

# 温度及直流偏磁对换流变压器铁心磁性能及 磁场问题影响的研究

党艳阳<sup>1</sup>, 陈德志<sup>2</sup>, 白保东<sup>2</sup>, 张欣宜<sup>3</sup>

- (1. 特变电工沈阳变压器集团有限公司, 辽宁 沈阳 110144;  
2. 沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870;  
3. 西安供电公司长安分局, 陕西 西安 710000)

**摘要:**测量了 30ZH120 电工钢片在不同直流偏磁及温度条件下磁特性,经过迭代计算得到了考虑偏置磁通后的  $B-H$  曲线。基于一台产品级 750kV 换流变压器(哈密-郑州特高压直流输变电工程),仿真计算了不同直流偏磁及温度条件下换流变压器磁场分布和空载电流,结果表明:直流偏磁和工作温度影响电工钢片和换流变压器铁心线性区和非线性区,随着温度及直流偏磁的增加,换流变压器铁心磁通密度和空载电流增加,因此,在设计中应该考虑温度及直流偏磁的影响。

**关键词:**直流偏磁; 温度; 换流变压器; 磁场分布; 励磁电流

**DOI:** 10. 12067/ATEEE1904014      **文章编号:** 1003-3076(2020)04-0034-09      **中图分类号:** TM351

## 1 引言

随着直流输电技术的发展,超高压直流输电系统已在中国得到了广泛的应用,因此应积极开展对直流输电装备的研究工作<sup>[1]</sup>。换流变压器作为高压直流输电的关键设备,容易受到直流的影响。换流变压器产生直流偏磁的主要原因有以下四个方面:①触发角不平衡;②工频电流流过直流线路;③换流站交流母线出现正序二次谐波电压;④单极大地返回运行方式<sup>[2]</sup>。经过换流变压器的直流电流将导致铁心磁化曲线的不对称、励磁电流增大、损耗增加、振动噪声增大及电压、电流严重畸变<sup>[3-5]</sup>。

进一步分析,换流变压器运行中温度升高将改变铁磁材料的电磁特性,继而影响换流变压器损耗及温度的分布。因此在对换流变压器设计及分析过程中,电工材料属性的精确性关系到计算结果的准确性。针对换流变压器直流偏磁问题及温度对电工钢片磁特性的影响,国内外已开展了大量的研究工作。文献[6]根据电力变压器铁心和绕组的空间几何结构,提出一种可有效反映变压器内部磁链耦合

关系的直流偏磁电路-磁路模型。文献[7]利用 EMD 和 Hilbert 变换相结合的方法对直流偏磁故障进行了分析,该方法可准确测量直流偏磁的大小及励磁电流畸变时间,以图形的方式直观反映出畸变信号的频率幅值变化。文献[8]通过对换流变压器直流偏磁的试验研究得出直流偏磁对变压器的主要影响是绕组电阻损耗与铁心损耗增加造成的过热导致绕组发热增加的结论。文献[9-11]研究了组成铁心的对温度敏感的磁性材料的磁通密度,矫顽力和磁导率等随温度变化的关系,说明铁心材料具有的温度依赖特性。文献[12]采用爱泼斯坦方圈组合法对硅钢片在不同温度下的磁性能数据进行测量和加权处理,得出环境温度的变化会对硅钢片的磁特性带来较大影响的结论。

上述文献对换流变压器磁场问题的研究具有重要的参考价值,但以往的研究都是考虑温度或直流偏磁单一因素对电工钢片磁特性的影响,在换流变压器实际工作中,会有温度波动对铁心材料磁特性的影响,也存在明显的直流偏磁现象。

因此本文针对一台 750kV 换流变压器,首先利

**收稿日期:** 2019-04-02

**作者简介:** 党艳阳 (1976-), 男, 陕西籍, 工程师, 研究方向为大型输变电装备电磁装置分析与研制;  
陈德志 (1982-), 男, 吉林籍, 副教授, 博士, 研究方向为电磁装置分析与设计、特种电机及其控制。

用硅钢片磁特性温度效应测量仪测量得到铁心材料在不同温度及直流偏磁条件下的磁滞回环簇,然后通过编制程序计算得到考虑了偏置磁通的  $B$ - $H$  曲线,最后使用磁场仿真软件 Magnet 建立此换流变压器仿真模型,并将计算得到的  $B$ - $H$  曲线带入材料磁特性,仿真并分析了考虑温度及直流偏磁对硅钢片磁特性影响的 750kV 换流变压器励磁电流波形及磁场分布特性。

2 不同温度下硅钢片直流偏磁特性研究

2.1 考虑偏置磁通量后的  $B$ - $H$  曲线

电工硅钢片磁特性测试设备如图 1 所示。实验中通过温度控制系统调节变压器铁心温度,通过调节直流电源和交流电源的输出使得铁心材料工作于不同的偏置磁场和交流工作点,通过数据采集系统获得模型测量线圈中感应电压的实时数据以及同一时刻励磁绕组中励磁电流的数据,经过数据处理系统得到铁心中交链的磁通密度  $B$  和施加于铁心的磁场强度  $H$ 。



图 1 电工硅钢片磁特性测试设备  
Fig.1 Test equipment for magnetic characteristic of electrical silicon steel

