

直流偏磁下变压器铁心搭迭区域电磁振动的分析

李维铮, 祝丽花, 石永恒, 王前超

(天津工业大学电工电能新技术天津市重点实验室, 天津 300387)

摘要:取向硅钢片的磁致伸缩特性是引起变压器铁心振动的主要原因,同时叠片铁心拐角搭迭区域的电磁力也会影响铁心振动,另外,直流偏磁会加剧铁心的振动。本文考虑直流偏磁工作状态的影响,针对铁心搭迭区域的电磁振动进行了分析。以定制的方圈铁心为研究对象,建立了包含搭迭缝隙的三维仿真模型,通过仿真计算得到了直流偏磁条件下不同时刻的应力和位移分布,进而分析了直流偏磁条件下由磁致伸缩力和电磁力引起的铁心振动。最后对实验室中的方圈铁心展开了直流偏磁下的振动实验,实验结果证明了仿真结果的正确性。研究结果表明,在直流偏磁条件下,对搭迭区域进行振动分析需要建立包含搭迭缝隙的三维仿真模型,同时也应该考虑电磁力对铁心振动的影响,此外,直流偏磁会使励磁电流发生畸变,铁心磁场周期分布不对称,变压器铁心搭迭区域振动增强,振动的高次谐波和奇次谐波含量增加。

关键词:直流偏磁;铁心振动;磁致伸缩;电磁力;搭迭区域

DOI: 10.12067/ATEEE1906023 **文章编号:** 1003-3076(2020)07-0009-07 **中图分类号:** TM412

1 引言

电力变压器作为电力传输环节的关键设备被广泛使用,其运行过程中产生的振动噪声会影响人们正常的生活环境^[1]。而由铁心拐角搭迭区域电磁力和磁化过程中硅钢片内部产生的磁致伸缩力引起的铁心本体振动是变压器振动噪声的主要来源^[2]。同时,随着我国高压直流输电工程的快速发展,采用单级大地方式运行的变压器中混入直流偏置电流时,变压器会工作在直流偏磁条件下,由此会引起变压器振动噪声的异常增大^[3,4]。

针对铁心振动问题,国内外学者开展了大量的研究工作。文献[5]研究了直流入侵导致的单相变压器励磁电流畸变和谐波分布情况。文献[6]通过实验和仿真计算对比分析了麦克斯韦力和磁致伸缩效应对并联电抗器铁心振动的影响。文献[7,8]对直流偏磁条件下一台干式变压器的空载振动进行了有限元仿真计算与实验测量,分析了直流偏磁对变压器振动噪声的影响。文献[9]通过测量直流偏磁条件下铁心拐角处的磁通密度,发现直流偏磁条件

下考虑铁心拐角处磁密分布对变压器等效电路模型的建立至关重要。文献[10]通过对变压器铁心进行三维建模分析了直流偏磁条件下的磁通分布和磁致伸缩的变化情况。文献[11]通过设计一种新的直流偏磁实验分析了直流偏磁下实验变压器振动噪声的变化情况。文献[12]对电磁力和磁致伸缩力引起的变压器铁心电磁振动分别进行了分析。文献[13]对直流偏磁下变压器的受力情况进行了有限元仿真分析,发现直流偏磁使变压器振动增强。文献[14]基于场路耦合模型对变压器直流偏磁下的励磁电流进行了分析计算。

现有的文献对直流偏磁下导致的铁心拐角搭迭区域振动异常的研究还有很多不足之处。为此,本文以定制的产品级方圈铁心模型为研究对象,对直流偏磁下变压器铁心搭迭区域的振动规律展开研究。通过商用仿真软件搭建了包含方圈铁心搭迭缝隙的三维模型,仿真得到了不同直流偏磁下搭迭区域磁通密度的分布规律,进而与结构力学耦合分析了不同直流偏磁条件下由电磁力和磁致伸缩力引起的铁心搭迭区域的振动情况,并用定制的方圈样机

收稿日期: 2019-06-14

基金项目: 天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5040)

作者简介: 李维铮(1993-),男,河北籍,硕士研究生,研究方向为电力变压器铁心电磁振动;
祝丽花(1984-),女,河南籍,副教授,博士,研究方向为电工装备减振降噪技术。

