

直流偏磁状态下电力变压器铁心 动态磁滞损耗模型及验证

曹 林, 何金良, 张 波

(清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 海淀区 100084)

Dynamic Hysteresis Loss Model of Power Transformer Under DC Current Biasing and Its Verification

CAO Lin, HE Jin-liang, ZHANG Bo

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Under DC current biasing the additional losses of power transformer increase significantly, as a result the loss of iron core can not be identified from the no-load loss correctly. It is necessary to establish an accurate model of the iron core to evaluate its possible overheating problem. Based on the Jiles-Atherton model, the dynamic hysteresis loss model of the transformer core considering the classic eddy current loss and abnormal loss is developed, which is suitable for all the reasonable coefficient of reversible magnetization and adopting the flux density as entry variable. By using genetic algorithm, the model parameters are extracted from the no-load experimental results of a small single-phase transformer and then applied to simulate the iron core behavior at different magnitudes of DC biasing current. Compared with the experimental results of DC current biasing, the simulations are in a good agreement. This indicates that the dynamic hysteresis loss model can describe the relation between the magnitude of DC biasing current and transformer core loss correctly and practically.

KEY WORDS: power transformer; DC biasing; dynamic hysteresis loss; Jiles-Atherton model; genetic algorithm

摘要: 直流偏磁状态下, 电力变压器的附加损耗显著增加, 试验测量得到的变压器空载损耗不能充分表征铁心实际损耗。为正确评估变压器铁心可能出现的过热问题, 有必要建立其准确的数学模型。该文在 Jiles-Atherton 基本磁滞模型的基础上, 从能量平衡原理出发, 考虑铁心在交流状态下的涡流损耗和异常损耗, 建立了合理可逆磁化系数条件下, 以磁通密度作为输入量的铁心动态磁滞损耗模型。利用遗传算法提取试验变压器铁心在正常工作条件下的动态模型参数, 并用于对不同幅值直流偏磁电流作用下的铁心损耗进行仿真计算。将计算结果与试验结果进行对比, 发现二者吻合较好,

说明该动态模型能较好的描述直流偏磁状态下电力变压器铁心动态磁滞损耗, 验证了模型的正确性和实用性。

关键词: 电力变压器; 直流偏磁; 动态磁滞损耗; Jiles-Atherton 模型; 遗传算法

0 引言

变压器直流偏磁现象是指在某种原因下, 变压器电磁场中出现了直流磁势及相应的直流磁通, 并由此引起的一系列电磁效应。处于直流偏磁状态的电力变压器绕组电流将出现严重畸变, 包含丰富的偶次和奇次谐波。在电力变压器内部, 大量磁链在过饱和的铁心外闭合, 变压器本身会因此出现振动加剧、噪声升高、局部过热, 甚至绝缘受损等现象。2004 年 5 月, 贵广 I 回高压直流输电工程的监测记录表明, 在 750 MW 单极大地回路运行方式下, 当春城站主变压器中性点直流电流达 34.5 A 时, 变压器噪声为 93.6 dB, 与发生直流偏磁前相比增加了 19 dB。

为了确定电力变压器对直流偏磁电流的耐受能力, 就必须对其在直流偏磁状态下的电气、机械等特性进行定量评估。其中, 变压器铁心在直流偏磁电流影响下可能出现的过热问题是研究的一个重点。在以往的研究中, 研究者多以试验为主, 通过测量比较不同幅值的直流偏磁电流作用下的变压器空载损耗, 进而得出该问题的相关结论^[1-5]。由于变压器的空载损耗实际是由铁心损耗和附加损耗组成的, 而附加损耗部分, 包括漏磁通在变压器金属部件中产生的损耗、绕组电流产生的非电阻性损耗以及变压器振动和噪声所消耗的能量等, 在直流偏磁