实验中没有办法直接测得直流磁通。实际上,偏磁时由于交直流共同作用,交流磁通密度需加上一个  $\Delta B$ ,为了得到符合实际情况的  $B$ ,关键是要求得  $\Delta B$ <sup>[13]</sup>。图 2 所示为获得交直流作用下磁化曲线的程序流程图。如图 2 所示:首先在某一给定偏置电流  $I_{dc}$  时测得某材料的励磁电流,注意该电流的两个标志参数,即正半轴最大幅值和直流分量;其次应用迭代原理,对某一个工作电压,调节  $\Delta B$ ,得到励磁电流波形,通过多次调节  $\Delta B$ ,使得到的励磁电流波形的正半轴最大幅值和直流分量与测得的励磁电流波形的这两个参数一致,此时,该  $\Delta B$  就是直流偏置电流为  $I_{dc}$  时该工作点所对应的偏置磁通密度;对

直流偏置电流为  $I_{dc}$  时所有的工作点做类似处理就可得到一组  $\Delta B$ 。每个  $\Delta B$  与相应的交流偏磁磁化曲线的  $B$  相加,得到的新  $B$  值与原来的  $H$  相关曲线就是实际偏磁时的交直流共同作用时的磁化曲线。

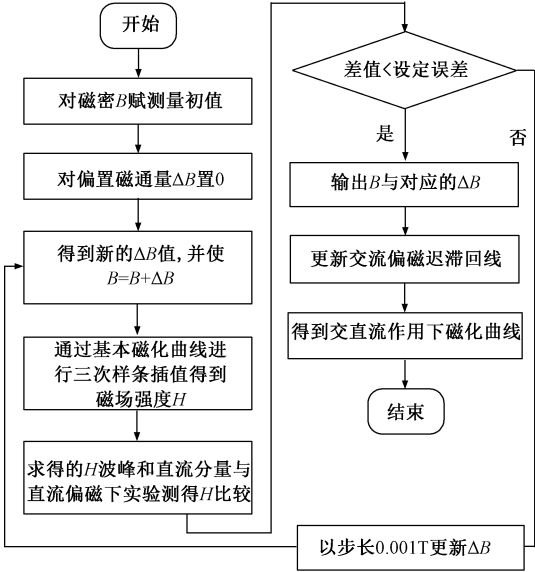


图 2 程序流程图  
Fig.2 Schematic diagram of procedure

2.2 实验测试

实验采用单片测量原理来测量硅钢片在不同温度及直流偏磁条件下的磁特性,样片被放置在线圈骨架的中央,并与轭铁构成闭合磁路,轭铁由电工钢片叠积而成。为了使施加在样件上的磁场均匀分布,样件与轭铁之间应有足够的接触面积。 $B$  绕组和激励绕组分内外两层均匀缠绕在线圈骨架上。 $H$  线圈均匀缠绕在由非导磁绝缘材料制成的板形支架上,并应尽可能地与样件靠近。图 3 所示为单片测量装置剖面图。

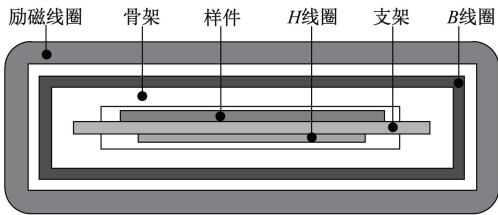


图 3 单片测量装置剖面图  
Fig.3 Section view of single sheet tester

为准确研究温度及直流偏磁对铁心材料硅钢片磁特性影响,需对大小 130mm×160mm 型号为 30ZH120 的单片取向硅钢片,在 40~140℃ 的温度变化范围内,在不同温度下沿轧制方向测量得到多组

磁滞回线簇,实验中控制交流磁通密度按正弦规律周期变化,设定直流电流分别为 0、0.7A、1A、1.5A 和 2A,测量得到的磁滞回线簇利用 2.1 节编制程序计算可得到不同温度及直流偏置磁场作用时铁心材

料考虑偏置磁通后的  $B-H$  曲线。不同温度及直流偏磁条件下计算得到的铁心材料  $B-H$  曲线、损耗曲线、磁导率曲线分别如图 4、图 5、图 6 所示。

