HVDC 中电力变压器直流偏磁屏蔽效应研究

赵志刚1,赵新丽2,程志光2,刘福贵1,刘兰荣2,汪友华1,杨庆新3 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. 保定天威集团有限公司技 术中心 保定 071056;3. 天津工业大学电气工程与自动化学院 天津 300387 摘要 为了研究高压直流输电系统 (HVDC) 中电力变压器发生直流偏磁状况时,由导磁钢 板和取向硅钢片组成的屏蔽构件在漏磁场激励下的电磁性能,本文提出并建立了基于漏磁补偿的 实验模型进行了详细地实验研究和仿真分析。重点考察不同直流偏磁激励下变压器磁屏蔽结构中 的杂散损耗和磁通分布,研究交流激励源和直流激励源之间的交叉作用对屏蔽构件损耗特性的影 响。通过详细的模型实验分别获得了电力变压器磁屏蔽构件在标准的正弦激励作用和不同直流偏 置磁场强度作用时的损耗和磁通分布情况并进行了对比分析。提出采用等效均匀化磁导率、电导 率处理方法计算电力变压器磁屏蔽构件杂散损耗的工程实用措施。不同直流偏磁激励条件下模型 杂散损耗的计算结果和测量结果具有较好的一致性,所得结果和结论有助于通过优化设计来提高 电力变压器磁屏蔽的性能指标。

关键词: 电力变压器 直流偏磁 取向硅钢片 各向异性 损耗 磁通 中图分类号: TM201.4+5

Research on the Shielding Effects of Power Transformer Under DC-Biased Condition in HVDC

Zhao Zhigang¹,Zhao Xinli²,Cheng Zhiguang²,Liu Fugui¹,Liu Lanrong²,Wang Youhua¹,Yang Qingxin³ 1. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology Tianjin 300130 China;2. Baoding Tianwei group Co., Ltd. Baoding 071056 China;3. Tianjin Polytechnic University Tianjin 300387 China

Abstract In order to study the electromagnetic properties of the transformer shielding structural parts under various DC biased conditions, which are made of the magnetic steel plate and the grain- oriented silicon steel, a test model with compensator of leakage flux is proposed in this paper. The distribution of iron loss and magnetic flux are investigated in detail based on the test model. The different electromagnetic behaviors of the shielding shunts under the interaction between the AC exciting source and the DC exciting source is also examined. The stray loss and flux of different typed shunts are obtained experimentally and the comparison between the measured and calculated results is carried out. A practical engineering-oriented approach is proposed to solve the stray loss problems using homogenization processing method. All the calculated and measured results of the iron loss and magnetic flux for different magnetic shunts are practically in good agreement. These have important significance in improving the performance of magnetic shielding by optimizing design.

Keywords: Power transformer, DC bias, grain-oriented silicon steel, anisotropy, iron loss, magnetic flux

基金: 国家自然科学基金 (51237005/51107026/27/38)、中国博士后科学基金 (2013M530866)、河北省自然科学基金 (E2013202130)、河北省 高等学校科学技术研究基金 (Q2012094) 和国家电网科技资助项目。

收稿日期 2013-10-08 改稿日期 2014-04-30

作者简介: 赵志刚 男,1981年生,博士研究生,副教授,研究方向为工程电磁场分析及磁性材料模拟与应用。 程志光 男,1942年生,教授级高级工程师,研究方向为工程电磁场分析、磁性材料模拟与工业应用。

1 引言

特高压、特大容量 电力变压器中,由取向硅钢 片制成的叠片铁心和磁屏蔽,以及由导磁钢板组成 的构件(如:变压器油箱、铁心拉板)中的磁通分 布和损耗分布,在电力变压器设计过程中是备受关 注的问题之一^[1-4]。在不同的磁屏蔽 构建中,取向 硅钢叠片和导磁钢板会表现出不同的电磁性能,漏磁 通进入取向硅钢叠片和导磁钢板结构内部所产生的三 维涡流场和损耗计算是一个很具挑战性的问题^[5-13], 其直接的工程背景是大型变压器的漏磁场进入铁心 拉板和相邻的铁心叠片或者进入磁屏蔽,需要采取 减少涡流损耗的措施,这对于大容量超高压电力变 压器的设计尤其重要^[14-17]。

