直流偏磁时变压器铁芯的力学特性分析

李长云,刘亚魁

(齐鲁工业大学 电气工程与自动化学院,山东 济南 250353)

摘要:直流偏磁导致变压器局部过热,振动和噪声加剧,严重时可能损坏变压器。结合能量守恒原理,推导得 到铁芯磁致伸缩与直流偏磁电流间的关系模型。基于所建立的数学模型,分析了直流偏磁引发的硅钢片的形 变。以单相三柱变压器旁柱上最外层的硅钢片为对象进行了仿真研究,仿真结果证实了所推导模型的正确性, 且表明磁致伸缩引发的铁芯形变是变压器振动加剧的关键因素。

关键词:变压器;变压器铁芯;直流偏磁;力学特性;磁致伸缩;模型;仿真 中图分类号:TM 14;TM 41 文献标识码: A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.12.018

0 引言

大型变压器的直流偏磁现象是指由于高压直流 输电工程单极大地运行方式时的地中直流^[1-2]、太阳 风在地球表面引发的地磁感应电流(GIC)^[3-4]等致使 变压器绕组中出现直流电流。直流偏磁将引起变压 器铁芯出现半周饱和^[5],使得变压器局部过热,铁 芯、绕组振动和噪声加剧^[6],甚至损坏变压器^[7]。当 前文献对变压器直流偏磁现象的研究主要集中于以 下几方面:直流偏磁时变压器励磁电流及振动的测 量^[6,89];直流偏磁时铁芯的磁化特性及变压器的数 学模型^[10-11];变压器承受直流偏磁的能力^[12-13];直流 偏磁的抑制措施^[14-15]等。尚未有文献对直流偏磁时 变压器噪声和振动加剧的原因进行深入分析。

就变压器的振动和噪声而言,其铁芯在磁场中受 到的磁致伸缩力是其振动与噪声产生的根源^[16-17]。 正常工况时,变压器处于正弦交变的电场中,绕组所 受到的电场力可将电磁场理论和弹性力学相结合推 导得出^[18];文献[19]基于铁芯的Jiles-Atherton模型, 结合能量守恒定律研究了变压器铁芯的磁致伸缩特 性。因以上文献均未考虑直流偏磁的影响,其结论 能否直接应用于偏置情况尚需加以推敲。同时,变 压器铁芯振动亦对其油纸绝缘系统中绝缘纸的绝缘 强度有重要影响^[20]。因此,为研究变压器的振动与噪 声的抑制措施、明晰变压器承受的直流偏磁电流的 能力,以指导变压器的设计与运行,需深入探析偏置 电场中变压器铁芯的力学特性。

本文以变压器铁芯的单片硅钢片为研究对象, 基于电磁场理论和能量守恒定律,研究了直流偏磁时 变压器铁芯所受磁致伸缩力,获得了它与直流偏磁电 流的量化模型,并利用仿真分析对所得模型的正确

收稿日期:2015-04-02;修回日期:2015-09-08

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2012EEM002) Project supported by the Shandong Provincial Natural Science Foundation(ZR2012EEM002) 性进行了佐证。

1 磁致伸缩的数学模型

变压器绕组中有偏磁电流时将形成偏置电磁 场,建立铁芯磁场力的数学模型是探析铁芯振动的 基础。由全电流定律知,直流偏磁时的磁场强度为:

$$H = \frac{Ni}{l} = \frac{N(i_{\rm ac} + i_{\rm dc})}{l} = H_{\rm ac} + H_{\rm dc} \tag{1}$$