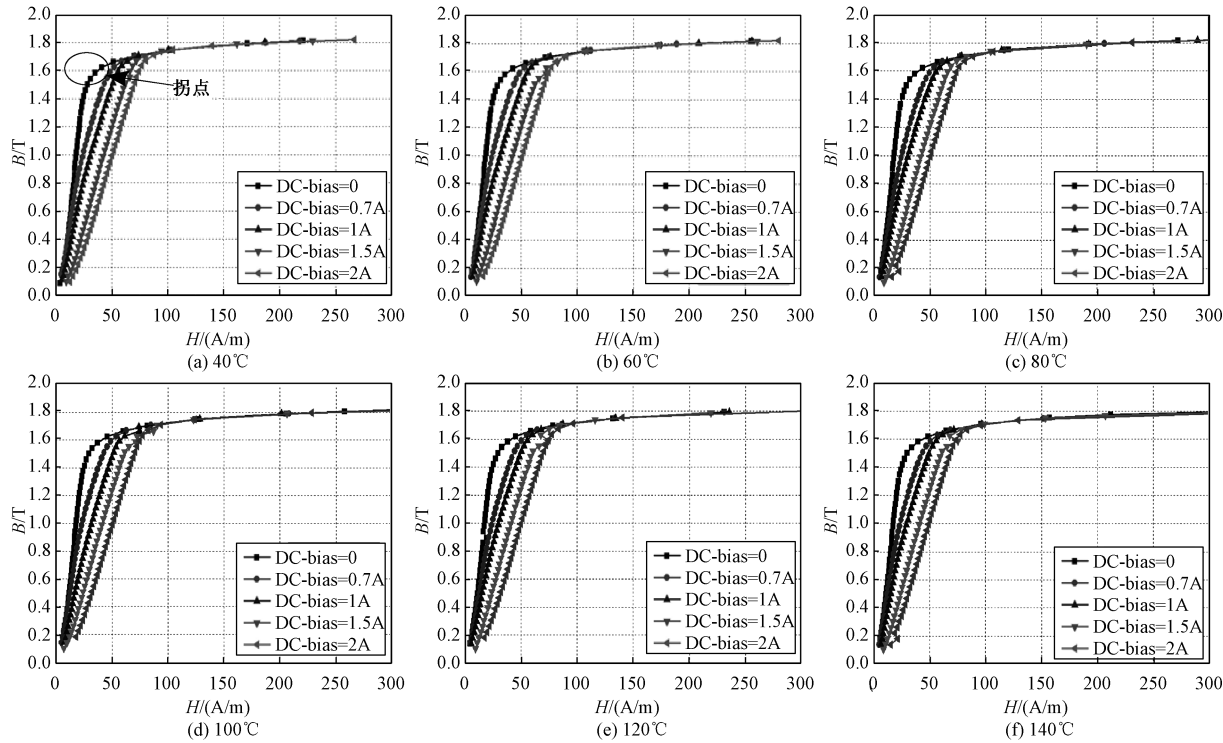


图 4 不同温度及直流偏置磁场作用下铁心  $B-H$  曲线

Fig.4  $B-H$  curves of sheet steel under different temperature and DC magnetic bias

