、11。图10为123456顺序步进搭接时的磁力线分布图,两个接缝之间磁力线单向穿过,而如图11的135246顺序步进搭接时,磁力线在接缝区域进出同一片硅钢片,形成两个反向的洛伦兹力,使得接缝区域洛伦兹力之和大大降低。效果如图9。由此可知,135246搭接的接缝区域叠片方向因洛伦兹力引起的振动噪声会明显较小。

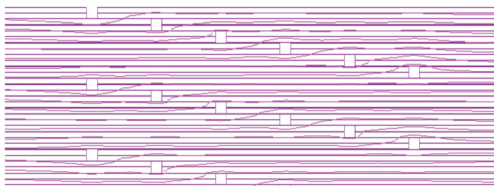


图10 硅钢片123456顺序步进的接缝区域磁力线分布

Fig. 10 Magnetic field line distribution of silicon steel sheet which the step sequence is 123456 in the joint area

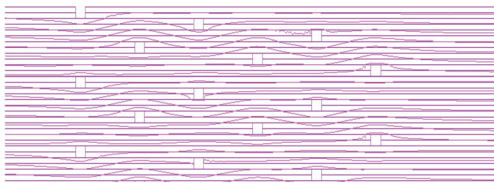


图11 硅钢片135246顺序步进的接缝区域磁力线分布

Fig. 11 Magnetic field line distribution of silicon steel sheet which the step sequence is 135246 in the joint area

2.3 每层叠片数量的影响

文中以7级步进搭接为例,每层两片一叠和一片一叠进行比较。两种情况下的仿真结果见图12,铁心模型整体厚度表面的洛伦兹力密度能直观看出:一片一叠的洛伦兹力明显较小,约为两片一叠的40%,即两片一叠将引起接缝区域叠片方向上更大的振动,噪声增加。为了改善接缝部位的噪声,

一片一叠更有优势。

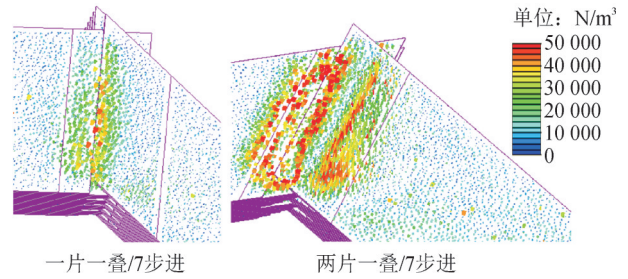


图12 7级步进叠片方向洛伦兹力密度

Fig. 12 Lorentz force density in lamination direction

3 夹紧力对铁心振动的影响试验

由于硅钢片在叠片方向洛伦兹力影响较大,为了降低叠片方向的振动噪声,需要对硅钢片叠片方向施加夹紧力,不但保证铁心结构的强度和稳固性,还能降低硅钢片振动引起的噪声。主柱外有拉板,采用绑扎紧固;上下轭外有夹件,对轭和接缝进行夹紧控制。方铁心模型振动噪声测点见图13,1号区域为铁轭,2号区域为心柱,通过轭中间两个夹具、两端各一个螺栓,螺栓上贴了应变片,并用压力传感器、力矩扳手等手段量化夹紧装置的压力从而实现控制铁心所受压强^[19-20],平均分配夹紧力,使夹件均匀受力,使轭的压强达到规定值。

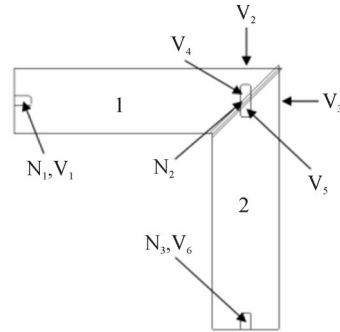


图13 振动、噪声测点

Fig. 13 Vibration and noise measuring points

采用单点激光测振仪对铁心振动进行非接触式测量,用声级计进行噪声测量。图13中, N_1-N_3 为噪声测点, V_1-V_6 为振动测点^[4]。 V_4 和 V_5 对应洛伦兹力方向的振动。0.08、0.15 MPa下振动加速度和噪声测量结果见表2-5,对比结果见图14-17。夹紧力增大的降噪效果见表6。