进行了实验测量来验证仿真模型的正确性。

2 磁机械场耦合理论分析

变压器铁心振动是一个电路、磁场、结构力场多物理场耦合问题。当考虑到直流偏磁的影响时,问题会变得更加复杂。

2.1 电磁场分析

对磁场问题的分析是以电磁方程组为基础的,在电磁场仿真模块中,求解的因变量是磁矢势 \mathbf{A} ,变压器铁心正常工作时,由于工频激励而忽略位移电流的影响,则其满足的微分方程为:

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} \tag{1}$$

式中, μ_0 为真空磁导率,其大小为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; μ_r 为相对磁导率; \mathbf{A} 为磁矢势; \mathbf{J} 为绕组电流密度,由外电路计算得到。为了提高仿真的准确性,在电路模型中还考虑了线圈电阻等条件,外电路电路图如图 1 所示。

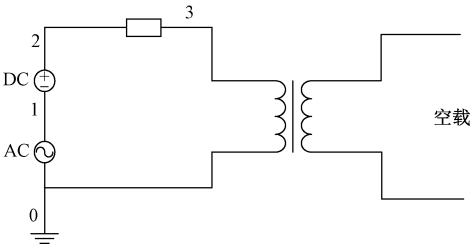


图 1 系统仿真电路图
Fig.1 System simulation circuit diagram

在磁场分析过程中存在如下本构关系:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{2}$$

2.2 结构力场分析

当变压器工作在直流偏磁状态下时,磁致伸缩力和电磁力都会不同程度增大,从而引起更强的铁心振动。

在结构力场的仿真分析中,通过计算得到的磁感应强度求出铁心的磁致伸缩应变,然后采用弹性力学的应力应变关系将磁致伸缩应变转化为磁致伸缩应力,最后作为体载荷加载到结构力场中。同时,将有限元分析得到的各单元的磁感应强度和磁场强度选取适当的封闭曲面求取电磁力,然后将电磁力作为边界载荷加载到结构力场中。

磁致伸缩应变由仿真求解得到的磁通密度与磁致伸缩插值曲线拟合得出,如式(3)所示:

$$\epsilon = k \mathbf{B} \tag{3}$$

式中, ϵ 为应变; k 为曲线拟合系数。

三维弹性体中,应力应变的关系为:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\epsilon} \tag{4}$$

式中, $\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量; \mathbf{D} 为弹性张量,用来表征物体在应力作用下抵抗产生应变的能力。

磁致伸缩体积力 \mathbf{F}_{vms} 由应力张量求散度得到,即

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = - \mathbf{F}_{\text{vms}} \tag{5}$$

电磁力 \mathbf{F}_{max} 可用应力张量 \mathbf{T} 的面积分来计算:

$$\mathbf{F}_{\text{max}} = \int_S \mathbf{T} d\mathbf{S} \tag{6}$$

式中, \mathbf{T} 可用气隙表面处的磁通密度分量求得。

结构力场中求解域方程为:

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} + \mathbf{C} \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{F}_{\text{vms}} + \mathbf{F}_{\text{max}} \tag{7}$$

式中, \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵; \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{u} 为位移矢量。如果忽略铁心的阻尼效应,则求解的结构力场微分方程中的第二项将被省略。

根据硅钢片铁心中计算得到的磁致伸缩体积力和电磁力求得铁心位移,然后根据位移计算结果可求出铁心加速度、应变等参数。

3 仿真数值计算与实验测量分析

3.1 仿真数值计算及结果分析

变压器铁心振动数值分析是一个电场、磁场、结构力场多物理场耦合问题,通过场路耦合方法将直流电压源激励串联接到外电路中,模拟变压器直流偏磁条件下的励磁环境,同时将得到的外部电流密度作为磁场的初始激励加载到磁场模块中,然后通过计算出的铁心磁场分布情况结合磁致伸缩曲线计算出铁心应力分布,最后通过结构力场的求解域方程计算出铁心位移等参数。

