

PWM 波及直流偏磁励磁下磁芯损耗模型研究

叶建盈, 陈为, 汪晶慧

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建省 福州市 350108)

Research on the Core Loss Model Under PWM Wave and DC Bias Excitations

YE Jianying, CHEN Wei, WANG Jinghui

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian Province, China)

ABSTRACT: In order to evaluate and predict the core losses of magnetics in power converters, by equivalently replacing the dynamic B-H loop which surrounding area reflects the core losses in a magnetizing cycle period with an elliptical loop, the model of magnetics core losses under the PWM excitation without DC bias was derived. The core losses of magnetics under both DC bias and PWM excitations using a DC/AC inverter as the test circuit were measured by differential loss test idea. By the analysis of the core loss test results and their characteristics, a new core loss model considering the effects of both DC bias and PWM excitations was conceived based on the basic B-H curve. Finally, the test results were compared with the proposed model and the model accuracy was verified.

KEY WORDS: magnetics; core losses; model; high-frequency; DC bias

摘要: 为了有效地评估和预测功率变换器中磁元件的磁芯损耗, 将反映磁芯一个励磁周期内损耗的动态磁滞回线以椭圆回线等效, 推导出了无直流偏磁工况下脉宽调制(pulse width modulation, PWM)波形励磁的磁芯损耗模型。采用差值损耗测量思想, 以 DC/AC 逆变电路作为测试电路, 测量了直流偏磁及 PWM 波励磁下的磁芯损耗。进一步根据直流偏磁下磁芯损耗的测量结果及其特征的分析, 构思了以磁芯基本磁化曲线模型为基础的直流偏磁和 PWM 波励磁下的磁芯损耗模型。最后, 对比了测试数据和所提出的模型的计算结果, 验证了模型的正确性。

关键词: 磁元件; 磁芯损耗; 模型; 高频; 直流偏磁

0 引言

随着功率变换器向高频和高功率密度方向发展, 磁元件损耗成为制约其发展的关键因素之一。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51277032); 福建省自然科学基金项目(2012D092)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51277032); Project Supported by Fujian Provincial Natural Science Foundation of China (2012D092).

磁芯损耗的测量方法和其模型的建立一直是业界和学术界很关注的问题, 磁芯损耗测量是实验研究, 它为磁芯损耗模型的建立提供基础和验证, 模型的建立为磁芯损耗分析和磁元件设计提供理论基础。现有磁元件磁芯损耗的模型可以归纳为基于物理现象的磁芯损耗模型、基于实验数据拟合得到的经验模型以及基于磁场模拟的有限元仿真模型。

基于物理现象的磁芯损耗模型主要有 Jiles-Atherton 磁滞模型^[1-2]和 Preisach 磁滞模型^[3-4], 这两种磁滞损耗模型的精度比较高, 但由于其参数识别确认过程复杂, 且计算量相当大, 使得这类模型在实际应用中, 特别在高频和复杂波形励磁下的应用比较少。

基于实验数据拟合而获得的经验模型在工程应用和研究中较为普遍, 其中普遍被人们所采用的磁芯损耗模型是斯坦麦茨方程 SE^[5-6], 该模型是磁芯损耗模型中参数最少、形式最简单的模型, 但是该模型只能用于正弦波励磁情况下, 且参数随着频率和磁通密度的变化而变化, 使得该模型在实际设计应用中的精度受到影响。为此, 很多研究者在斯坦麦茨方程 SE 的基础上不断地改进, 而衍生出了 MSE、GSE、iGSE 以及 i²GSE 等修正模型^[7-10]。这些修正模型针对一定的应用场合, 在一定程度上不断改善了磁芯损耗评估的精度, 但它们都是在斯坦麦茨方程 SE 的基础上得到的, 其参数会受频率和磁通密度影响的问题仍然存在, 且这些模型精度的提高是以模型复杂化为代价的。

基于模拟磁场的有限元仿真模型, 是将现有的某些模型经过修改后应用于有限元仿真软件, 如常见的 Ansoft Maxwell 有限元仿真软件, 就是将斯坦麦茨方程 SE 和 Bertotti 提出的分成三部分的磁芯损耗模型经过等效, 修改成瞬态损耗模型后, 应用于