表2 0.08 MPa压紧力下的各测点振动加速度

Table 2 Vibration acceleration at 0.08 MPa pressing force

磁密/T	加速度/(mm·s ⁻²)					
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
1.20	0.11	0.05	0.06	0.48	1.00	0.20
1.75	0.50	0.50	0.35	2.10	2.80	0.80
1.80	0.60	0.65	0.45	2.20	3.00	0.90

表3 0.15 MPa压紧力下的各测点振动加速度

Table 3 Vibration acceleration at 0.15 MPa pressing force

磁密/T	加速度/(mm·s ⁻²)					
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆
1.20	0.07	0.28	0.05	0.20	1.40	0.09
1.75	0.32	0.70	0.40	0.60	2.50	0.60
1.80	0.48	0.80	0.50	0.70	2.80	0.75

表4 0.08 MPa夹紧力下的各测点噪声

Table 4 Noise at 0.08 MPa clamping force

磁密/T	噪声值/dB(A)		
	N ₁	N ₂	N ₃
1.20	52.1	56.8	52.6
1.75	68.1	71.6	63.7
1.80	69.9	72.7	64.8

表5 0.15 MPa夹紧力下的各测点噪声

Table 5 Noise at 0.15 MPa clamping force

磁密/T	噪声值/dB(A)		
	N ₁	N ₂	N ₃
1.20	43.9	45.9	46.6
1.75	55.7	58.6	58.4
1.80	57.2	59.5	60.8

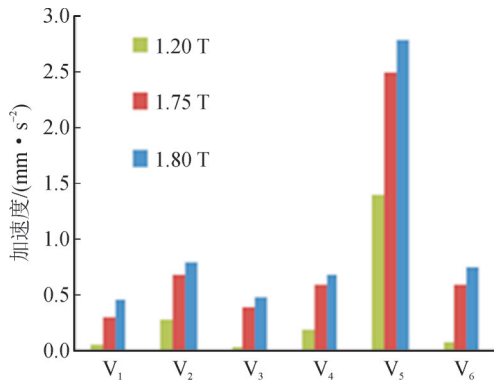


图14 0.15 MPa夹紧力下的振动加速度

Fig. 14 Vibration acceleration at 0.15 MPa clamping force

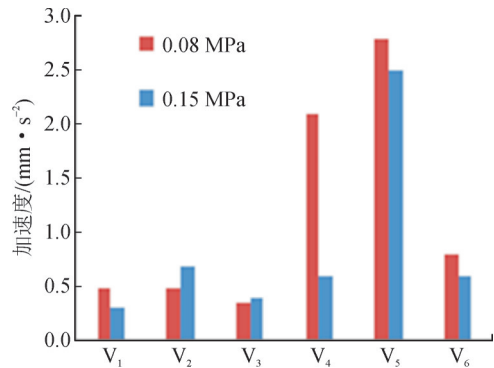


图15 1.75 T的振动加速度

Fig. 15 Vibration acceleration at 1.75 T

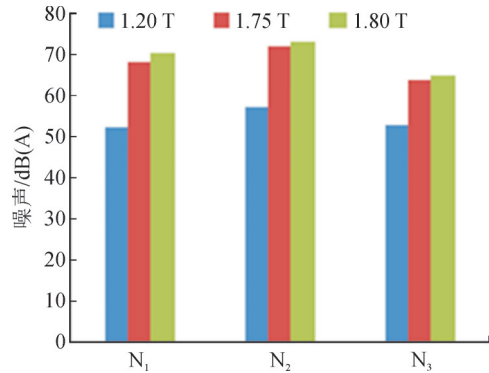


图16 0.15 MPa时的噪声

Fig. 16 Noise at 0.15 MPa clamping force

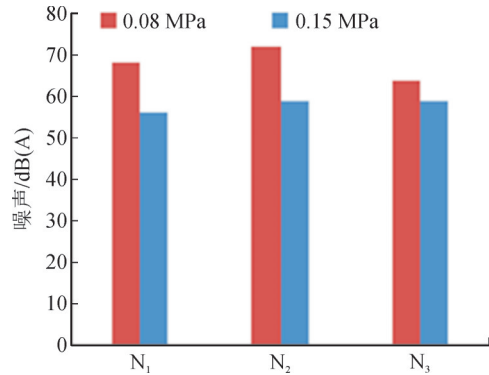


图17 1.75 T的噪声

Fig. 17 Noise measurement at 1.75 T

表6 夹紧力增大的降噪效果

Table 6 Noise reduction results with increased clamping force

磁密/T	噪声值/dB(A)		
	N ₁	N ₂	N ₃
1.20	8.2	10.9	6.0
1.75	12.4	13.0	5.3
1.80	12.7	13.2	4.0