3.1.1 仿真模型的建立

本文以一个三级步进搭迭结构的产品级叠片铁心模型方圈为研究对象,对其进行三维仿真建模并进行时域求解分析,方圈主要参数见表 1。

表 1 铁心模型参数

Tab.1 Core model parameters

参数	数值
硅钢片密度/(kg/m ³)	7 650
激磁线圈匝数/匝	144
导线密度/(kg/m ³)	8.90×10 ³
激磁线圈线规/mm	Φ1.6
测量线圈匝数/匝	144
20 ℃时导线电导率/(S/m)	5.71×10 ⁷
测量线圈线规/mm	Φ0.6

为了考虑搭迭区域电磁力对铁心振动的影响, 本文建立了包含 0.5 mm 搭迭缝隙的方圈铁心模型, 同时由于方圈模型具有对称性, 本文只建立了 1/8 方圈结构的仿真模型。此外, 本文还忽略了叠片间竖直电磁力和搭迭结构铁心内、外拐角三角形区域的影响, 对其进行了整体化处理, 建立的方圈搭迭区域的三维模型如图 2(a) 所示。由于在有限元计算中需要网格剖分, 而剖分网格对网格质量有下限要求, 搭迭缝隙的存在使物理场剖分网格失效, 需要采用自定义网格剖分形式, 本文在对铁心表面进行自由三角形网格剖分后采用扫略的方法对铁心进行了剖分, 其网格剖分结果如图 2(b) 所示。方圈铁心硅钢片轧制方向的磁化曲线如图 3 所示, 磁致伸缩曲线如图 4 所示, 其中磁致伸缩量是将磁致伸缩峰-峰值与磁感应强度峰值通过三次样条插值得到的^[15]。

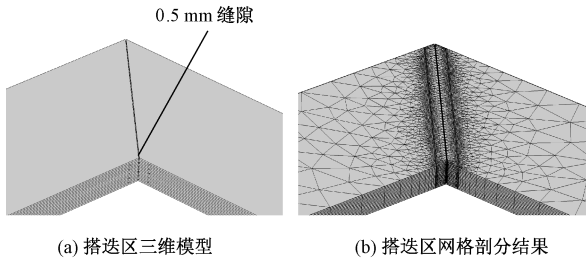


图 2 方圈铁心搭迭区三维模型

Fig.2 3D models of square ring core's overlapping area

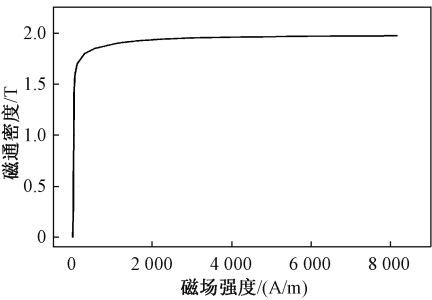


图 3 铁心磁化曲线

Fig.3 Magnetization curve of core

3.1.2 励磁电流和电磁场仿真结果分析

在工频 50 Hz 下, 建立方圈铁心搭迭区域的瞬态三维仿真模型, 加 110 V 的电源激励, 由电磁感应定律可得此时的最大主磁通密度为 1.7 T, 对应变压器铁心正常工作时的主磁通密度, 由实验结果可知, 当铁心工作在 1.7 T 时, 对应的励磁电流为 2.4 A, 本文的仿真模型中分别加入实际工作时 50% 和 100% 的直流电流, 即 1.2 A 和 2.4 A。图 5 为正常

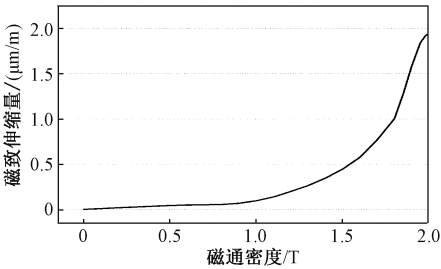


图 4 铁心磁致伸缩特性曲线

Fig.4 Magnetostrictive curves of core

工作条件下和不同直流电流侵入下 3 个周期的空载励磁电流波形。由图 5 可知, 正常工作条件下, 空载电流在正负半周是对称的, 由于铁磁材料磁特性的非线性关系, 所以正常工作条件下的励磁电流波形也会有畸变现象。而随着直流电流的增加, 空载励磁电流的正向峰值迅速增加, 正负半周的电流波形表现出明显的非对称性, 波形畸变严重。