其中,N为线圈匝数;i为注入电流;l为磁路长度;i_a、 i_a分别为交流电流和直流电流;H_a、H_a分别为交流 磁场强度和直流磁场强度。

磁致伸缩是铁磁材料励磁时,沿磁力线方向材料 的尺寸增加,而垂直于磁力线方向材料的尺寸缩小。 磁致伸缩引发铁芯以2倍的励磁频率作周期性振 动。当长度为L的磁性材料在磁化方向上的长度变 化为 ΔL 时,磁致伸缩率可表示为:

$$\lambda_0 = \frac{\Delta L}{L} \tag{2}$$

其中,λ₀为磁致伸缩率;ΔL为最大形变。由式(2)可 看出,硅钢片磁致伸缩率越大,硅钢片的最大形变就 越大,则铁芯的振动越剧烈。从能量守恒和功能转 换的角度,磁致伸缩率实际是材料的最大应变,结合 弹性力学理论,弹性体发生形变时,单位体积的应变 能为:

$$\boldsymbol{U}(\boldsymbol{\lambda}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}_{1} \boldsymbol{\lambda}$$
(3)
$$\boldsymbol{D}_{1} = \frac{E(1-v)}{(1+v)(1-2v)} \begin{bmatrix} 1 & a & a \\ a & 1 & a \\ a & a & 1 \end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{a} = v/(1-v)$$

其中, $\lambda = [\lambda_x \lambda_y \lambda_z]^T$ 为x, y, z方向的磁致伸缩率组成的矩阵;E为材料的弹性模型;v为材料的泊松比; D_1 为弹性关系矩阵。

当偏置磁场达到峰值时,介质的磁致伸缩率同时 达到峰值,对应的应变能最大。本文在如图1所示硅

第35卷第12期

2015年12月

钢片的坐标系中,规定z方向与其所受的磁致伸缩力 方向一致,故仅考虑z方向的形变,可推得式(4)。

$${}_{V}\boldsymbol{U}(\boldsymbol{\lambda}) \mathrm{d} V = \int_{V} \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{D}_{1} \boldsymbol{\lambda} \mathrm{d} V = \int_{0}^{T/4} \int_{0}^{\Delta l_{z}} F_{\mathrm{cz}} \mathrm{d} l_{z} \mathrm{d} t \quad (4)$$

其中,V为介质的体积;T为正弦磁场周期;因 λ 是 线应变,则 $dl_z = \lambda_z dz_o$



图 1 硅钢片的坐标系 Fig.1 Coordinates of silicon steel 故磁致伸缩可简化为:

$$F_{cz} = F_{czmax} \sin(2\omega t) = \frac{\omega \sin(2\omega t)}{\Delta l_z} \int_{V} \mu(\lambda_z) dV = \frac{\omega \sin(2\omega t)}{\Delta l_z} \int_{V} \frac{1}{2} E \lambda_z^3 dV$$
(5)

基于以上磁致伸缩的模型,便可分析直流偏磁时 铁芯的受力情况。

2 偏置电场中铁磁材料的形变

变压器工作于直流偏磁状态时,其铁芯的磁化特 性呈半周饱和现象。为研究铁芯的最大形变,取磁通 密度最大时的铁芯作为研究对象。

根据麦克斯韦电磁场理论,若 $\omega \bar{\varepsilon} / \gamma \ll 1$ (ω 为时 变磁场的角频率; $\bar{\varepsilon}$ 为介质的介电常数; γ 为介质的电 导率),则导体中时变磁场可按磁准静态场(MQS) 处理。考虑到铁芯多由厚度 0.3~0.35 mm 的硅钢片 叠置而成,z 方向厚度远小于其他 2 个方向的尺寸, 且挠度远小于厚度,根据弹性薄板理论,可将薄板的 弯曲问题简化为二维问题,且全部应力和应变可用 板中面的挠度表示。薄板挠度的微分方程为:

$$D_0\left(\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 v}{\partial y^4}\right) = q(x, y) \tag{6}$$

其中, $D_0 = Et^3 / [12(1-v^2)]$ 为板的弯曲刚度;t为板的 厚度;q(x,y)为作用在板表面z方向的分布载荷。

铁芯的磁致伸缩率随磁通密度的增大而增大, 而偏磁电流产生的直流磁场会显著升高磁通密度。 为研究铁芯的最大形变,取磁通密度最大时的磁致 伸缩率作为研究对象。

$$D_0\left(\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 v}{\partial y^4}\right) = \frac{\omega}{\Delta l_z} \int_V \frac{1}{2} E\lambda_z^3 \mathrm{d}V \quad (7)$$