从上述试验结果可知,振动加速度、噪声随着磁密的增加而增加。夹件位于试验模型的上下,水平放置,对水平放置的硅钢片在叠厚方向进行夹紧。工作磁密一定,整个铁心不同位置对夹紧力的反应不尽相同:

- 1)叠片方向的测点V₁、V₄、V₅、V₆随着夹紧力的增大振动加速度降低,噪声减小,与仿真结论一致。
- 2)代表磁致伸缩的振动测点V₂、V₃是位于垂直轧制方向,随着夹紧力的增大而振动增强,但振动幅度远小于叠积方向。
- 3)接缝振动、噪声远大于非接缝区域,说明洛伦兹力引起的振动是铁心噪声的其主要因素,远超过磁致伸缩的影响。
- 4)增大夹紧力,夹件所处的水平方向降噪效果显著,尤其是接缝部位降噪显著,压力从0.08 MPa

增大到0.15 MPa 噪声降低超过 10 dB(A)。

5)由于铁心结构中存在纵向拉板,夹件对拉板起到夹紧作用。增大夹紧力,对降低纵向铁心的噪声也起到了一定效果。

4 结论

通过硅钢单片级建模仿真和不同夹紧力的试验,从理论上说明了接缝区域叠片间的洛伦兹力是铁心振动噪声的重要影响因素,远超过磁致伸缩的影响,并得以试验验证。研究结果表明设计好铁心接缝,增大夹紧力对铁心减振降噪有明显效果。

通过步进搭接宽度、步进级数、每叠片数等方面的分析,接缝设计优化总结如下:

1)步进搭接宽度不宜太宽,5 mm 即可。

2)接缝区域的磁密随着步进级数的增加而降低,磁密降低,磁致伸缩降低,振动噪声降低。

3)对于6级步进,改变搭接顺序可以降低接缝区域洛伦兹力,降低振动噪声。135246的步进顺序有利于减振降噪。

4)一片一叠在减振降噪方面优于两片一叠。叠片铁心是变压器产品中普遍采用的结构形式,以上研究结果适用于各类型叠片铁心变压器,后续将在不同电压、容量的变压器产品上进一步验证。

参考文献:

- [1] 刘建锋,董倩雯,田书欣,等.基于ReliefF-mRMR漏磁场特征优选和改进LSSVM的变压器绕组早期故障诊断[J].电测与仪表,2025,62(11):198-209.
LIU Jianfeng, DONG Qianwen, TIAN Shuxin, et al. Early fault diagnosis of transformer winding based on ReliefF-mRMR leakage magnetic field feature optimization and improved LSSVM[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11): 198-209.
- [2] 杜梦如,胡涛,王学伟,等.有色高斯噪声对功率估计算法的影响[J].电测与仪表,2025,62(8):154-159.
DU Mengru, HU Tao, WANG Xuewei, et al. Influence of colored Gaussian noise on power estimation algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8): 154-159.
- [3] 汲胜昌,师愉航,张凡,等.电力变压器振动与噪声及其控制措施研究现状与展望[J].高压电器,2019,55(11):1-17.
JI Shengchang, SHI Yuhang, ZHANG Fan, et al. Review on vibration and noise of power transformer and its control measures[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 1-17.
- [4] 刘涛,张俊杰,刘兰荣,等.接缝对叠积式铁心振动与噪声影响的实验及仿真研究[J].变压器,2022,59(3):48-53.
LIU Tao, ZHANG Junjie, LIU Lanrong, et al. Experimental and simulation study on influence of joints on vibration and noise of laminated core[J]. Transformer, 2022, 59(3): 48-53.
- [5] 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.
ZHU Lihua. Study of affection from magnetostriction in laminated core on vibration noise of transformer and AC motor[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [6] 崔克彬,陈龙,吕顺利,等.基于多维特征量时空对齐融合的变压器故障诊断模型[J].电子设计工程,2025,33(20):58-61.
CUI Kebin, CHEN Long, LYU Shunli, et al. Transformer fault diagnosis model based on temporal and spatial alignment fusion of multi-dimensional state characteristic quantities[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(20): 58-61.
- [7] 张黎,王国政,董攀婷,等.基于磁致伸缩本征特性的晶粒取向性变压器铁心振动模型[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3990-4000.
ZHANG Li, WANG Guozheng, DONG Panting, et al. Study on the vibration of grain-oriented transformer core based on the magnetostrictive intrinsic characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3990-4000.
- [8] 严兆楠.硅钢片磁特性与磁致伸缩特性测量[J].变压器,2024,61(10):54-58.
YAN Zhaonan. Research of loss and temperature field of parts in power transformer[J]. Transformer, 2024, 61(10): 54-58.
- [9] 张献.变压器叠片铁心接缝电磁特性与损耗特性研究[D].天津:河北工业大学,2008.
ZHANG Xian. Research on electromagnetic and loss characteristics of transformer laminated core joints[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2008.
- [10] 王佳音.硅钢片磁致伸缩及直流偏磁下变压器振动噪声问题研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2015.
WANG Jiayin. Research on magnetostriction of silicon-steel sheet and vibration and noise of transformer under DC bias[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2015.
- [11] 赵倩,闫维娜,行新鹏.桥臂电抗器的噪声测试与分析[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(3):45-51.
ZHAO Qian, YAN Weina, XING Xinpeng. Test and analysis for noise of bridge arm reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 45-51.
- [12] 范巍巍.浅谈阶梯接缝叠铁心的优越性[J].变压器,2003,40(8):26-28.
FAN Weiwei. Brief discussion on advantages of step-lap laminated core[J]. Transformer, 2003, 40(8): 26-28.
- [13] 汪建新,王玉平,张秀梅.采用多接缝叠铁心优化变压器性能[J].包钢科技,2008,34(6):59-60.
WANG Jianxin, WANG Yuping, ZHANG Xiumei. Using step-lap laminated core to improve the performance of transformer[J]. Science & Technology of Baotou Steel(Group) Corporation, 2008, 34(6): 59-60.
- [14] 李维铮.叠片铁心搭迭区磁等效及电磁振动分析[D].天津:天津工业大学,2020.
LI Weizheng. The equivalent magnetization and electromagnetic vibration analysis in the laminated core overlap area[D]. Tianjin: Tiangong University, 2020.
- [15] 林师.基于改进灰狼算法优化BP神经网络的变压器故障高精