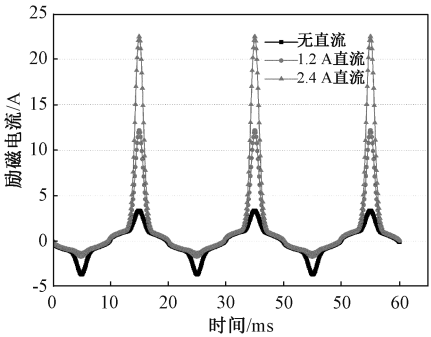


图 5 不同工作条件下励磁电流波形

Fig.5 Excitation current waveforms under different working conditions

磁场的计算是进行结构力场计算的基础, 与励磁电流相对应, 图 6 为不同工作条件下的磁场分布情况, 取 15 ms 时刻的铁心磁通计算结果, 即一个周期内励磁电流极值的情况。可以发现, 正常工作条件下, 变压器铁心磁通密度极值较发生直流偏磁时小 0.1~0.2 T 左右, 且最大磁通密度出现在拐角搭迭区域。于是, 得出结论: 直流偏磁条件下的最大磁通密度要大于正常工作时, 结合励磁电流的周期变化情况, 可知直流偏磁条件下正负半周磁场分布是不对称的, 并且随着直流电流的增加, 正半周期磁通密度增加显著, 结合结构力场相关理论可知, 此时变压器铁心振动也会明显增强。

3.1.3 结构力场仿真结果分析

在直流偏磁条件下, 变压器搭迭区域的铁心会达到饱和状态, 从而引起磁致伸缩力的增强, 同时由

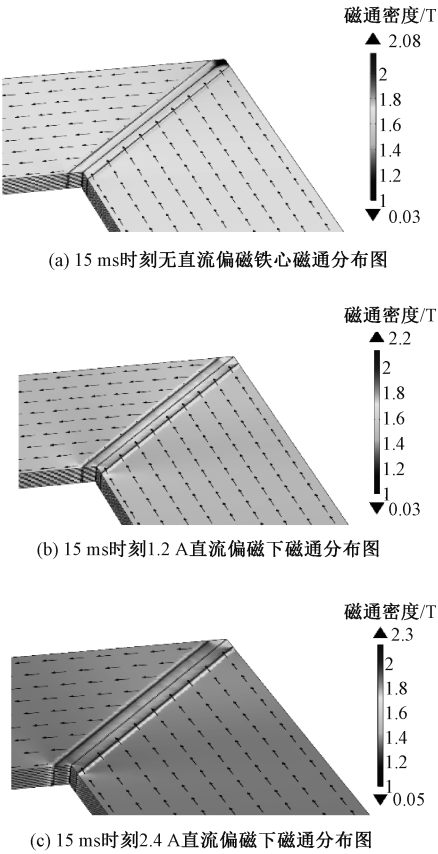


图 6 不同工作条件下磁通分布图

Fig.6 Magnetic flux distribution under different working conditions

缝隙处漏磁通引起的电磁力也会进一步增强,在两种力的共同作用下铁心的电磁振动加剧。为了简化,通常建立的三维仿真模型对搭接区域进行了整体化处理,从而使磁致伸缩力和电磁力都会不同程度的减小。1.2 A 直流偏磁条件下经整体化处理和考虑搭接缝隙两种情况下的铁心振动位移分布如图 7 所示。由图 7 可知,经整体化处理后搭接区域的振动位移情况明显小于考虑搭接缝隙时。于是,得出结论:对直流偏磁下搭接区域进行仿真建模,需要考虑搭接缝隙的影响。