状态下都会出现不同程度的增加。特别是对于大型电力变压器而言,附加损耗的增加更是不容忽视。因此测量得到的变压器空载损耗无法反应实际的铁心损耗,给正确评估铁心过热问题带来了相当大的困难。建立能够正确描述直流偏磁状态下变压器铁心损耗的数学模型是求解该问题的一个重要途径。

在铁磁材料磁滞特性研究领域,将微观结构参数和铁磁材料对外界磁场作用的宏观反应——磁化曲线联系起来的Jiles-Atherton模型被认为是具有代表性的经典模型之一^[6]。近年来,已有国内外研究者^[7-10]开展了利用基于Jiles-Atherton理论^[11]的铁心磁滞模型对直流偏磁现象进行分析的研究,但大多采用的是以磁场强度为输入量的磁滞方程,没有对直流偏磁条件下,变压器铁心磁通密度变化相对磁场强度变化更为缓慢这一特点加以充分利用。同时,国内研究者^[9-10]目前在对变压器在直流偏磁状态下的性能变化进行分析时还未能考虑与频率有关的铁心损耗分量的影响。此外,利用基于Jiles-Atherton磁滞理论的动态磁滞损耗模型进行直流偏磁状态下变压器铁心损耗分析的研究较少。

在计及铁心涡流损耗和异常损耗的前提下,本文从Jiles-Atherton基本磁滞理论出发,以能量平衡原理为依据,推导建立了合理可逆磁化系数条件下,以磁通密度作为输入量的电力变压器铁心动态磁滞损耗模型。此模型具有清晰的物理意义和良好的数值稳定性,可以用于确定不同幅值的直流偏磁电流作用下铁心的动态磁滞损耗。将该模型的计算结果与小型变压器有关试验数据进行了对比验证,结果充分说明了该模型的正确性和实用性。

1 铁心动态磁滞损耗模型

1.1 动态磁滞损耗模型

与通过并联旁路电阻等方法对变压器铁心损耗加以分析相比,直接建立变压器铁心的磁滞模型是从物理本质上对相关问题进行描述,能更好的反映铁心损耗,从而也能更好的开展直流偏磁条件下电力变压器铁心损耗变化的研究。

铁磁材料的磁滞回线面积表示在1个磁化周期中转化为内能的能量。频率越高,面积越大,回线形状变化越大。一般,单位体积磁性钢片中的功率损耗可以分为静态磁滞损耗和动态损耗两部分^[12]:

$$P = P_h + P_d \quad (1)$$

式中: P_h 为静态磁滞损耗; P_d 为动态损耗。而动态损耗部分还可进行进一步分解:

$$P_d = P_c + P_e \quad (2)$$

式中: P_c 为涡流损耗; P_e 为异常损耗。

文献[13]指出,在取向和非取向低碳硅钢片中,工频条件下,磁滞损耗、涡流损耗和异常损耗通常大小相当。以30ZH105磁性钢片为例,其典型数据为总损耗1.02 W/kg,其中磁滞损耗为0.3 W/kg;涡流损耗为0.29 W/kg;其他异常损耗为0.43 W/kg^[14]。因此,利用Jiles-Atherton磁滞理论对变压器铁心损耗进行分析时必须对其基本磁滞模型进行进一步扩充,计及包括材料涡流损耗和异常损耗在内的动态损耗分量的影响。

单位体积内的涡流损耗功率^[15]:

$$P_c(t) = \frac{e^2}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (3)$$

式中: e 为钢片厚度; ρ 为导体电阻率; B 为磁通密度。

单位体积内的异常损耗功率^[16]:

$$P_e(t) = \left(\frac{GSV_0}{\rho} \right)^{1/2} \left(\left| \frac{dB}{dt} \right| \right)^{3/2} \quad (4)$$

式中: G 为无量纲的系数; S 为钢片截面积; V_0 描述局部矫顽磁场的统计分布。

在文献[17]中,Jiles根据能量平衡原理,结合式(3)、(4),推导建立了较小可逆磁化系数条件下,以磁场强度为输入量的铁磁材料动态磁滞模型。为了增加模型的实用性和数值稳定性,本文重新推导建立了合理可逆磁化系数条件下,将磁通密度作为输入量的动态磁滞损耗模型。