进而可推导出表征磁致伸缩的磁场力模型为:

$$D_{0}\left(\frac{\partial^{4}v}{\partial x^{4}}+2\frac{\partial^{4}v}{\partial x^{2}\partial y^{2}}+\frac{\partial^{4}v}{\partial y^{4}}\right) = \frac{\omega\sin(2\omega t)}{\Delta l_{z}}\int_{V}\frac{1}{2}E\lambda_{z}^{3}\mathrm{d}V \qquad (8)$$

据式(8)即可求解出不同直流偏磁时磁致伸缩 诱发的铁芯形变。根据硅钢片在变压器中的紧固方 式,可以确定边界条件为两端固支,而另外两端为自 由边。

3 仿真研究

为了验证本文所得出的结论,以单相三柱变压器旁柱上最外层硅钢片为研究对象进行仿真研究, 具体参数如表1所示。硅钢片长度为300mm,宽度为25mm,厚度为0.3mm;材料特性 E=2×10¹¹Pa,v=0.25;励磁条件为标称额定磁通密度1.6T,励磁频率为50Hz。

|--|

Table 1 Parameters of single-phase transformer

技术参数	参数值
型号	D50/.231
电压	$231 \times (1 \pm 8\%)/231$ V
连接组标号	liO
短路阻抗	7.85%
铁圈匝数	高压侧 69,低压侧 64
铁芯硅钢片型号	30QG120
额定磁通密度	1.6 T

对于 30QG120 型硅钢片,建立不同偏磁电流下, 铁磁材料的磁致伸缩率变化如图 2 所示。



图 2 磁致伸缩率与偏磁电流的关系 Fig.2 Relationship between magnetostriction rate and DC-bias current

当直流电流 *I*_a分别取 0 A、0.5 A、1 A、1.5 A、2 A、 2.5 A 和 3 A 时,对硅钢片进行仿真。所得结果如图 3、4 所示,最大形变示于表 2 中。

由图 3、4 及表 2 知,无偏磁电流时,本文计算所 得磁致伸缩引发的形变为 3.9×10⁻⁶ m,与文献[21] 所实测结果 4.5×10⁻⁶ m 非常接近。同时,偏磁电流由 0 增加为 1 A 时,其形变增大 7.4 倍,即直流偏磁能 显著影响硅钢片的振动。且偏磁电流越大,磁致伸 缩现象越严重,铁芯振动越剧烈。





图 4 I_{de}为 1.5、2、2.5、3 A 时,硅钢片的最大形变量 Fig.4 Maximum silicon steel deformation for I_{de} is 1.5 A, 2 A, 2.5 A and 3 A

表 2 不同偏磁电流时,磁致伸缩引发的 硅钢片最大形变

Table 2 Maximum silicon steel deformation caused by magnetostriction for different DC-bias currents

偏磁电流/A	最大形变/m
0	3.9×10^{-6}
1.0	2.9×10^{-5}
1.5	6.1×10^{-5}
2.5	1.9×10^{-4}
3.0	3.1×10^{-4}

4 结论

本文基于能量守恒原理,推导了直流偏磁时磁 致伸缩的量化表达式。理论分析表明,直流偏磁电 流加剧了变压器铁芯的振动,且偏磁电流越大,其所 引发的振动越明显。

参考文献:

 [1] 舒印彪,张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工 程学报,2007,27(31):3-8.

SHU Yinbiao,ZHANG Wenliang. Research of key technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(31): 3-8.