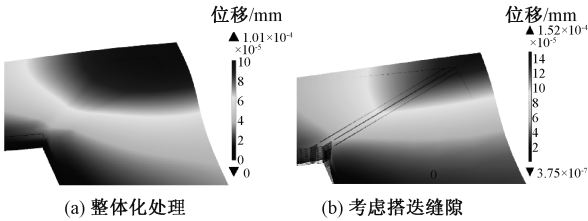


图 7 搭接区域位移分布

Fig.7 Displacement distribution in the overlap area

电磁力和磁致伸缩力是引起铁心振动的两个关键原因。在 1.2 A 直流偏磁条件下,单独考虑电磁力和磁致伸缩力作用时,15 ms 时刻的铁心应力分布如图 8 所示。此时铁心所受的电磁应力和磁致伸缩应力相差 1 个数量级,所以当直流偏磁发生时,磁致伸缩力依然是引起铁心振动的主要原因。但为了准确计算铁心振动,也需要考虑电磁力的作用。本文在以下的计算结果中,均同时考虑了电磁力和磁致伸缩力对振动的影响。

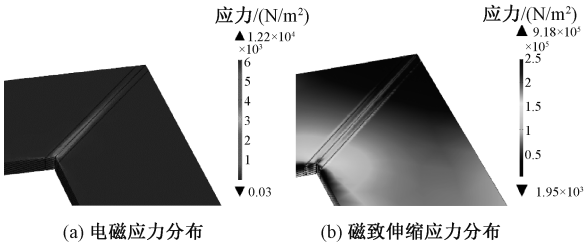


图 8 直流偏磁下电磁应力和磁致伸缩应力对比

Fig.8 Comparison of electromagnetic stress and magnetostrictive stress under dc bias

图 9 为正常工作条件下 15 ms 时刻的铁心应力和位移分布图。此时刻铁心振动位移最大,能够直接反映铁心搭接区域振动的强弱。由图 9 可知,铁心搭接区域的应力和位移最大,最大应力达 $8.48 \times 10^5 \text{ N/m}^2$,最大位移为 $1.39 \times 10^{-4} \text{ mm}$,变压器铁心振动主要表现在拐角搭接区域。

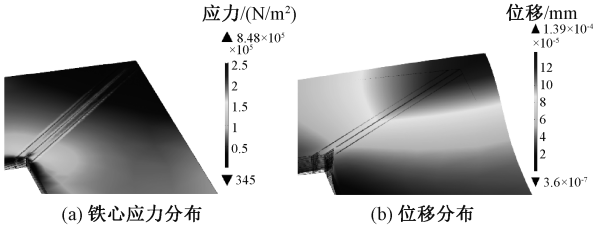


图 9 正常工作条件下铁心应力和位移场分布

Fig.9 Distribution of core stress and displacement under normal working conditions

图 10 为直流偏磁条件下的应力和位移分布图。结合正常工作条件下的应力和位移分布图可知,当直流偏磁发生时,最大应力和位移均有所增大,并且随着直流电流量的增加最大应力和位移也明显增大。这就直接解释了直流偏磁会加剧铁心拐角搭接区域的振动。

为了说明铁心搭接区域的周期振动情况,同时为了更直观地表现直流偏磁下铁心振动的变化情况,选取搭接区域的某点,其在正常工作条件下和加

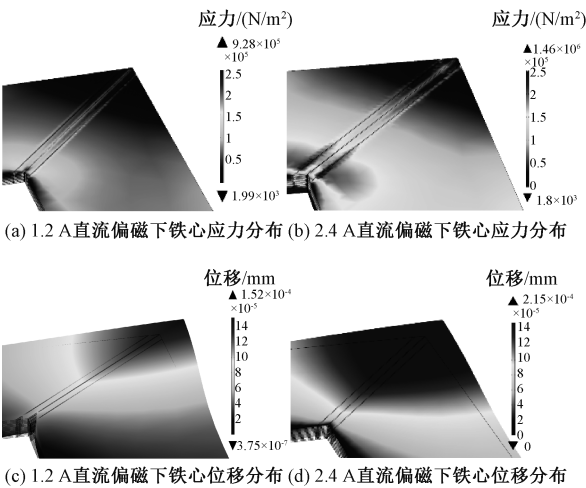


图 10 直流偏磁条件下铁心应力和位移场分布
Fig.10 Distribution of core stress and displacement under dc bias working conditions