合理可逆磁化系数条件下,静态磁滞能量平衡原理的基本表达式^[17]为

$$\mu_0 \int M_{an} dH_e = \mu_0 \int M dH_e + \mu_0 k \delta \int \frac{dM_{irr}}{dH_e} dH_e \quad (5)$$

式中:右边第一项为静磁能量;第二项为由于阻塞而损耗的能量; μ_0 为真空磁导率; M_{an} 为无磁滞效应磁化强度; M 为磁化强度; M_{irr} 为不可逆磁化强度; k 为不可逆损耗系数; H_e 为有效磁场强度; $H_e = H + \alpha M$, α 为畴壁相互作用系数。当磁场强度 H 增加时, $\delta = 1$;当 H 减小时, $\delta = -1$ 。

无磁滞效应磁化曲线表达式^[17]为

$$M_{an}(H_e) = M_s \left[\coth \left(\frac{H_e}{a} \right) - \frac{a}{H_e} \right] \quad (6)$$

式中: M_s 为饱和磁化强度; a 为无磁滞效应磁化强度形状系数。

由 $M_{irr} = \frac{M - cM_{an}}{1 - c}$,可以将式(5)修改为

$$\mu_0 \int M_{an} dH_e = \mu_0 \int M dH_e + \frac{\mu_0 k \delta}{1-c} \int \frac{dM}{dH_e} dH_e - \frac{\mu_0 k \delta c}{1-c} \int \frac{dM_{an}}{dH_e} dH_e \quad (7)$$

式中 c 为可逆磁化系数, $0 < c < 1$ 。

当考虑铁磁材料的动态损耗部分时, 新的能量平衡方程可写为

$$\begin{aligned} \mu_0 \int M_{an} dH_e = & \mu_0 \int M dH_e + \frac{\mu_0 k \delta}{1-c} \int \frac{dM}{dH_e} dH_e - \\ & \frac{\mu_0 k \delta c}{1-c} \int \frac{dM_{an}}{dH_e} dH_e + \int \frac{e^2}{12\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt + \\ & \int \left(\frac{GSV_0}{\rho} \right)^{1/2} \left(\left| \frac{dB}{dt} \right| \right)^{3/2} dt \end{aligned} \quad (8)$$

将式(8)两端对 H_e 进行微分并同乘以 dH_e / dB , 整理得到

$$\begin{aligned} \mu_0 M_{an} \left(\frac{dH_e}{dB} \right) = & \mu_0 M \left(\frac{dH_e}{dB} \right) + \frac{\mu_0 k \delta}{1-c} \frac{dM}{dB} - \\ & \frac{\mu_0 k \delta c}{1-c} \frac{dM_{an}}{dB} \left(\frac{dH_e}{dB} \right) + \left(\frac{e^2}{12\rho} \right) \left(\frac{dB}{dt} \right) + \\ & \delta \left(\frac{GSV_0}{\rho} \right)^{1/2} \left(\left| \frac{dB}{dt} \right| \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

再利用 $\frac{dH_e}{dB} = \frac{1}{\mu_0} + (\alpha - 1) \frac{dM}{dB}$, 根据式(9)有

$$\frac{dM}{dB} = \frac{(M - M_{an} - \frac{k\delta c}{1-c} \frac{dM_{an}}{dB}) + P_d(t)}{\mu_0(1-\alpha)(M - M_{an} - \frac{k\delta c}{1-c} \frac{dM_{an}}{dB}) - \frac{\mu_0 k \delta}{1-c}} \quad (10)$$

其中, $P_d(t) = \left(\frac{e^2}{12\rho} \right) \left(\frac{dB}{dt} \right) + \delta \left(\frac{GSV_0}{\rho} \right)^{1/2} \left(\left| \frac{dB}{dt} \right| \right)^{1/2}$ 。