- ery, 2024, 39(4): 2520-2529.
- [10] TRENCHAM T. Circuit breaking[M]. London: Butterworth Scientific Publications, 1953.
- [11] RINGLEE R J, ROBERTS N W. Tank pressures resulting from internal explosions[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1959, 78(4): 1705-1710.
- [12] FOATA M, IORDANESCU M, HARDY C. Computational methods for the analysis of explosions in oil-insulated electrical equipment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(1): 286-293.
- [13] 姜 岚, 陈云桥, 王 爽, 等. 基于实际气体模型的油浸式变压器爆炸应力分布研究[J]. 变压器, 2024, 61(1): 29-34.
JIANG Lan, CHEN Yunqiao, WANG Shuang, et al. Study on stress distribution of oil-immersed transformer explosion based on actual gas model[J]. Transformer, 2024, 61(1): 29-34.
- [14] 刘苗苗, 胡 攀, 韦 虹. 基于 Ansys Maxwell 的气隙边缘效应对电感参数的影响[J]. 变压器, 2024, 61(1): 35-39.
LIU Miaomiao, HU Pan, WEI Hong. Influence of air gap edge effect on inductor parameters based on Ansys Maxwell[J]. Transformer, 2024, 61(1): 35-39.
- [15] 冯玉辉, 高 超, 杨中卿. 核电大型变压器现场绝缘干燥技术研究与应用[J]. 变压器, 2024, 61(1): 47-50.
FENG Yuhui, GAO Chao, YANG Zhongqing. Research and application of low frequency heating technology for large nuclear power transformer windings [J]. Transformer, 2024, 61(1): 47-50.
- [16] 陈一棕, 陈宗让, 张 芑, 等. 特高压换流变压器匝间短路故障建模与仿真[J]. 电工电能新技术, 2024, 43(10): 43-51.
CHEN Yicong, CHEN Zongrang, ZHANG Peng, et al. Modeling and simulation of interturn short-circuit faults in ultra-high voltage converter transformers[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(10): 43-51.
- [17] 闫晨光, 徐 彻, 曹 培, 等. 电力变压器瓦斯继电器暂态动作特性研究[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(5): 1-7.
YAN Chenguang, XU Che, CAO Pei, et al. Research on transient characteristics of power transformer gas relay[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(5): 1-7.
- [18] 闫晨光, 郝治国, 张保会, 等. 电力变压器油箱形变破裂建模及仿真[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 180-187.
YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Modeling and simulation of power transformer tank deformation and rupture [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 180-187.
- [19] 闫晨光, 郝治国, 张保会. 基于压力特征的变压器数字式保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6405-6412.
YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui. Power transformer digital protection based on internal pressure characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6405-6412.
- [20] YAN Chenguang, XU Che, LIU Hao, et al. Research on oil pressure rise and fluctuation due to arcing faults inside transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1483-1492.
- [21] 吴奇松, 夏君宇, 赵国庆, 等. CVT 电容分压器末端放电故障分析 [J]. 变压器, 2024, 61(1): 62-65.
WU Qisong, XIA Junyu, ZHAO Guoqing, et al. Analysis of discharge fault at end screen of CVT capacitor voltage divider[J]. Transformer, 2024, 61(1): 62-65.
- 刘志峰(1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为绝缘介质的检测分析及故障诊断(E-mail: 1412149786@qq.com)。
廖建平(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为绝缘介质的检测分析及故障诊断。
张 翠(1994—), 女, 硕士, 工程师, 从事电力保护系统研究(通信作者)(E-mail: zujianjishu@126.com)。
- (上接第 84 页)
- 度诊断方法[J]. 电子设计工程, 2025, 33(14): 144-149.
LIN Shi. The high-precision diagnosis method for transformer fault based on the improved gray wolf algorithm to optimize BP neural network[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(14): 144-149.
- [16] 李国伟, 唐 琪, 王俊波, 等. 基于经验小波变换的电力变压器绕组松动故障诊断振动分析[J]. 电子设计工程, 2025, 33(10): 98-102.
LI Guowei, TANG Qi, WANG Junbo, et al. Vibration analysis of power transformer windings loosening fault diagnosis based on empirical wavelet transform[J]. Electronic Design Engineering, 2025, 33(10): 98-102.
- [17] ZHENG Weiyang, CHENG Zhiguang. An inner-constrained separation technique for 3-D finite-element modeling of grain-oriented silicon steel laminations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(8): 2277-2283.
- [18] ZHENG Weiyang, CHEN Xinhong. Subspace correction method for computing magnetic shields in large power transformers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(5): 1-6.
- [19] 张贤国, 康宏彪, 陈宇鹏, 等. 降低大型电力变压器铁心噪声的工艺措施[J]. 电气制造, 2010(12): 32-33.
ZHANG Xianguo, KANG Hongbiao, CHEN Yupeng, et al. Process measures for reducing core noise of large power transformer[J]. Electrical Manufacturing, 2010(12): 32-33.
- [20] 鲁殿国. 优化和控制大型变压器铁心夹紧力降低本体噪声[J]. 变压器, 2012, 49(3): 25-27.
LU Dianguo. Optimization and control of core clamping force of large transformer to reduce transformer noise[J]. Transformer, 2012, 49(3): 25-27.
- 陈晓刚(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 长期从事安全生产、环保与科技创新工作, 统筹制定浙江公司科技发展规划, 负责进行输变电设备安全、环保相关的科研(E-mail: carlexg1980@126.com)。
刘兰荣(1978—), 女, 硕士, 正高级工程师, 长期从事变压器相关基础研究和关键共性技术的研究工作, 包括变压器关键材料特性、振动与噪声关键技术、电磁热仿真研究等(通信作者)(E-mail: 53856276@qq.com)。