入 2.4 A 直流偏磁条件下的位移波形如图 11 所示,时间 0~0.04 s,为两个周期的振动位移。与正常工作条件下的位移波形相比,当直流偏磁发生时由于受到直流磁通的影响,和励磁电流相关的位移波形在负半周期内的幅值低于正常工作条件下的,而在正半周期内刚好相反。将该点的振动位移时域波形进行快速傅里叶变换得到如图 12 所示的振动频谱图,直流偏磁下仍以 100 Hz 为主振频率,也存在大量奇次谐波和少量高次谐波,这与直流偏磁引起变压器奇次谐波含量增加的事实相符。

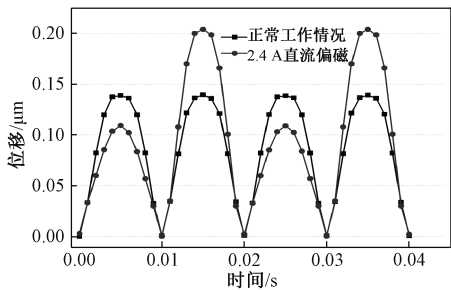


图 11 振动位移时域波形

Fig.11 Time domain waveforms of vibration displacement

3.2 实验验证

实验中对方圈铁心模型进行了激励电压为 110 V,正常工作条件下和加入 2.4 A 直流偏磁条件下的空载实验。直流电源的加载有并联和串联两种方式,已知串联加入更能真实模拟直流输电线路单极运行造成的变压器直流偏磁工作异常状态,同时实验中考虑直流电源所能承受的交流耐压能力并结合方圈具有多根励磁线圈的特点,将直流电流源通过

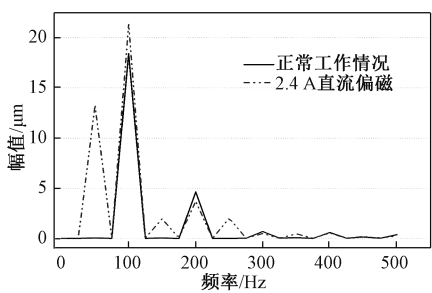


图 12 振动位移频域波形
Fig.12 Frequency domain waveform of vibration displacement

具有相同匝数的二次侧线圈反向串联加入方圈中,该方法具有和串联加入一样的励磁效果。振动测量采用宁波舜宇公司生产的光学微位移测量系统来完成。将激光照射到方圈铁心表面上,测量振动造成的微位移,位移分辨率优于 15 pm。实验电路图和现场图如图 13 所示。

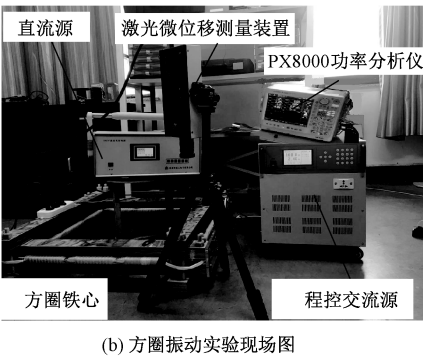
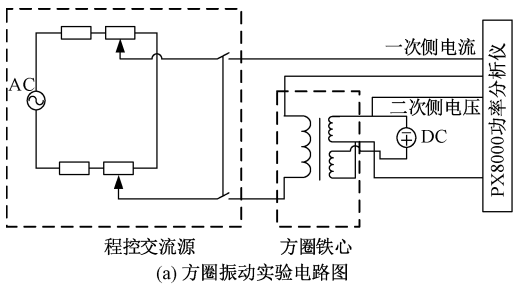


图 13 实验电路图和现场图

Fig.13 Experimental circuit diagram and field diagram

本文选取如图 14 所示的拐角搭迭位置作为振动测点。分别在无直流偏磁条件下和偏磁电流为 2.4 A 条件下测得拐角点 A 处铁心瞬态位移,结合数值计算结果如图 15 所示。可以看出,数值计算值与实验值具有较好的一致性,误差在可接受范围内,验证了数值计算结果的正确性。