- [2] 王明新,张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析
 [J]. 电网技术,2005,29(3):9-14.
 WANG Mingxin,ZHANG Qiang. Analysis on influence of ground electrode current in HVDC on AC power network[J]. Power System Technology,2005,29(3):9-14.
- [3] IEEE Working Group on Geomagnetic Disturbances and Power System Effects. Geomagnetic disturbance effects on power systems [R]. [Sl.]:Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [4] PRICE P R. Geomagnetically induced current effect on transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(4):1002-1008.
- [5]尚春. HVDC地中电流对交流变压器影响的抑制措施[J]. 高电 压技术,2004,30(11):52-54. SHANG Chun. Measure to decrease the neutral current of the ac transformer in HVDC ground-return system[J]. High Voltage Engineering,2004,30(11):52-54.
- [6] 陈青恒,马宏彬,何金良. 直流偏磁引起的 500 kV 电力变压器振动和噪声的现场测量与分析[J]. 高压电器,2009,45(3):93-96. CHEN Qingheng, MA Hongbin, HE Jinliang. Field monitoring and analysis on vibration and noise of 500 kV electrical transformer under DC current biasing[J]. High Voltage Apparatus,2009,45 (3):93-96.

[7] ALBERTSON V D,THORSON J M,CLAYTON R E,et al. Solar induced currents in power systems:cause and effects[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1973,PAS-92(2): 471-477.

[8] 李晓萍,文习山,蓝磊,等. 单相变压器直流偏磁试验与仿真[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):33-40.
LI Xiaoping,WEN Xishan,LAN Lei,et al. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(9):33-40.

- [9] 李春来,汤晓宇,黄业安,等. 计量用 TA 在直流偏磁条件下传变 特性的实验与分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):143-145,149.
 LI Chunlai, TANG Xiaoyu, HUANG Yean, et al. Measurement and analysis of transfer characteristic for metering CT with DC magnetic bias[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31 (7):143-145,149.
- [10] 潘超,王梦纯,蔡国伟,等. 变压器直流偏磁场路耦合计算中的 磁化曲线拟合[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):49-53,58.
 PAN Chao,WANG Mengchun,CAI Guowei,et al. Magnetization curve fitting in field-circuit coupling computation for DC-biased transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34 (4):49-53,58.
- [11] 董霞,刘志珍. 三相变压器直流偏磁仿真分析[J]. 电力自动化 设备,2013,33(7):121-125.
 DONG Xia,LIU Zhizhen. Simulative analysis of three-phase transformer with DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):121-125.
- [12] PICHER P,BOLDUC L,DUTIL A,et al. Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1):257-265.
- [13] 李长云,李庆民,李贞,等. 电能质量约束下变压器承受直流偏磁能力的分析[J]. 高电压技术,2010,36(12):3112-3118.
 LI Changyun,LI Qingmin,LI Zhen, et al. Analysis on the withstanding ability of power transformers to DC bias under power quality constraints[J]. High Voltage Engineering,2010, 36(12):3112-3118.
- [14] 李长云,李庆民,李贞,等. 基于双重拓扑的变压器直流偏磁抑 制措施[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):71-75.
 LI Changyun,LI Qingmin,LI Zhen,et al. Measures of transformer DC bias suppression based on dual protection topology [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):71-75.
 [15] 张露,阮羚,潘卓洪,等. 变压器直流偏磁抑制设备的应用分析
- [15] 示露, 阮疗, 福早供, 寻. 变压器直流偏磁抑制设备的应用分析 [J]. 电力自动化设备,2013,33(9):151-156. ZHANG Lu, RUAN Ling, PAN Zhuohong, et al. Evaluation of DC bias restraint equipment application [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(9):151-156.
- [16] WEISER B, HASENZAGL A, BOOTH T, et al. Mechanisms of noise generation of model transformer cores[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 160:207-209.
- [17] WEISER B,PFÜTZNER H,ANGER J. Relevance of magnetostriction and forces for the generation of audible noise of transformer cores[J]. IEEE Trans on Magnetics,2000,36(5):3759-3777.
- [18] 王志敏,顾文业,顾晓安,等. 大型电力变压器铁心电磁振动数
 学模型[J]. 变压器,2004,41(6):1-6.
 WANG Zhimin,GU Wenye,GU Xiaoan,et al. Mathematical model for electromagnetic vibration in large power transformer cores[J]. Transformer,2004,41(6):1-6.