在不同的激励条件下,电工材料会表现出不同 的电磁性能^[18]。直流偏磁是电力变压器的非正常工 作状态,目前广泛存在的是由高压直流输电系统

(HVDC)引起的变压器直流偏磁问题,当直流输 电系统以单极大地回线方式或双极不平衡方式运行 时,流入大地的直流电流会使附近中性点接地的交 流变压器发生直流偏磁。因此集中研究变压器在直 流偏磁工作条件下的规律和特性至关重要。国内外 文献就交直流混合输电所产生的问题进行了一些研 究和探讨,就流入中性点的直流电流提出了一些抑 制措施,其中对直流偏磁变压器的励磁电流也有一 些专题研究^[19-24]。

变压器在直流偏磁工作条件下,由于直流磁通 的作用使得变压器铁心的半周饱和程度加剧,漏磁 通增大,因此直流偏磁条件下变压器叠片铁心和结 构件的电磁特性研究成为变压器生产和运行厂商密 切关注的问题,作者对此已进行了较系统的数值仿 真和实验研究工作^[25-29]。

本文设计并研制了具有漏磁通补偿功能的变压 器结构件杂散损耗测量模型,采用与在线运行的变 压器发生直流偏磁时相同的交直流串联的激励方式, 重点研究不同直流偏置磁场和交流激励交叉作用时, 漏磁通在立式磁屏蔽 (M-type)、平式磁屏蔽

(MEM-type)和导磁钢板组成的屏蔽构件中的损耗 和磁通分布。基于实验结果建立了不同屏蔽构件

(立式磁屏蔽+导磁钢板、平式磁屏蔽+导磁钢板) 的三维有限元仿真模型,实验所得数据和仿真分析 结果有助于验证直流偏磁工况下屏蔽构件杂散损耗 计算方法的有效性,对于电力变压器磁屏蔽设计阶 段的电磁性能分析具有一定的指导意义。

2 模型结构参数及激励方式

对于特大容量的变压器,例如, 1000kV 特高 压变压器,单台产品的容量高达 1000MV·A,杂 散损耗问题的研究就更为重要,不可忽视任何一个 导致杂散损耗增加的结构细节。本文基于如图 1所 示的具有漏磁通补偿功能的变压器结构件杂散损耗 测量模型,对大型电力变压器中普遍采用的磁屏蔽 由于直流偏磁漏磁通感应产生的杂散损耗进行了详 细的实验研究和仿真计算。







Fig.1 Structure and parameters of test model

实验模型由两个对称的铁心和线圈、装置支架、 运动部件和被试品组成。被试品由立式和平式两种结 构的磁屏蔽和钢板组成,并且均严格按照现有典型变 压器产品结构设计。本实验制作完成的模型按照电 力变压器铁心的标准工艺进行叠装,主要技术数据 为:

(1)铁心规格: 硅钢片牌号: 30P120, 2 个铁 心结构尺寸均为 600×100×200mm, 90kg×2 个。
(2)激励线圈: 导线型号 QQ-2, 线径 Φ1.60,两根并绕,260匝/2层,中间抽头,激励线 圈和补偿线圈绕向相反。

(3)测量线圈:导线型号 QQ-2,线径
 Ф0.56,260 匝/2 层,中间抽头,激励线圈和补偿
 线圈绕向相反。

(4) 屏蔽构件: 平式磁屏蔽及立式磁屏蔽(硅 钢片牌号: 30P120),但叠积方式不同;导磁钢板: Q235B。平式及立式屏蔽构件尺寸,分别如图

2a、2b 所示。



(b) 立式磁屏蔽 +导磁钢板

图 2 磁屏蔽及导磁钢板组合构件(被试品)