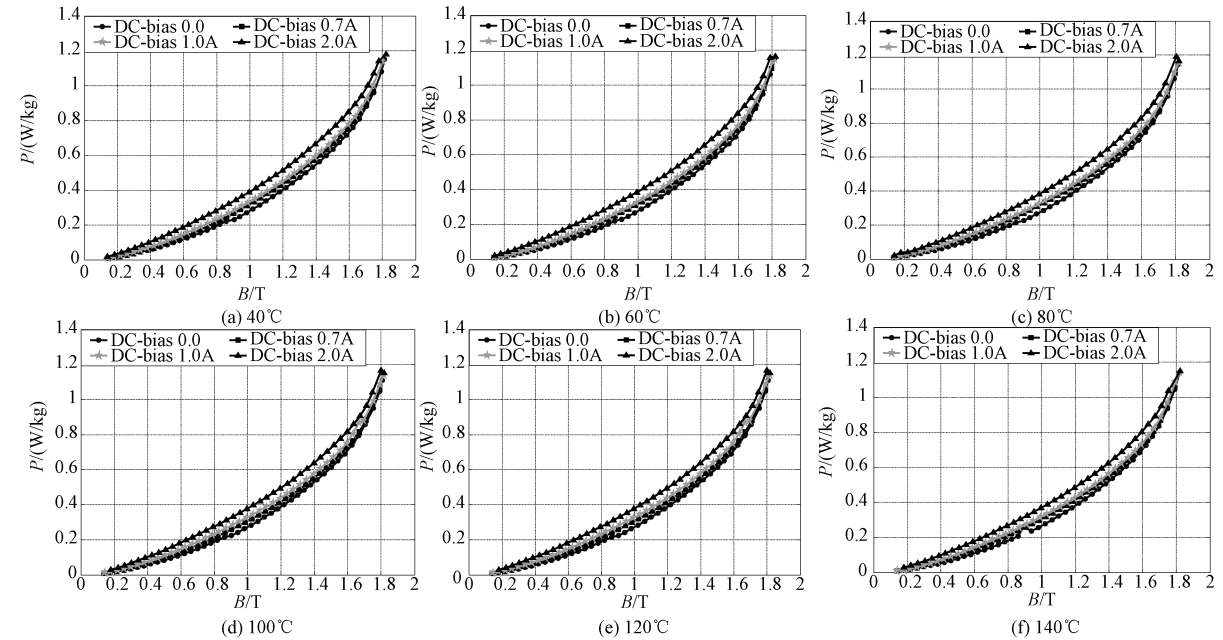


图 5 不同温度及直流偏置磁场作用下损耗曲线

Fig.5 Loss curves of sheet steel under different temperature and DC bias

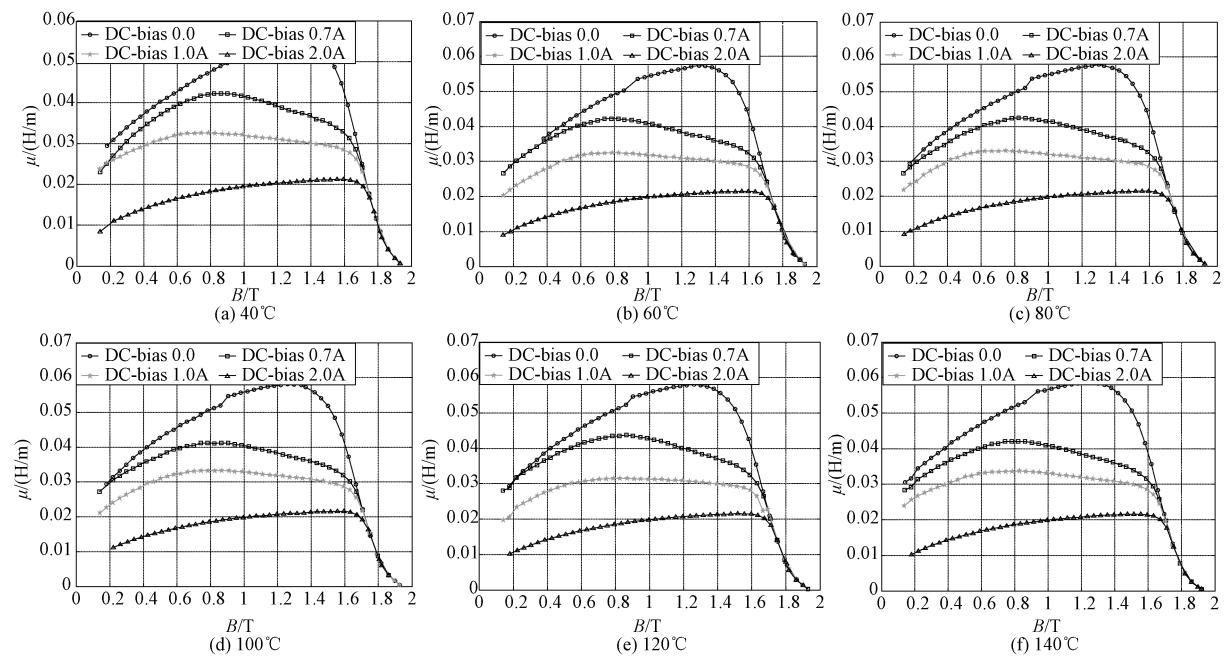


图 6 不同温度及直流偏置磁场作用下磁导率曲线

Fig.6 Magnetic permeivity curves of sheet steel under different temperature and DC bias

从图 4 中可以看出,在一定温度条件下,直流偏磁对电工钢片磁特性影响较大,尤其在非饱和区,在直流偏磁作用下,铁心材料  $B-H$  曲线饱和点将右移(图 4(a)所示的拐点)。纵向对比,一定直流偏磁条件下,在非饱和区温度对磁特性基本没有影响,在饱和区特别是在  $B-H$  曲线拐点附近,温度对磁特性有较明显影响,随着温度的升高, $B-H$  曲线将向下移动。可见,在换流变压器磁场仿真中,为了得到更准确的计算结果,需要考虑温度及直流偏磁对铁心材料磁特性的影响。

从图 5 中可以看出,温度不同,电工钢片损耗不同,并且随着直流偏磁的增加损耗增大。

从图 6 中可以看出,温度不同,电工钢片的磁导率不同,并且随着直流偏磁的增加磁导率降低。

3 换流变压器磁场及励磁电流研究

3.1 换流变压器模型

本文采用的换流变压器绕组结构从铁心向外依次为阀侧线圈、网侧线圈和调压线圈,单相结构示意图如图 7 所示。网侧线圈及阀侧线圈均采用并联结构,铁心形式为单相四柱式。各个线圈详细数据见表 1。

该变压器型号为 ZZDFPZ-412300/750-200,额定容量 412.3MV·A,夹件、油箱、拉板均采用 A3 钢。在保证计算精度的前提下为减少计算量,在计算时

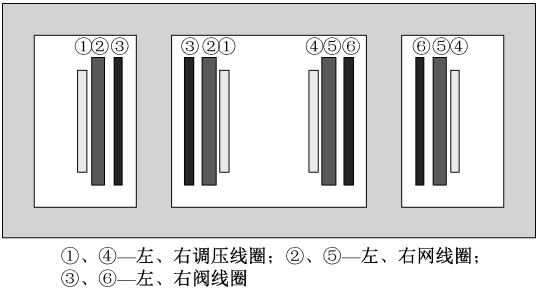


图 7 换流变压器单相结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of single-phase converter transformer structure

表 1 单相线圈数据表

Tab.1 Parameters of single phasecoil		
线圈	匝数	电抗/ $\Omega$
网侧	1067	2310
阀侧	386	2310
调压	116	1070

对 A3 钢材料部件(油箱、拉板等)均施加表面阻抗边界条件。

值得注意的是,不同直流偏磁条件下的磁场分析过程实际上是一个迭代的过程,即每一次进行磁场计算时需要根据当前直流偏置电流更新材料的相关属性,直到当前励磁电流中的直流电流与前一次迭代计算的直流电流之间的误差小于设定值。相应仿真流程图如图 8 所示。图 8 中,仿真第二步中的