结合式(6)及关系式 $B = \mu_0(H + M)$, 采用 Runge-Kutta 方法就可以对式(10)进行求解。

1.2 模型参数的确定

尽管如式(10)所示的动态磁滞损耗模型具有相对简洁的数学表达形式, 但是由于试验测量得到的磁滞回线上并没有现成固定的参考点可用于该模型参数的计算, 因此确定所必需的参数就显得较为复杂^[18]。针对这一问题, 文献[19-22]采用遗传算法对 Jiles-Atherton 静态磁滞模型参数进行了拟合, 取得了较好的效果。因此, 本文也利用遗传算法对试验变压器铁心动态磁滞损耗模型的各项参数进行了提取, 并根据文献[19]的建议, 对不可逆损耗系数 k 进行了修正:

$$k = k_0 \cdot e^{-H^2/2\sigma^2} \quad (11)$$

式中: k_0 为不可逆损耗系数缺省值; σ 为标准偏差。

2 模型的试验验证

为了验证模型的正确性, 利用 1 台额定容量为 5 kVA, 额定电压为 220 V 的单相双绕组心式变压器进行相关试验。铁心所用无取向硅钢片型号为 50W470。

空载条件下变压器直流偏磁试验接线示意图如图 1 所示。

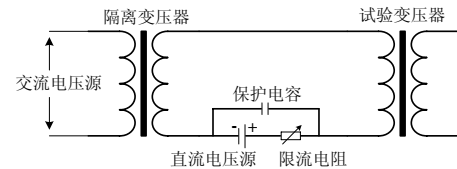


图 1 小型变压器直流偏磁试验接线示意图

Fig. 1 Circuit diagram for experimental investigation

值得指出的是, 由于在直流偏磁状态下变压器绕组电流中含有非常丰富的谐波, 因此试验中没有采用常规功率表对直流偏磁状态下变压器的有功损耗进行测量, 而是根据有功功率的基本定义, 利用同步测量得到的电压电流数据直接进行数值积分运算获得。同时, 由电压和电流的测量数据, 还可以分别计算得到铁心磁通密度和磁场强度, 从而得到变压器铁心的磁滞回线。

为尽量减少变压器附加损耗的影响, 铁心额定磁通峰值设定为 1.10 T, 直流偏磁电流幅值最高约为 2 A。利用遗传算法对测量所得磁滞回线进行多次反复拟合优化, 最终确定额定条件下动态磁滞损耗模型各项参数分别为 $M_s = 1.606 \times 10^6$ A/m, $a = 760.3$ A/m, $k_0 = 46.15$ A/m, $\alpha = 1.428 \times 10^{-3}$, $c = 0.299$, $\sigma = 737.8$, 而表征涡流损耗和异常损耗的动态损耗系数 k_1 和 k_2 则分别为 0.049 96 和 1.122。