Fig.2 Combination of magnetic shield and magnetic plate

为了更直观地分辨直流偏置磁场对磁屏蔽杂散 损耗的影响,采用不同的直流偏置电流和交流电压 的交叉激励对屏蔽构件的电磁性能进行了详细地实 验研究和分析,各种激励方式见表 1。

表1 模型激励条件

Tab.1 The exciting condition of the model

激励	激励源	激励	激励源	激励	激励源
方式	DC/A+AC/V	方式	DC/A+AC/V	方式	DC/A+AC/V
C1	0+50	C6	0+100	C11	0+150
C2	2+50	C7	2+100	C12	2+150
C3	3+50	C8	3+100	C13	3+150
C4	4+50	C9	4+100	C14	4+150

C5	5+50	C10	5+100	C15	5+150	
						-

3 实验研究

3.1 实验原理

由于负载测量模型中激励铁心材料的非线性, 造成负载损耗测量时引入了一个铁心的非线性铁损, 为了分离出负载情况下除屏蔽构件以外的损耗,需 要设计一个空载模型来测量除屏蔽构件以外的损耗,需 要设计一个空载模型来测量除屏蔽构件以外的损耗,怎 包括铁心损耗和线圈的涡流损耗。如果空、负载工 况下铁心的工作磁通密度和空间漏磁场分布相同, 即可保证空、负载状况下铁心和线圈涡流损耗相等。 实验原理参见图 3,负载工况接线如图 4 所示,损 耗数据由精密功率分析仪(WT3000,横河)测量。









图 3 屏蔽构件杂散损耗测量实验原理



of shield structure



图 4 实验接线图 (负载)

Fig.4 Experimental wiring diagram (load condition)

3.2 实验方法

3.2.1 损耗的测量

放置被试屏蔽构件,增加电压使二次测量线圈的电压到指定数值(即达到指定漏磁强度),记录测量线路的总损耗 *P*₁。然后移去被试品,对激励线圈和补偿线圈同时施加激励,形成方向相反的磁场,当测量线圈的标定电压到负载状态指定数值时,记录测量线路的总损耗 *P*₀,则被试屏蔽构件的损耗 *P*_t由式(1)确定

$$P_{\rm t} = P_{\rm l} - \frac{P_{\rm 0}}{2} \tag{1}$$

3.2.2 磁屏蔽表面磁通密度的测定

为了考察空气中(磁屏蔽表面)的磁通密度分布情况,采用高斯计(7010 F.W.BELL,美国)对应于 图 5 所示位置,对空气中的漏磁通密度进行了测量。



图 5 磁屏蔽表面磁通密度测量位置示意图

Fig.5 The magnetic flux density measuring position on the surface of the magnetic shield

4 仿真分析

4.1 二维仿真分析

模型的二维仿真,主要目的是为了初步考察补偿线圈对空间漏磁场分布的影响。仿真模型如 图 6a 所示,空、负载漏磁场分布分别如图 6b、6c 所示。



(a) 二维仿真模型



(b) 空载

(c) 负载

图 6 二维仿真模型及磁场分布

Fig.6 2-D simulation model and magnetic field distribution

从图 6 所示的二维仿真结果可以看出,本文提出的实验模型在空、负载工况下激励线圈空间漏磁场分布 具有很好的一致性。因此,用模型负载工况下的损耗减 *P*_l(包括激励铁心损耗和激励线圈损耗)减去空载 损耗 *P*₀(包括两倍的铁心和线圈损耗)的一半,可以准确地获得被试品的损耗 *P*_t。