该软件中以计算磁元件的磁芯损耗^[11-14],这类模型的一个主要特点是通过计算每个有限元的瞬态磁芯损耗而获得总的磁芯损耗,因此对内部磁场分布不均匀的磁元件磁芯损耗的计算具有一定意义。但是该模型还是基于现有某些模型基础上演变而来的,只是考虑了磁芯中磁密分布的不均匀性,因此其应用场合和精度同样受限。

功率变换器中磁元件的励磁波形大多都是PWM波,不同电路拓扑和不同工况下波形的占空比、频率以及偏磁都存在区别,现有的模型无法满足这些励磁波形下磁元件建模的要求。因此,研究适用于实际复杂励磁波形工况下磁元件的磁芯损耗模型,对功率变换器磁元件磁芯损耗的评估非常有帮助^[15]。为此,本文将无直流偏磁和有直流偏磁工况下的PWM波作为磁元件励磁,建立适用于大多数功率变换器工况下的磁芯损耗模型。

本文通过将磁场强度分为可逆磁场强度和不可逆磁场强度,将动态磁滞回线的面积等效成一个椭圆回线的面积,从而找出等效磁场强度与磁通密度 B_m 和频率 f 的关系,进而推导出了基于椭圆回线面积等效法的无直流偏磁下PWM波励磁的磁芯损耗模型;分析了直流偏磁下磁芯损耗的变化趋势,提出了直流偏置下PWM波励磁的磁芯损耗模型。最后,通过磁芯损耗差值测量法,实验验证了无直流偏磁和直流偏磁下的磁芯损耗模型的准确性和有效性。

1 磁芯损耗模型的提出

1.1 无直流偏磁工况下PWM波的磁芯损耗模型

磁元件磁芯在工况下的动态磁滞回线(B - H 坐标系)的面积代表了一个周期内的单位体积磁芯损耗,但由于不同励磁工况下动态磁滞回线的形状不同,因此很难通过公式直接描述该动态磁滞回线的面积。为了简化其计算过程,将磁场强度分为可逆磁场强度和不可逆磁场强度两部分,则磁滞回线就相对应地分为可逆部分和不可逆部分。如图1所示,曲线1为动态磁滞回线,同时反映了磁芯磁化过程的磁场能量和能量损失;曲线2为可逆部分,仅体现了磁芯磁化过程的磁场能量;曲线3为不可逆部分的椭圆回线,仅体现了磁芯磁化过程的能量损失部分。将动态磁滞回线所包围的面积等效等于曲线3的面积,即将磁芯损耗 P_h 等效为椭圆回线的面积:

$$P_h = \pi f B_m H_m \quad (1)$$

由式(1)可得

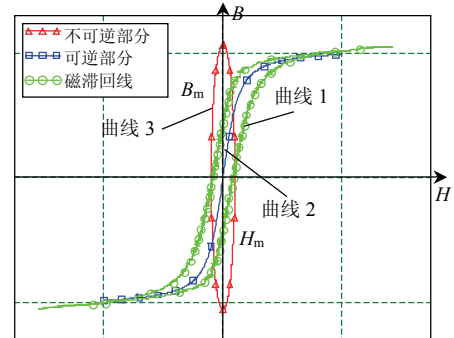


图1 磁滞回线与等效椭圆回线的关系

Fig. 1 Relation between equivalent elliptical loop and hysteresis loop

$$H_m = \frac{P_h}{\pi f B_m} \quad (2)$$

式中: f 为励磁频率; B_m 为交流磁通密度峰值; H_m 为该工况下的等效磁场强度幅值。

为了便于模型的推导,本文将椭圆回线面积等于实验测量得到的单位体积磁芯损耗 P_{cv} ,则根据式(2)可得到不同工况下等效磁场强度 H_m 与磁通密度 B_m 、频率 f 的关系,假设 H_m 与磁通密度 B_m 、频率 f 的函数关系为

$$H_m = g(B_m, f) \quad (3)$$

以TP4A(生产厂是浙江天通电子股份有限公司)环形铁氧体磁芯作为测量对象,绕组采用 $100 \times \Phi 0.1$ mm 厘兹线,对不同频率和不同磁通密度下占空比为0.5的PWM波励磁的磁芯损耗进行测量,并将实验数据按照上述过程处理,从而得到如图2所示的 H_m 与频率 f 、 B_m 的关系,且通过origin数据分析软件对处理后的数据进行拟合,可以得到:

$$H_m = (36.1777 + 3.9026 \times 10^{-5} f^{1.12}) B_m^{1.22} \quad (4)$$

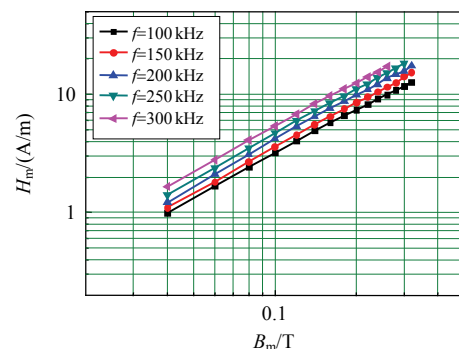


图2 等效磁场强度 H_m vs. 磁通密度 B_m

Fig. 2 Magnetic flux density B_m vs. equivalent magnetic field strength H_m

根据式(2)、(4)可得磁芯损耗:

$$P_{cv} = \pi (36.1777 f + 3.9026 \times 10^{-5} f^{2.12}) B_m^{2.22} \quad (5)$$

据此,可以推断铁氧体在占空比为0.5的PWM

波励磁下的磁芯损耗模型为

$$P_{cv_ac} = (k_1 f + k_2 f^\alpha) B_m^\beta \quad (6)$$

该模型有 4 个待定参数 k_1 、 k_2 、 α 、 β ，且交流磁通密度 B_m 的指数 β 可以从相同温度下的基本磁化曲线中提取，该模型相对斯坦麦茨模型 SE 来说多了一步 β 参数的提取过程，但是适合于宽频率范围的 PWM 波。另外，对于其余占空比的 PWM 波励磁工况下的磁芯损耗，可以将式(6)乘以一个占空比影响系数^[16]，从而得到无直流偏磁 PWM 波励磁下的磁芯损耗模型。

1.2 直流偏磁工况下 PWM 波的磁芯损耗模型

研究表明，直流偏磁对磁芯损耗的影响较大，文献[17]通过实验测量出不同直流偏磁工况下的磁芯损耗，在斯坦麦茨方程 SE 或修正斯坦麦茨方程 iGSE 模型的基础上采用多项式函数拟合出各个系数与直流偏磁 H_{dc} 的关系，这种基于斯坦麦茨方程的模型除了自身的不足，其系数也过于复杂。文献[18]中的模型是在无直流偏磁磁芯损耗模型的基础上乘以一个直流偏置影响系数，该系数与直流偏磁 B_{dc} 的关系为简单的幂函数关系，这在一定的有限直流偏磁范围内或许有一定的精度，但对于宽范围的直流偏磁，该模型则难以真实反映直流偏磁对磁芯损耗的影响，其精度有限。

磁芯材料的基本磁化曲线是体现磁芯材料的重要特性之一，描述了磁通密度 B 和磁场强度 H 的非线性关系，如图 3 所示， B - H 基本磁化曲线的模型可采用 origin 软件中的非线性函数 logistic 模型进行描述。而有直流偏磁的 PWM 波励磁的磁芯损耗，就是在直流偏磁 B_{dc} (或 H_{dc}) 上叠加一定交流磁通密度 B_m 励磁下的磁芯损耗。为此，本文测量了直流偏磁工况下不同频率的磁芯损耗，其中交流磁通密度 $B_m=0.1$ T，如图 4 所示。分析实验数据发现，磁芯损耗随着直流偏磁 H_{dc} 的变化趋势与基本磁化曲