从图 15 中可以看出,正常工作条件下,变压器铁心拐角搭迭区域的振动幅度在 0.15 μm 左右,直

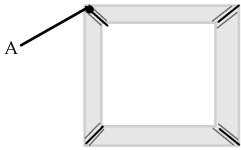


图 14 振动测点的选取

Fig.14 Selection of vibration measuring points

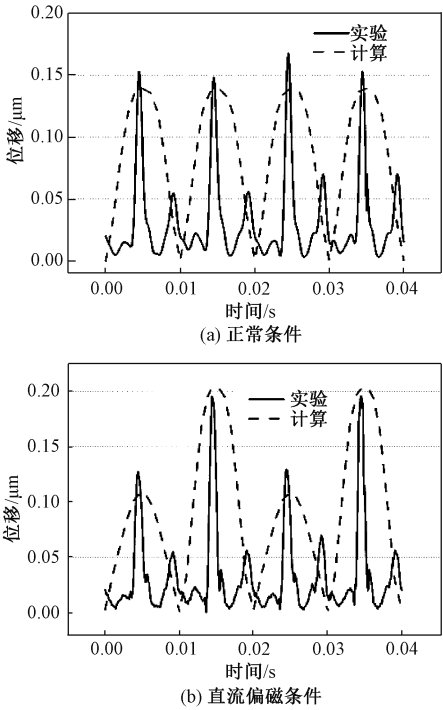


图 15 不同工作条件下铁心 A 点振动计算与实验对比

Fig.15 Calculation and experiment comparison of point

A vibration of core under different working conditions

流偏磁条件下,负半周期内振幅虽然有所减小,但正半周期内振幅增加到 $0.2\text{ }\mu\text{m}$,总体表现为振动幅度增加,说明直流偏磁加剧了铁心的振动。由于磁化曲线的非线性关系,方圈中磁通路径的不同以及实验中方圈振动会受到各种机械约束,所以实测的方圈铁心的振动含有大量的谐波分量。此外,实验中方圈容量较小,加剧效果不是特别明显,实际工作中的变压器由于其容量巨大,直流偏磁对振动的影响还会进一步加大。

4 结 论

本文在精确测量了取向硅钢片的磁致伸缩特性的基础上,通过商用仿真软件定量化计算了直流偏磁条件下变压器铁心拐角搭迭区域的振动情况,同时通过定制的方圈铁心进行了直流偏磁实验,验证了仿真计算的正确性。通过研究得出如下结论:

(1)铁心硅钢片的磁致伸缩随着磁饱和程度的加剧会产生畸变,表现出很强的非线性,直流偏磁条件下励磁电流畸变严重,铁心振动会加强,振动高次谐波和奇次谐波均有所增加。

(2)直流偏磁条件下,由于搭迭区域叠片铁心存在局部饱和以及漏磁现象,造成电磁力和磁致伸缩力不同程度增加,仿真分析中考虑搭迭缝隙并对其建立三维仿真模型是必要的,否则就会造成很大的误差。

(3)直流偏磁条件下,会在搭迭缝隙处产生大量的漏磁通,从而引起电磁力的增大,虽然磁致伸缩力仍占主导地位,但最大电磁应力和最大磁致伸缩应力只差一个数量级,为了计算准确直流偏磁条件下应该考虑电磁力对铁心振动的影响。

本文对直流偏磁条件下,叠片铁心搭迭区域的电磁振动情况进行了数值分析和实验研究,为变压器振动异常的分析提供了理论和实验基础。

参考文献 (References):

[1] 祝丽花 (Zhu Lihua). 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 (Study of affection from magnetostriction in laminated core on vibration noise of transformer and AC motor) [D]. 天津: 河北工业大学 (Tianjin: Hebei University of Technology), 2013.

[2] 闫荣格, 郜玉香, 贲彤, 等 (Yan Rongge, Gao Yuxiang, Ben Tong, et al.). 直流偏磁下磁饱和和电抗器铁心电磁振动分析 (Analysis on electromagnetic vibration of magnetic saturation reactor iron-core under DC magnetic bias) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 27-33.

[3] 丁登伟, 张星海, 兰新生 (Ding Dengwei, Zhang Xinghai, Lan Xinsheng). HVDC 单极运行对 500 kV 交流变压器的振动影响分析研究 (Effects of HVDC monopole operation on vibration of a 500kV AC transformer) [J]. 振动与冲击 (Journal of Vibration and Shock), 2016, 35 (17): 201-206.