额定工作点电流波形和磁滞回线的仿真结果与试验数据的比较分别如图 2、3 所示。

上述对比表明, 利用拟合得到的铁心动态磁滞损耗模型参数进行仿真所得结果与试验值吻合得较好, 可以进一步用于分析不同幅值的直流偏磁电流对铁心损耗的影响。

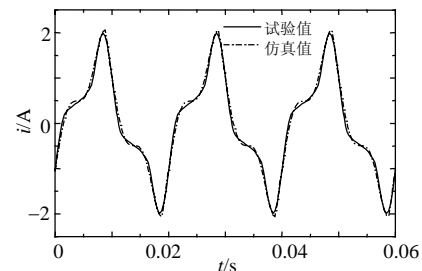


图 2 额定工作点电流波形比较

Fig. 2 Current compared at the rated voltage

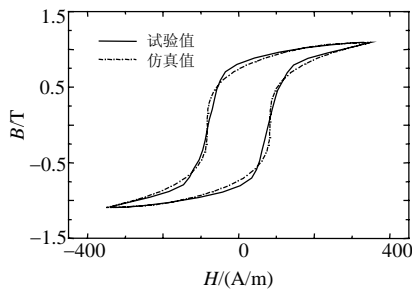


图3 额定工作点磁滞回线比较

Fig. 3 Hysteresis loop compared at the rated voltage

3 计算结果对比与分析

3.1 动态模型仿真值与试验结果的比较

根据额定工作点动态磁滞损耗模型各项参数,对10种不同幅值的直流偏磁电流对试验变压器铁心损耗的影响进行了仿真计算和对比分析。计算时间步长取每个周期200个点。需要说明的是,当考虑直流偏磁电流作用时,仿真分析所得电流波形和磁滞回线均存在一段时间的过渡过程。为了突出研究重点,本文仅给出了稳定后的仿真结果。

以计算得到的0.407 A和1.949 A直流偏磁电流作用下变压器铁心的典型励磁电流和磁滞回线为例,仿真值与试验值的对比情况分别如图4、5所示。

通过分析得到,当0.407 A直流电流作用时,动态磁滞损耗模型计算结果与试验值相比,电流峰值、电流有效值和磁滞回线面积的相对偏差分别为6.43%、3.26%和2.72%;当1.949 A直流电流作用时,动态磁滞损耗模型计算结果与试验值相比,电

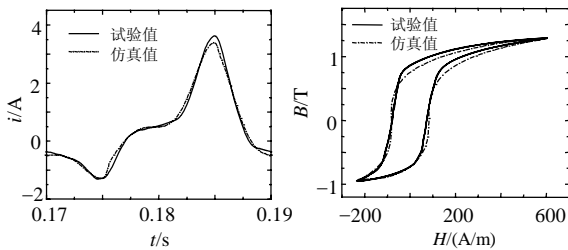


图4 $I_{dc}=0.407$ A时动态模型仿真值和试验值的对比

Fig. 4 Comparison of the simulated results using dynamic model with the experimental ones when $I_{dc}=0.407$ A

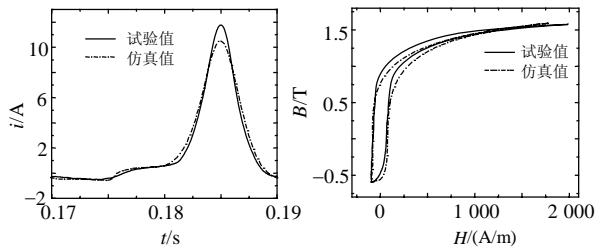


图5 $I_{dc}=1.949$ A时动态模型仿真值和试验值的对比

Fig. 5 Comparison of the simulated results using dynamic model with the experimental ones when $I_{dc}=1.949$ A

流峰值、电流有效值和磁滞回线面积的相对偏差分别为10.5%、2.36%和3.51%。

上述仿真结果和试验数据的对比表明,当利用动态磁滞损耗模型根据拟合得到的额定工作点参数对直流偏磁状态下变压器绕组电流有效值和铁心损耗进行分析时,能获得与试验值很接近的仿真计算结果,只是对电流峰值的分析要相对差一些。这些差异可能是由于试验结果中不可避免的含有一定的附加损耗以及模型理论的不完备和参数的偏差所致。

3.2 动态损耗分量的影响

为了更清晰的分析动态损耗分量的影响,利用遗传算法对不计涡流损耗和异常损耗的静态磁滞损耗模型进行参数提取,得到该模型在额定工作点的各项参数分别为 $M_s=1.444 \times 10^6$ A/m, $a=190.0$ A/m, $k_0=147.3$ A/m, $\alpha=4.263 \times 10^{-4}$, $c=0.5915$, $\sigma=5.330 \times 10^4$ 。不同幅值直流偏磁电流作用下的仿真计算结果与试验值的比较如图6、7所示。