4.2 三维仿真分析

用实验模型的二维仿真来确定模型实际的磁通和损耗分布是不精确的,更加精确的仿真结果需要用三维 建模进行仿真。此时需要考虑取向硅钢叠片 的非线性、磁导率各向异性和电导率各向异性。同 时,由于叠 片实体构件尺寸巨大但彼此绝缘的单片厚度却很小(0.3mm),若设叠片系数为0.97,片间绝缘的厚度只有 0.3×3%=0.009(mm),直接按实际尺寸建模计算是不现实的,需要采用均匀化等效处理方法。

4.2.1 等效均匀化磁导率

磁屏蔽在叠积方向,叠片与叠片间气隙(包括叠片绝缘层)的磁阻形成串联,如图 7所示。根据磁阻 串联原理有

$$R_{\rm eq} = R_{\rm iron} + R_{\rm air} \tag{2}$$

$$\frac{W}{\mu_{\rm eq}L} = \frac{C_{\rm f}W}{\mu_{\rm iron}L} + \frac{\square 1 - C_{\rm f} W}{\mu_0 L}$$
(3)

式中, μ_{eq} 为等效磁导率; μ_{iron} 为硅钢磁导率; μ_0 为真空磁导率;W为总叠片厚度;L为叠片长度; C_f 为叠片系数。



图 7 叠积方向磁各向异性的均匀化处理

Fig.7 Homogenization of magnetic anisotropy in lamination direction

$$\mu_{\rm eq} = \frac{1}{\frac{C_{\rm f}}{\mu_{\rm iron}} + \frac{1 - C_{\rm f}}{\mu_0}}$$
(4)

又 $\mu_{\text{iron}} = \mu_r \mu_0$,则均匀化的等效相对磁导率为

$$\mu_{r_{eq}} = \frac{\mu_{eq}}{\mu_{0}} = \frac{\frac{1}{\frac{C_{f}}{\mu_{iron}} + \frac{1 - C_{f}}{\mu_{0}}}}{\mu_{0}} = \frac{\mu_{r}}{C_{f} + (1 - C_{f})\mu_{r}} \quad (5)$$

式中, µ_r≫C_f, 式 (5) 可以简化为

$$\mu_{\rm r_eq} = \frac{1}{1 - C_{\rm f}} \tag{6}$$

与叠片平行的两个正交方向,叠片与叠片间的气隙磁阻形成并联,如图 8所示。



图 8 叠片平行方向磁各向异性的均匀化处理

Fig.8 Homogenization of magnetic anisotropy in rolling and transverse direction

根据磁阻并联原理有

$$\frac{1}{R_{\rm eq}} = \frac{1}{R_{\rm iron}} + \frac{1}{R_{\rm air}} \sqrt{b^2 - 4ac}$$
(7)

$$\frac{\mu_{\rm eq}W}{L} = \frac{\mu_{\rm iron}C_{\rm f}W}{L} + \frac{\mu_{\rm 0}(1-C_{\rm f})W}{L}$$
(8)

$$\mu_{\rm eq} = \mu_{\rm iron} C_{\rm f} + \mu_0 (1 - C_{\rm f})$$
 (9)

则均匀化的等效相对磁导率为

$$\mu_{\rm r_eq} = \mu_{\rm r} C_{\rm f} + (1 - C_{\rm f}) \tag{10}$$

式(10)中, $\mu_r \gg 1-C_f$,可以简化为

$$\mu_{\rm r\ eq} = \mu_{\rm r} C_{\rm f} \tag{11}$$

最终,磁屏蔽中叠片组的磁各向异性按式(12)进行处理

$$(\mu) = \begin{pmatrix} C_{\rm f} \mu_x & & \\ & C_{\rm f} \mu_y & \\ & & \mu_0 / (1 - C_{\rm f}) \end{pmatrix}$$
(12)

式中, μ_x 、 μ_y 分别为顺沿轧制方向和垂直轧制方向的磁导率。

4.2.2 等效均匀化电导率

由于立式磁屏蔽硅钢叠片的片宽很窄,可忽略各个方向的涡流反作用,给定电导率各向同性, σ≪1。 计算和实测结果的比较表明,这样的处理可 以获得较满意的计算结果,并可显著降低计算代价。