[4] 赵志刚, 刘福贵, 张俊杰, 等 (Zhao Zhigang, Liu Fugui, Zhang Junjie, et al.). 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析 (Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2010, 25 (4): 71-76.

[5] 李晓萍, 文习山, 蓝磊, 等 (Li Xiaoping, Wen Xishan, Lan Lei, et al.). 单相变压器直流偏磁试验与仿真 (Test and simulation for single-phase transformer under DC bias) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of

- the CSEE), 2007, 27 (9): 33-40.
- [6] 田聪, 李琳, 宋雅吾, 等 (Tian Cong, Li Lin, Song Yawu, et al.). 并联电抗器铁心振动的模型实验与仿真研究 (Model experiment and simulation of core vibration for shunt reactor) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (3): 64-70.
- [7] 王佳音, 白保东, 刘宏亮, 等 (Wang Jiayin, Bai Baodong, Liu Hongliang, et al.). 直流偏磁对变压器振动噪声的影响 (Research on vibration and noise of transformers under DC bias) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (8): 56-61.
- [8] 汪金刚, 毛凯, 段旭, 等 (Wang Jingang, Mao Kai, Duan Xu, et al.). 直流偏磁下的变压器振动仿真与试验 (Simulation and test of transformer vibration under DC bias) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2015, 9 (1): 58-67.
- [9] Borrill L D, Chisepo H K, Gaunt C T. Flux measurements with AC and DC components of current present show transformer equivalent circuit models need core joint details [A]. 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON) [C]. Wollongong, Australia, 2016. 1-6.
- [10] Pfutzner H, Shilyashki G, Bengtsson C, et al. Effects of DC bias on regional flux and magnetostriction of a single-phase transformer core modeled by 3-D MACC [J]. IEEE Transactions on magnetics, 2018, 54 (5): 1-6.
- [11] Penin R, Lecointe J P, Parent G, et al. Estimation of relative magnetostriction and Maxwell's forces in stacked grain oriented steel structures [A]. 2012 International Conference on Electrical Machines [C]. Marseille, France, 2012. 1971-1976.
- [12] 张鹏宁, 李琳, 程志光, 等 (Zhang Pengning, Li Lin, Cheng Zhiguang, et al.). 并联电抗器与变压器模型铁心振动仿真与试验对比 (Vibration simulation and experiment comparison of shunt reactor and transformer model core) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (22): 5273-5281.
- [13] Bai Baodong, Xu Bing, Lu Jin. An analysis to force received in transformer core under DC bias conditions [A]. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2011) [C]. Beijing, China, 2011. 1-3.
- [14] 潘超, 王泽忠, 李海龙, 等 (Pan Chao, Wang Zezhong, Li Hailong, et al.). 基于瞬态场路耦合模型的变压器直流偏磁计算 (DC-bias calculation for single phase transformers based on transient field-circuit coupled model) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (5): 174-181.
- [15] IEC/TR 62581, Electrical steel-methods of measurement of the magnetostriction characteristics by means of single sheet and Epstein test specimens [S].

Electromagnetic vibration analysis of transformer core overlap area under dc bias field

LI Wei-zheng, ZHU Li-hua, SHI Yong-heng, WANG Qian-chao

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The magnetostrictive property of the silicon steel sheet is the main cause of transformer vibration. At the same time, the effect of electromagnetic force at the overlap area will also affect the core vibration. In addition, dc bias aggravates the vibration of the transformer core. The vibration in the core overlap area considering the influence of dc bias is studied in this paper. A three-dimensional simulation model of a custom-made square ring core containing gaps was firstly established. The stress and displacement distribution at different moments were obtained, and also the core vibration caused by magnetostrictive force and electromagnetic force was analyzed. Finally, the vibration experimental under dc bias was carried out and the experimental results showed that the simulation results were correct. It is showed that a three-dimensional simulation model including the gap of the overlap area is necessary in order to analyze the vibration of the overlap area and the influence of electromagnetic force on the core vibration should also be considered. The study also shows that the excitation current is distorted and periodic distribution is asymmetric by dc bias, as a result of which the vibration of transformer core overlap area increases.

Key words: dc bias; core vibration; magnetostriction; electromagnetic force; overlap area