同样通过分析得到,当0.407 A直流电流作用时,静态磁滞损耗模型计算结果与试验值相比,电流峰值、电流有效值和磁滞回线面积的相对偏差分别为13.9%、12.6%和18.8%;当1.949 A直流电流作用时,静态磁滞损耗模型计算结果与试验值相比,电流峰值、电流有效值和磁滞回线面积的相对偏差分别为20.3%、8.23%和35.4%。

此外,还利用提取得到的铁心额定工作点动态磁滞损耗模型参数对不同频率下的励磁电流和磁滞回线进行了分析,计算结果如图8、9所示。

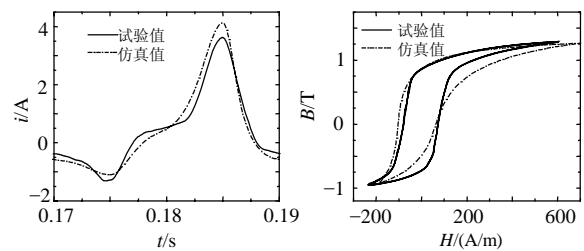


图6 $I_{dc}=0.407$ A时静态模型仿真值和试验值的对比

Fig. 6 Comparison of the simulated results using static model with the experimental ones when $I_{dc}=0.407$ A

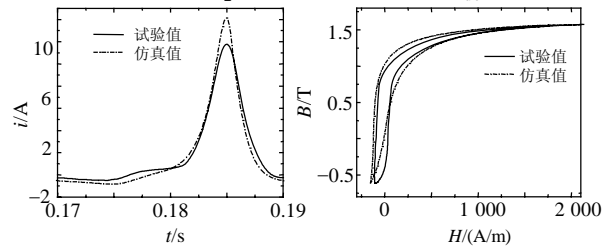


图7 $I_{dc}=1.949$ A时静态模型仿真值和试验值的对比

Fig. 7 Comparison of the simulated results using static model with the experimental ones when $I_{dc}=1.949$ A

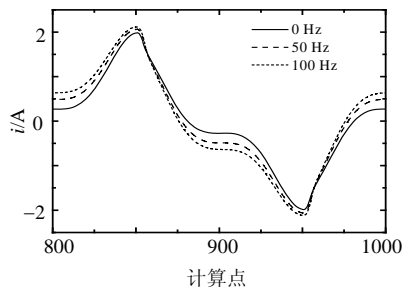


图 8 不同频率下的励磁电流对比

Fig. 8 Current compared at different frequencies

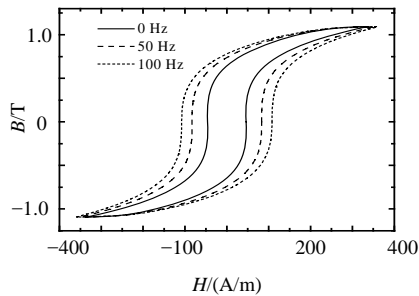


图 9 不同频率下的磁滞回线对比

Fig. 9 Hysteresis loop compared at different frequencies

上述仿真结果和对比分析表明, 不计涡流损耗和异常损耗的静态磁滞损耗模型仿真结果与试验值相比相差较大。利用静态磁滞损耗模型进行相关分析会带来较大偏差。同时, 从图 8、9 还可以看到, 随着频率的增加, 励磁电流幅值和铁心磁滞回线面积均明显增加。这些结果都充分说明了在开展变压器铁心损耗研究时考虑动态损耗分量的必要性。

4 结论

(1) 基于 Jiles-Atherton 模型, 考虑铁心涡流损耗和异常损耗, 推导建立了合理可逆系数条件下, 以磁通密度作为输入量的变压器铁心动态磁滞损耗模型。利用该模型对不同幅值直流偏磁电流作用下的变压器铁心损耗进行了模拟, 并将仿真结果与试验结果进行了对比, 二者符合较好, 验证了该模型的正确性和实用性。该模型的建立有助于从理论上对变压器铁心在直流偏磁状态下可能出现的过热问题进行正确的评估。