“材料属性”即为本文测量得到的硅钢片在不同温度下的  $B$ - $H$  曲线、损耗曲线及磁导率曲线,如图 4~图 6 所示。

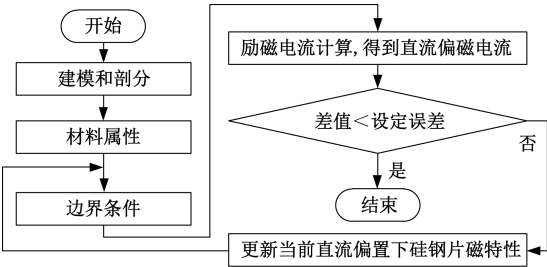


图 8 仿真迭代流程图  
Fig.8 Simulation flow chart of iteration

3.2 不同温度及直流偏磁下换流变压器磁场分析

下面对换流变压器工况进行仿真计算。采用 Infolytica 公司的 MagNet 磁场仿真软件进行三维场路耦合瞬态有限元分析。仿真计算时,一次电压和二次直流电流通过场路耦合的外电路分别加到一次、二次绕组的场计算单元,一次侧输入 750kV 的额定电压;二次侧相当于直流绕组,直流电流的大小即为偏置电流。不同直流偏磁及温度条件下换流变压器磁场分布云图如图 9、图 10 所示:

从图 9 中可以看出,在无直流偏磁条件下换流变压器铁心柱磁通密度最大值为 1.7439T,而铁心磁通密度试验最大值为 1.7629T,误差为 1.08%,并且在励磁电流波峰波谷处磁通密度分布完全对称。当直流偏磁电流为 2A 时,励磁电流在波峰时铁心柱磁通密度为 1.86116T,励磁电流在波谷时铁心柱磁通密度为 1.61522T,在直流偏置电流作用下,铁心柱磁通密度分布不再对称。

由图 10 可以看出,在工作温度 40℃ 条件下铁心柱最大磁通密度为 1.7439T,铁心磁通密度试验最大值为 1.7629T。当工作温度升高到 120℃ 时,铁心柱最大磁通密度为 1.7411T,与实验值相比误差为 1.24%。其他温度及直流偏磁电流条件下,铁心柱磁通密度分布存在相同规律。

综上可知:①一定温度下,随着直流偏磁电流的增加,铁心中正负半周磁通密度分布不再对称,由于直流电流的流入,换流变压器铁心将出现周期性饱和,且直流电流越大,铁心饱和程度越严重。随着直流偏置电流的进一步增大,最终将导致铁心的过度饱和,影响换流变压器的正常运行<sup>[14,15]</sup>。②一定直流偏磁条件下,随着温度的升高,换流变压器的磁通密度下降,铁心磁导率增加,因此,同样激励下换流

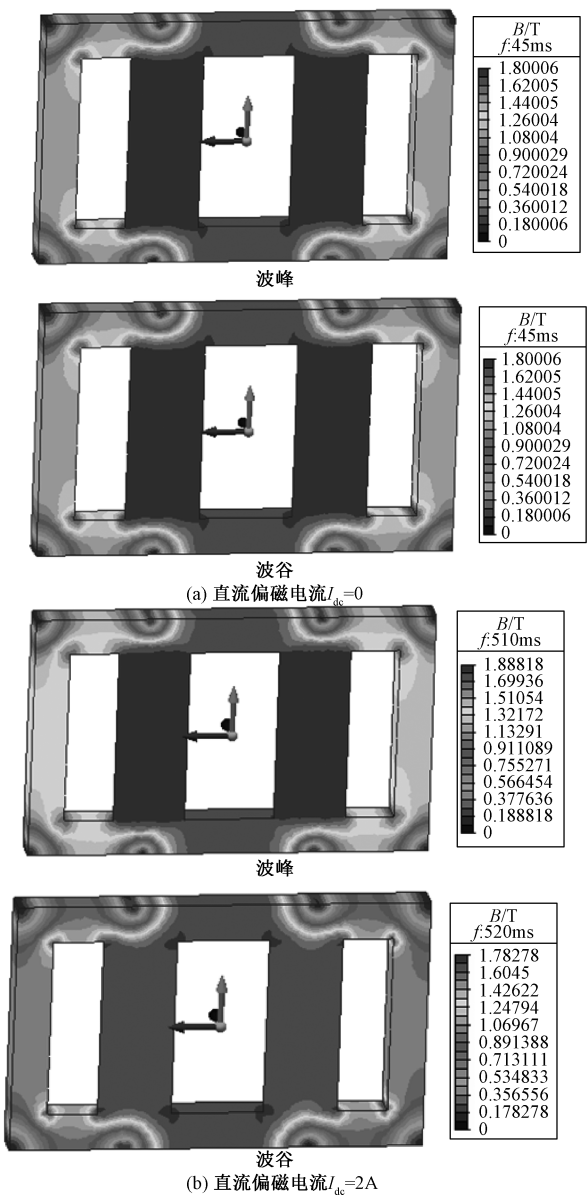


图 9 不同直流偏磁条件下换流变压器磁通密度分布云图,温度为 40℃  
Fig.9 Magnetic flux distribution of converter transformer under different DC bias conditions, at 40℃

变压器铁心柱磁通密度下降,另一方面,虽然最终铁心饱和磁通密度值相等,但随着温度的升高,铁心饱和所需要的激励将随之增加。

3.3 不同温度及直流偏磁下换流变压器励磁电流分析

当换流变压器中存在直流偏磁时,励磁电流的波形发生严重畸变,正半周峰值较无偏磁时大得多。当换流变压器温度升高时,励磁电流正负半周峰值均比低温时大。图 11 所示为不同温度及直流偏磁条件下换流变压器励磁电流波形。