对于平式磁屏蔽,取向硅钢叠片的片宽较大 (200mm×860mm),不能忽略叠积平面内的涡流效应。因此,平式磁屏蔽电导率按式(13)处理。

叠片组表面单片
叠片组内部整体
$$(\sigma) = \begin{cases} (\sigma) \\ (C_{\rm f}\sigma \\ & C_{\rm f}\sigma \\ & & 0 \end{cases}$$
(13)

式中, σ 为硅钢片的电导率。

4.2.3 三维仿真结果

按上述磁屏蔽均匀化处理方法,建立了变压器磁屏蔽构件的三维有限元仿真模型。在不同的直流偏置漏 磁场激励下,立式屏蔽构件和平式屏蔽构件中的杂散损耗计算和测量结果,分别见表 2 和表 3。从表 2 和 表 3 的结果可以看出,不同偏置激励方式下,实验模型的三维仿真损耗计算结果和实际测量 结果具有很 好的一致性,证明了本文方法的可行性。

Tab.2 Iron loss in components of m-type shielding					
激励	损耗/W	激励	损耗/W	激励	损耗/W
方式	测量/计算	方式	测量/计算	方式	测量/计算
C1	0.66/0.65	C6	2.68/2.63	C11	5.88/5.74
C2	0.65/0.67	C7	2.66/2.62	C12	5.84/5.72
C3	0.67/0.66	C8	2.67/2.65	C13	6.04/5.76
C4	0.66/0.68	С9	2.65/2.64	C14	5.96/5.73
C5	0.69/0.67	C10	2.74/2.65	C15	6.09/5.75

表 2 立式屏蔽构件杂散损耗结果

表 3 平式屏蔽构件杂散损耗结果

Tab.3Iron loss in components of mem-type shielding					
激励	损耗/W	激励方	损耗/W	激励方	损耗/W
方式	测量/计算	式	测量/计算	式	测量/计算
C1	2.79/2.61	C6	13.82/13.74	C11	36.06/34.63
C2	2.85/2.63	C7	13.78/13.75	C12	35.79/34.66
C3	2.83/2.62	C8	13.72/13.76	C13	35.56/34.61
C4	2.86/2.66	C9	13.98/13.79	C14	35.66/34.67
C5	2.90/2.71	C10	13.84/13.70	C15	36.24/34.62

综上,在上述直流偏置漏磁通的激励条件下(激励方式: C2~C15),磁屏蔽构件的杂散损耗相对于在 幅值相等的标准正弦漏磁通激励条件下(激励方式: C1)产生的杂散损耗没有实质性的差异。

为了进一步验证仿真结果的正确性,本文采用高斯计(Model 7010, F. W. Bell,美国)对两种形式的 屏蔽构件磁屏蔽表面的法向磁通密度进行了测量和计算,以 C8 为例,测量和计算结果如图 9 所示。需要 指出的是,两种形式的屏蔽构件其磁屏蔽表面法向磁通密度的测量结果之间没有实质性的差异,但是损耗的 结果之间却有很大的差别,主要是由于垂直进入磁屏蔽的法向磁通引起的附加涡流损耗不同所致,立式屏蔽 采用的取向硅钢叠片的片宽很小其涡流效应较小;而平式屏蔽采用的取向硅钢叠片的片宽较大其涡流效应较 强。



the shield

5 结论

(1)提出了一种基于漏磁通补偿的杂散损耗测量方法并建立了相关的实验模型,基于该模型对直流偏磁 不同的交流激励和直流偏置磁场交叉作用 时,屏蔽构件中的杂散损耗进行了详细地实验研究,通过实验和仿 真结果分析,说明了该方法能够实现屏蔽构件中杂散损耗的准确测量。