(2) 对比分析表明, 动态损耗分量对变压器铁心损耗影响较大, 在开展相关研究时, 应当对此加以充分考虑。

参考文献

[1] Tay H C, Swift G W. On the problem of transformer overheating due to geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(1): 212-219.
[2] 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.
[3] 王寿民. 电力变压器直流偏磁现象的实验研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2000.
Wang Shoumin. Experimental research on the DC bias phenomena of power transformers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2000(in Chinese).
[4] 姚缨英. 大型电力变压器直流偏磁现象的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2000.
Yao Yingying. Research on the dc bias phenomena of large power transformers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2000(in Chinese).
[5] 蒯狄正. 电网设备直流偏磁影响检测分析与抑制[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
Kuai Dizheng. Inspection, Analysis and restraining of dc transmission on power grid equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005(in Chinese).
[6] Liorzou F, Phelps B, Atherton D L. Macroscopic models of magnetization[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(2): 418-428.
[7] 刘硕. 磁场数值计算中材料模型问题的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2000.
Liu Shuo. Study of material modeling problems in the numerical computation of magnetic fields[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2000(in Chinese).
[8] Chandrasena W. Development of an improved low frequency transformer model for use in GIC studies[D]. Winnipeg: University of Manitoba, 2004.
[9] 李晓萍, 文习山, 陈慈萱. 单相变压器直流偏磁励磁电流仿真分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 8-10.
Li Xiaoping, Wen Xishan, Chen Cixuan. Simulating analysis of exciting current of single phase transformer on DC bias[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 8-10(in Chinese).
[10] 皇甫成, 阮江军, 张宇, 等. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 117-120.
Huang Fucheng, Ruan Jiangjun, Zhang Yu, et al. DC magnetic bias induced current effects on transformer and restricting methods [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 117-120(in Chinese).
[11] Jiles D C, Atherton D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986, 61(1-2): 48-60.
[12] Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 621-630.
[13] Graham C D. Physical origin of losses in conducting ferromagnetic materials (invited)[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(11): 8276-8280.
[14] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
[15] Chikazumi S. Physics of magnetism[M]. New York: Wiley, 1964.
[16] Fiorillo F, Novikov A. An improved approach to power losses in magnetic laminations under nonsinusoidal induction waveform[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(5): 2904-2910.
[17] Jiles D C. Frequency dependence of hysteresis curves in conducting magnetic materials[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 76(10):

- 5849-5855.
- [18] 项祖涛, 刘卫东, 钱家骊, 等. 磁环抑制 GIS 中特快速暂态过电压的模拟试验和仿真[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 101-105.
- Xiang Zutao, Liu Weidong, Qian Jiali, et al. Simulation test and computation of suppressing very fast transient overvoltage in GIS by magnetic rings[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 101-105(in Chinese).
- [19] Wilson P R, Ross J N, Brown A D. Optimizing the Jiles-Atherton model of hysteresis by a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(2): 989-993.
- [20] Leite J V, Avila S L, Batistela N J, et al. Real coded genetic algorithm for Jiles-Atherton model parameters identification[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 888-891.
- [21] 曹淑瑛, 王博文, 郑加驹, 等. 应用混合遗传算法的超磁致伸缩致动器磁滞模型的参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 127-132.
- Cao Shuying, Wang Bowen, Zheng Jiaju, et al. Parameter identification of hysteretic model for giant magnetostrictive actuator using hybrid genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 127-132(in Chinese).
- [22] Shuying C, Boweng W, Rongge Y, et al. Optimization of hysteresis parameters for the Jiles-Atherton model using a genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1157-1160.



曹林

收稿日期: 2007-12-09。

作者简介:

曹林(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统电磁兼容及电磁场数值计算, caolin@gmail.com;

何金良(1966—), 男, 教授, 研究方向为电磁环境技术、电介质材料及配电自动化;

张波(1976—), 男, 博士, 研究方向为电力系统电磁兼容及电磁场数值计算。

(责任编辑 王剑乔)