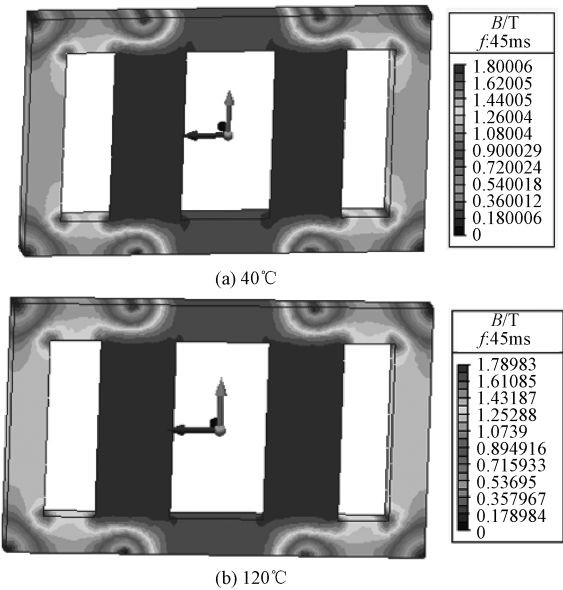


图 10 不同温度条件下换流变压器磁通密度  $B$  分布云图,  $I_{dc}=0$

Fig.10 Magnetic flux distribution of converter transformer under different temperature,  $I_{dc}=0$

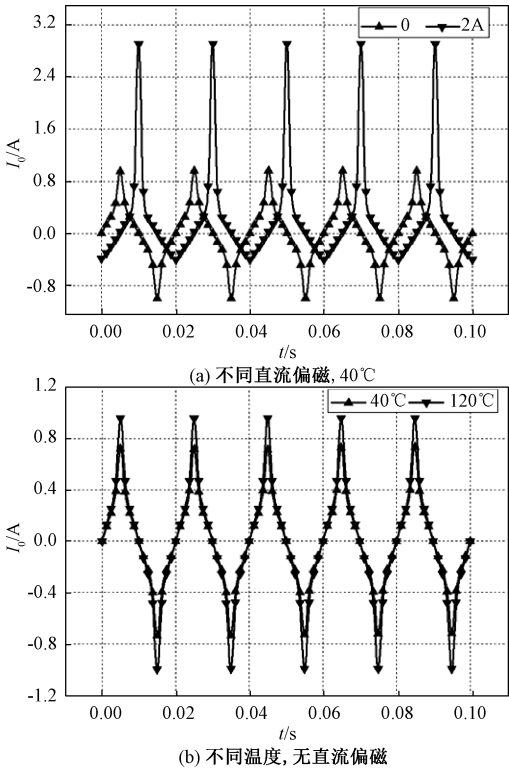


图 11 不同直流偏磁及温度下换流变压器励磁电流  
Fig.11 Excitation current waveforms of converter transformer under different DC bias and temperature

从图 11 中可以看出,换流变压器在直流偏磁工况下一次侧绕组电流正半波的畸变加强,而负半波

电流波形的畸变减弱。而且与正常工作相比,在直流偏磁下,一次侧绕组电流的尖峰值远远大于非直流偏磁的尖峰值。这主要是因为,在直流偏磁下,绕组中流通的直流电流使换流变压器铁心在正半波时工作在磁化曲线的饱和区,导致励磁电流出现正半波尖顶,并且直流电流越大,励磁电流波形畸变越严重,换流变压器工作点越趋近于磁化曲线的饱和区。由此可知,直流偏磁下励磁电流的畸变是由于变压器的铁心进入饱和区,磁化曲线进入非线性区域所引起的<sup>[16,17]</sup>。显然直流偏磁下励磁电流的大小不仅与变压器设计的铁心工作点有关,还与直流分量的大小密切相关<sup>[18-25]</sup>。

由前面测得的不同温度下的  $B-H$  曲线可知,在无直流偏磁条件下,随着温度的升高,硅钢片变得难以被磁化,具体表现在若想达到同样的磁通密度  $B$ ,在高温(120℃)时所需要的磁场强度将增加。这也就导致了高温(120℃)时换流变压器的励磁电流大于常温(40℃)时的电流值。

图 12 所示为不同直流偏磁及温度下换流变压器励磁电流谐波分布情况。

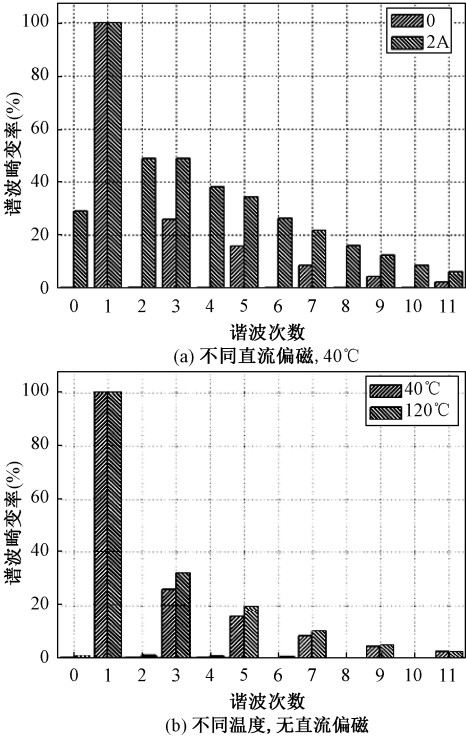


图 12 不同直流偏磁及温度下励磁电流谐波分布情况

Fig.12 Excitation current harmonic distribution under different DC bias and temperatures