- [19] LI Q,WANG X,ZHANG L,et al. Modeling methodology for transformer core vibrations based on the magneto-strictive properties[J]. IET Electr Power Appl,2012,6(9):604-610.
- [20] 董其国. 电力变压器故障与诊断[M]. 北京:中国电力出版社, 2001:36-85.
- [21] 顾晓安. 电磁场诱发铁磁材料电磁振动机理研究及其应用[D]. 上海:上海交通大学,2003.

GU Xiaoan. Study on mechanism of the mechanical behavior of ferromagnetic materials under sinusoidal magnetization and its applications[D]. Shanghai;Shanghai Jiao Tong University,2003.

作者简介:



李长云(1974—),男,山东阳谷人,副教授,博士,主要从事高压直流输电、智能微电 网技术的教学与科研工作(E-mail:sdlcyee@ qlu.edu.cn);

刘亚魁(1990—),男,山东梁山人,硕士 研究生,主要从事直流偏磁现象、智能配电网 技术的研究工作(E-mail:lykppqq@163.com)。

Analysis of mechanical characteristics of transformer iron core with DC bias LI Changyun,LIU Yakui

(School of Electrical Engineering and Automation, Qilu University of Technology, Ji'nan 250353, China)

Abstract: DC bias may cause the partial overheat of transformer, exacerbate its vibration and noise and even damage it. According to the energy conservation law, a model of relationship between magnetostriction and DC-bias current is deduced, based on which, the deformation of silicon steel sheet caused by DC bias is analyzed. Simulative study is carried out for the outmost silicon steel of a single-phase three-column transformer and the simulative results prove the correctness of the deduced model and show the iron-core deformation caused by magnetostriction is the key factor exacerbating the transformation.

Key words: electric transformers; transformer iron core; DC bias; mechanical characteristics; magnetostriction; models; computer simulation

(上接第 121 页 continued from page 121)

[22] 刘文颖,王佳明,谢昶,等. 基于脆性风险熵的复杂电网连锁故 障脆性源辨识模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(31):142-149,S19.

LIU Wenying, WANG Jiaming, XIE Chang, et al. Brittleness source identification model for cascading failure of complex power grid based on brittle risk entropy [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31):142-149, S19.

- [23] 曹一家,王光增,曹丽华. 基于潮流熵的复杂电网自组织临界态 判断模型[J]. 电力系统自动化,2011,35(7):1-6.
 CAO Yijia,WANG Guangzeng,CAO Lihua. An identification model for self-organized criticality of power grids based on power flow entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011,35(7):1-6.
- [24] 韦琦. 复杂系统脆性理论及其在危机分析中的应用[D]. 哈尔

滨:哈尔滨工程大学,2004.

WEI Qi. Brittleness theory of complex system and its application to crisis analysis[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2004.

作者简介_:



吕歆瑶(1991—),女,四川遂宁人,硕士 研究生,研究方向为电压稳定及优化(E-mail: lvxinyao2@163.com);

李华强(1965—),男,四川成都人,教授,博士,长期从事电压稳定及优化问题电 网稳定与控制研究。

Cascading failure forecast and impact identification based on comprehensive brittleness relevance

LÜ Xinyao, LI Huaqiang, ZHENG Guo, ZHOU Xiaoyu

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A method of cascading failure forecast is proposed, which systematically considers the conditional brittleness relevance and structural brittleness relevance of different branches in the cascading failure and establishes the cascading failure forecast index based on the electrical structure to reflect the comprehensive brittleness relevance of each branch. The entropy theory is introduced in the comprehensive forecast index to construct the brittleness relevance entropy for determining the impact of faulty line on system, identifying the initial fault easily causing disaster and detecting the cascading failure sequence seriously impacting on system. The simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: electrical structure; structural brittleness relevance; conditional brittleness relevance; brittleness