(2)基于两种磁屏蔽中硅钢片叠积方式的差异采用不同的建模方法,建立了变压器屏蔽结构件杂散损耗 有限元仿真模型,通过计算和实验结果的比较,验证了仿真模型的有效性。

(3)本文所获得的测量和计算结果、结论,将有助于合理地建立三维有限元分析模型,验证偏磁工况 下电磁场分析和损耗计算方法的有效性,对于优化磁屏蔽结构设计及应用研究等具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] Cheng Z, Takahashil N, Forghani B, et al. 3-D finite element modeling and validation of power frequency multishielding effect[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 243-246.
- [2] 杜永,程志光,颜威利,等.采用基准模型的导磁钢板及取向硅钢叠片的电磁特性 [J].高电压技术,2010,36(5): 1199-1204.

Du Yong, Cheng Zhiguang, Yan Weili, et al. Electromagnetic properties of solid and laminated steel using the benchmark models[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5):1199-1204.

- [3] 朱占新,谢德馨,张艳丽.大型电力变压器三维漏磁场与结构件损耗的时域分析 [J]. 中国电机工程学报,2012, 32(9):156-160.
 Zhu Zhanxin, Xie Dexin, Zhang Yanli. Time domain analysis of 3D leakage magnetic fields and structural part losses of large power transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9):156-160.
- [4] 周岩. 高频矩形波激励下磁芯损耗的研究 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 91-95.
 Zhou Yan. Magnetic core loss excited by high- frequency rectangle waveform[J]. Electric Power Automation Equipment. 2013, 33(1): 91-95.
- [5] Takahashi N, Nakazaki S, Miyagi D. Optimization of electromagnetic and magnetic shielding using ON/OFF method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(8): 3153-3156.
- [6] Du Yong, Cheng Zhiguang, Zhao Zhigang, et al. Magnetic flux and iron loss modeling at laminated core joints in power transformers[J]. IEEE Transac- tions on Applications Superconduct, 2010, 20(3): 1878-1882.
- [7] 景巍,谭国俊,叶宗彬.大功率三电平变频器损耗计算及散热分析 [J].电工技术学报,2011,26(2):134-140.
 Jing Wei, Tan Guojun, Ye Zongbin. Losses calculation and heat dissipation analysis of high-power three- level converters[J]. Transactions of China Electrotech- nical Sosiety. 2011, 26(2): 134-140.
- [8] 孔晓光,王凤翔,邢军强. 高速永磁电机的损耗计算与温度场分析 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 166-172. Kong Xiaoguang, Wang Fengxiang, Xing Junqiang. Losses calculation and temperature field analysis of high speed permanent magnet machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Sosiety, 2012, 27(9): 166-172.
- [9] 朱熙, 范瑜, 秦伟, 等. 旋转磁场电动式磁悬浮装置的力和损耗特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 90-96.
 Zhu Xi, Fan Yu, Qin Wei, et al. Force and loss characteristic analysis of rotating field electrodynamic levitation

devices[J]. Proceedings of the CSEE,2012, 32(12): 90-96.

- [10] 沈建新,李鹏,郝鹤,等. 高速永磁无刷电机电磁损耗的研究概况 [J]. 中国电机工程学报,2013,33(3): 62-74.
 Shen Jianxin, Li Peng, Hao He, et al. Study on electromagnetic losses in high-speed permanent magnet brushless machines-the state of the art[J]. Proceedings of the CSEE,2013, 33(3): 62-74.
- [11] 徐飞, 史黎明, 李耀华. 异步电机在线参数观测及损耗控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 112-119.
 Xu Fei, Shi Liming, Li Yaohua. Strategy research on induction motor on-line parameter observer and loss control[J].
 Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 112-119.
- [12] 郭子政,胡旭波.应力对铁磁薄膜磁滞损耗和矫顽力的影响 [J]. 物理学报,2013,62(5):057501-1-057501-5.
 Guo Zizheng, Hu Xubo. Effects of stress on the hysteresis loss and coercivity of ferromagnetic film [J]. Acta Phys.
 Sin. 2013, 62(5): 057501-1-057501-5.
- [13] 井永腾,李岩,额尔和木巴亚尔.高压自耦变压器的涡流损耗计算与屏蔽措施 [J].高电压技术,2012,38(8):1988-

6

1994.