从图 12 中可以看出,随着直流偏磁的出现,谐

波分量越来越大,尤其是出现了偶次谐波,谐波畸变率从 31.89%增大到 95.5%,此时偶次谐波幅度(主要是 2 次谐波)随直流偏磁的出现快速增长。随着温度的升高,励磁电流谐波分量也有所增加,虽然偶次谐波相对增幅较大,但其绝对值所占比例较小,因此不予考虑,奇次谐波含量最大增幅达到 23.6%,值得注意的是 10 次和 11 次谐波有所减小,高温时(120℃)谐波畸变率增加到 38.87%,可见,直流偏磁及温度均对换流变压器励磁电流谐波分布造成较大影响。

4 换流变压器电流与损耗计算结果试验对比分析

为验证不同温度及直流偏磁作用下的换流变压器有限元分析的正确性,对换流变压器进行了试验分析。由于采用的换流变压器为产品级模型,产品级换流变压器在出厂前不做直流偏磁条件下的测试,因此,在无直流偏磁下对换流变压器展开了空载特性试验。表 2 所示为采用 40℃ 下电工钢片特性的有限元仿真与试验结果对比。从数据可以看出,总体误差小于 10%,满足工程要求,验证了本文提出方案的正确性。

表 2 有限元仿真与试验结果对比

Tab.2 Test results comparison of finite dement simulation

	励磁电流/A	磁通密度/T	铁心损耗/kW
有限元分析	0.721	1.7439	155.6
试验值	0.705	1.7629	166
误差/(%)	2.22	1.08	6.68

5 结论

本文测量得到了电工钢片 30ZH120 在不同温度及直流偏磁条件下的磁特性,并经过迭代计算得到其考虑偏置磁通后的  $B-H$  曲线,然后基于一台哈密-郑州特高压直流输电用单相 750kV 换流变压器,利用测量得到的  $B-H$  曲线,仿真并分析了直流偏磁及温度对其磁场和励磁电流的影响,并与实验进行了对比,得出以下结论:

- (1)直流偏磁对电工钢片  $B-H$  曲线的影响主要
- 在非饱和区,随着偏置电流的增加,曲线右移,而温度对电工钢片  $B-H$  曲线的影响在饱和区较为明显,随着温度的升高,曲线下移。
- (2)在 2A 直流偏置电流工况下,换流变压器铁
- 心最大磁通密度与正常工作下相比增大了 6.71%,

励磁电流谐波畸变率由 31.89%增大到 95.5%,峰值增大了近 2 倍。

- (3)换流变压器在 120℃ 工况与 40℃ 工况相比,铁心最大磁通密度增加 0.16%,励磁电流谐波畸变率增大至 38.87%,峰值增大了 26.7%,直流偏磁和温度对换流变压器磁场及励磁电流影响较大。
- (4)随着直流偏磁的出现,励磁电流谐波畸变加重,主要表现在出现严重的偶次谐波,并且奇次谐波含量也有所增加,随着温度的升高,励磁电流谐波分量也有所增加,主要表现在奇次谐波含量增加,但 10 次和 11 次谐波含量降低。

参考文献 (References):

[ 1 ] 谢庆峰 (Xie Qingfeng). 基于场路耦合的换流变压器直流偏磁时激励电流及损耗的仿真分析 (Simulation of magnetizing current and loss of the DC bias of converter transformer based on coupled electromagnetic circuit method) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2016, 52 (4): 200-204.

[ 2 ] 马为民 (Ma Weimin). 换流变压器中直流偏磁电流的计算 (DC biasing current in converter transformer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2004, 30 (11): 48-49.

[ 3 ] Albertson V D, Bozoki B, Feero W E, et al. Geomagnetic disturbance effects on power systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3): 1206-1216.

[ 4 ] Picher P, Bolduc L, Dutil A, et al. Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12 (1): 257-265.

[ 5 ] Emanuel A E, Pileggi D J, Levitsky F J. Direct current generation in single-phase residential systems DC effects and permissible levels [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103 (8): 2051-2057.

[ 6 ] 李泓志, 崔翔, 卢铁兵, 等 (Li Hongzhi, Cui Xiang, Lu Tiebing, et al.). 变压器直流偏磁的电路-磁路模型 (Electric circuit and magnetic circuit combined model of DC biased power transformer) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2009, 29 (27): 119-125.

[ 7 ] 党克, 张晓宇, 张峰, 等 (Dang Ke, Zhang Xiaoyu, Zhang Feng, et al.). 变压器直流偏磁的仿真研究 (Simulative study on power transformer with DC magnetic biasing) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2009, 33 (20): 189-192.

[ 8 ] 李靖宇 (Li Jingyu). 换流变压器直流偏磁的试验研究



- (Research on DC bias of converter transformer) [J]. 变压器 (Transformer), 2005, 42 (9): 25-28.
- [9] Krings A, Mousavi S A, Wallmark O, et al. Temperature influence of NiFe steel laminations on the characteristics of small slotless permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49 (7): 4064-4067.
- [10] Yamasawa K, Murakami K. Thermomagnetic characteristics of cores composed of temperature-sensitive magnetic materials [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1976, 12 (6): 801-803.
- [11] Pasnak M, Lundsten R. Effects of ultrahigh temperature on magnetic properties of core materials [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, 1960, 78 (6): 1033-1039.
- [12] 孔庆奕, 程志光, 李悦宁 (Kong Qingyi, Cheng Zhiguang, Li Yuening). 取向硅钢片在不同环境温度下的磁特性 (Magnetic properties of oriented silicon steel sheet under different ambient temperatures) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (9): 2743-2749.
- [13] 郭满生, 梅桂华, 刘东升, 等 (Guo Mansheng, Mei Guihua, Liu Dongsheng, et al.). 直流偏磁条件下电力变压器铁心 B-H 曲线及非对称励磁电流 (B-H curve based on core and asymmetric magnetizing current in DC biased transformers) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2009, 24 (5): 46-51, 59.
- [14] 赵志刚, 程志光, 刘福贵, 等 (Zhao Zhigang, Cheng Zhiguang, Liu Fugui, et al.). 基于漏磁通补偿的导磁钢板直流偏磁杂散损耗特性模拟 (Modeling of the DC-biased stray-field loss of magnetic steel plate based on compensator of leakage flux) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (8): 38-44.
- [15] 赵志刚, 刘福贵, 张晓晨, 等 (Zhao Zhigang, Liu Fugui, Zhang Xiaochen, et al.). 一种确定交直流混合激励电磁构件杂散损耗的有效方法 (Confident determination of stray-field loss in electromagnetic components under AC-DC hybrid excitation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (2): 95-101.
- [16] 王升 (Wang Sheng). HVDC 地电流对变压器的影响及其抑制措施 (Influence of HVDC ground electrode current on grounding transformer and its restraining measure) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2010.
- [17] 彭慧 (Peng Hui). 变压器漏磁场及箱体涡流损耗计算 (Computation of leakage magnetic field and tank eddy current loss of transformer) [D]. 北京: 清华大学 (Beijing: Tsinghua University), 2013.
- [18] 肖本旺, 王渝红, 欧林, 等 (Xiao Benwang, Wang Yuhong, Ou Lin, et al.). 直流偏磁抑制措施研究综述 (Reviews of the restraining measures of DC bias) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2015, 51 (10): 209-216.
- [19] 刘连光, 闫旭东, 马成廉, 等 (Liu Lianguang, Yan Xudong, Ma Chenglian, et al.). 换流变压器编组和受端电网结构对其直流偏磁的影响研究 (Research of converter transformer marshalling and receiving-end grid structure's effect on converter transformer DC bias) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (1): 322-327.
- [20] 李晓萍, 文习山 (Li Xiaoping, Wen Xishan). 三相五柱变压器直流偏磁计算研究 (DC bias computation study on three-phase five limbs transformer) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (1): 127-131.
- [21] 马玉龙, 肖湘宁, 姜旭, 等 (Ma Yulong, Xiao Xiangning, Jiang Xu, et al.). 用于抑制大型电力变压器直流偏磁的接地电阻优化配置 (Optimized grounding resistance configuration against DC magnetic bias of large capacity power transformer) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 30 (3): 62-65.
- [22] 段炼, 江安烽, 傅正财, 等 (Duan Lian, Jiang Anfeng, Fu Zhengcai, et al.). 多直流接地系统单极运行对沪西特高压变电站直流偏磁的影响 (Impact of multiple HVDC system monopolar operation on DC magnetic biasing in West Shanghai UHVAC substation) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (1): 132-137.
- [23] 张艳丽, 李强, 王洋洋, 等 (Zhang Yanli, Li Qiang, Wang Yangyang, et al.). 谐波磁场下硅钢片磁致伸缩特性分析 (Analysis on magnetostrictive properties of silicon steel sheet under harmonic magnetic field) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (14): 545-550.
- [24] 张侃君, 戚宣威, 胡伟, 等 (Zhang Kanjun, Qi Xuanwei, Hu Wei, et al.). YD 型换流变三角形绕组 CT 饱和对直流保护的影响及对策 (Impact of the CT saturation of the delta winding on the HVDC protection and its countermeasure) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (20): 99-105.
- [25] 赵小军, 李慧奇, 张晓欣, 等 (Zhao Xiaojun, Li Huiqi, Zhang Xiaoxin, et al.). 基于单相三柱变压器的



直流偏磁实验与偏磁特性分析 (DC-biasing experiment and analysis of DC-biasing characteristics based on single-phase three-limb transformer) [J]. 电工电能新技术

(Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (6): 69-74.

Research of effect of temperature and DC bias on magnetic performance and magnetic field of iron core of converter transformer

DANG Yan-yang<sup>1</sup>, CHEN De-zhi<sup>2</sup>, BAI Bao-dong<sup>2</sup>, ZHANG Xin-yi<sup>3</sup>

(1. TBEA Shenyang Transformer Group CO., LTD., Shenyang 110144, China;

2.School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

3. Chang'an Branch of Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The magnetic properties of 30ZH120 electrical silicon sheet under different DC bias and temperature conditions were measured, and the B-H curve considering the bias flux is obtained by iterative calculation. Then, the magnetic field distribution and excitation current characteristics of one product grade 750kV converter transformer(Hami-Zhengzhou UHV DC Transmission and Transformation Project) under different DC bias and temperature conditions are simulated. The results show that, DC bias and working temperature affect the linear and nonlinear regions of the electrical steel sheet and converter transformers. The magnetic flux density and no-load current of converter transformer will increse with increase of temperature and DC bias. Therefore, the effect of temperature and DC bias should be considered in the transformer design.

**Key words:** DC bias; temperature; converter transformer; magnetic field distribution; excitation current