Jing Yongteng, Li Yan, Eerhemubayaer. Eddy current losses calculation and shields of high voltage autotransformer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1988-1994.

- [14] Kaimori H, Kameari A, Fujiwara K. FEM computation of magnetic field and iron loss in laminated iron core using homogenization method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1405-1408.
- [15] 谢德馨,杨仕友.工程电磁场数值分析与综合 [M].北京:机械工业出版社,2009.
- [16] Cheng Z, Takahashi N, Forghani B, et al. Effect of variation of B-H properties on loss and flux inside silicon steel lamination[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 1346-1349.
- [17] 程志光,高橋則雄,博扎德•弗甘尼.电气工程电磁场模拟与应用 [M].北京:科学出版社,2009.
- [18] Miyagi D, Yoshida T, Nakano M, et al. Development of measuring equipment of dc-biased magnetic properties using open-type single-sheet tester[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 2846-2848.
- [19] 梅桂华, 梁文进, 刘艳村, 等. 变压器直流偏磁电流阻容抑制装置的开发应用 [J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2581-2585.

Mei Guihua, Liang Wenjin, Liu Yancun, et al. Development of the DC current blocking device in capacitor2resistor for transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2581-2585.

 [20] 郭满生,梅桂华,刘东升,等.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 [J].电工技术学报, 2009, 24(5): 46-51.
 Cue Mensheng, Mai Cuibus, Liu Dengsheng, et al. B.H. sume based on serie and summetric megneticing surrent in

Guo Mansheng, Mei Guihua, Liu Dongsheng, et al. B-H curve based on core and asymmetric magnetizing current in DC-biased transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 46-51.

[21] 蒋伟,黄震,胡灿,等.变压器接小电阻抑制直流偏磁的网络优化配置 [J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):89-94.

Jiang Wei, Huang Zhen, Hu Can, et al. Optimized network configuration of small resistances to limit DC Bias current of transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 89-94.

- [22] Auerhofer Bíró O, Buchgraber G S, et al. Prediction of magnetising current waveform in a single-phase power transformer under DC bias[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2007, 1(1): 2-5.
- [23] Zhao Zhigang, Liu Fugui, Ho S L, et al. Modeling magnetic hysteresis under DC-biased magnzation using the neural network[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 3958-3961.
- [24] Zhao Zhigang, Liu Fugui, Cheng Zhiguang, et al. Measurements and calculation of core-based B-H curve and magnetizing current in DC-biased trans- formers[J]. IEEE Transactions on Applications Superconduct, 2010, 20(3): 1131-1134.
- [25] 赵志刚,刘福贵,程志光,等. HVDC 中直流偏磁电力变压器叠片铁心中损耗及磁通分布 [J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2346-2351.
 Zhao Zhigang, Liu Fugui, Cheng Zhiguang, et al. Loss and flux distribution of power transformers laminated core under DC-biased magnetization condition in HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2346-2351.
- [26] 赵志刚,刘福贵,张俊杰,等. 直流偏磁条件下变压器激磁电流的实验与分析 [J]. 电工技术学报,2010,25(4):71-76.
 Zhao Zhigang, Liu Fugui, Zhang Junjie, et al. Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased

transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 71-76.

[27] 赵志刚,刘福贵,程志光,等. 直流偏磁条件下叠片铁心的磁性能模拟 [J]. 电工技术学报,2010,25(9):14-19.
 Zhao Zhigang, Liu Fugui, Cheng Zhiguang, et al. Magnetic property modeling of laminated core under DC-biased condition[J]. Transactions of China Electro- technical Society, 2010, 25(4): 14-19.