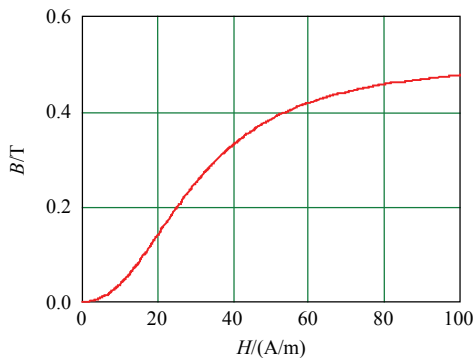


图 3 基本磁化曲线

Fig. 3 Basic magnetization curve of magnetic core

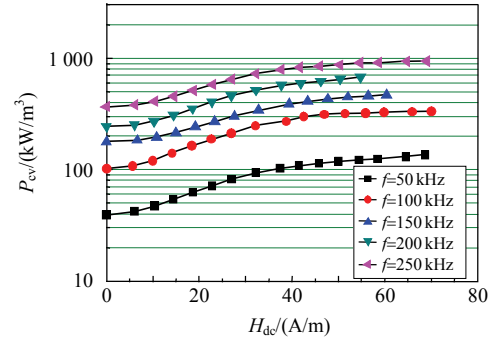


图 4 直流偏磁工况下不同频率的磁芯损耗

Fig. 4 Core losses at different frequency with dc bias 线的变化趋势有相似之处，且现有研究均表明磁芯损耗与磁通密度有紧密关系。

受此启发，本文假设直流偏磁工况下的磁芯损耗模型为

$$P_{cv_dc} = P_s + \frac{P_{cv_ac} - P_s}{1 + (H_{dc} / H_0)^\beta} \quad (7)$$

令 $k = P_s / P_{cv_ac}$ ，则有

$$P_{cv_dc} = P_{cv_ac} \frac{1 + k(H_{dc} / H_0)^\beta}{1 + (H_{dc} / H_0)^\beta} \quad (8)$$

式中： P_{cv_ac} 为无直流偏磁工况下的磁芯损耗； P_s 为随着直流偏磁增大磁芯损耗趋于恒定的损耗值； H_{dc} 为直流偏磁； H_0 、 β 为待定系数。

根据文献[17,19]的结论以及本文中图 4 所示的实验数据，可知直流偏磁和励磁频率对磁芯损耗的影响是相互独立的，故式(8)中的系数 k 和 H_0 是磁通密度 B_m 的函数，与频率无关。

以 TP4A 环形铁氧体磁芯作为测量对象，绕组采用 $100 \times \Phi 0.1$ mm 厘兹线，对频率 $f=50$ kHz，不同磁通密度 B_m 和不同直流偏磁下占空比为 0.5 的 PWM 波励磁的磁芯损耗进行测量，如图 5 所示。对实验数据进行分析 and 拟合可得

$$k = P_s / P_{cv_ac} = 0.2984 \times B_m^{-1.1675} \quad (9)$$

$$H_0 = 7.0903 \times B_m^{-0.7558} \quad (10)$$

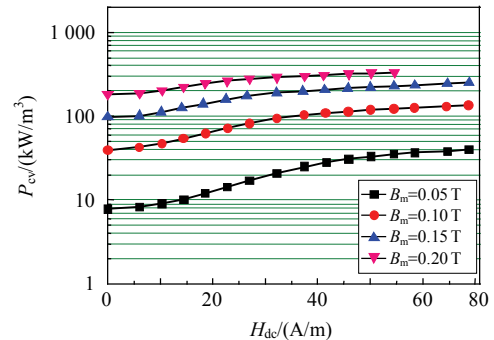


图 5 不同直流偏磁工况下，不同磁通密度 B_m 的磁芯损耗

Fig. 5 Core losses at different magnetic flux densities with different dc bias

综上所述,可以推断铁氧体在直流偏磁工况下的磁芯损耗模型为

$$P_{cv_dc} = P_{cv_ac} \frac{1 + \kappa_1 B_m^{-\delta_1} \left(\frac{H_{dc}}{\kappa_2 B_m^{-\delta_2}} \right)^\beta}{1 + \left(\frac{H_{dc}}{\kappa_2 B_m^{-\delta_2}} \right)^\beta} \quad (11)$$

式中: κ_1 、 δ_1 、 κ_2 、 δ_2 、 β 为待定系数, β 参数与无直流偏磁工况下磁芯损耗模型中 β 参数相同, 可以从基本磁化曲线模型中获得。因此, 直流偏磁工况下磁芯损耗需要待定的参数只有 4 个, 模型比较简单。

2 实验验证

2.1 基于差值法测量磁芯损耗的电路原理

本文以差值法思想测量在复杂励磁工况下的磁芯损耗, 作为验证磁芯损耗模型的依据。该方法的基本思想是: 测量测试电路在有被测磁芯和无被测磁芯情况下输入直流功率的增量以获得磁芯损耗, 因此不仅可以测量实际励磁波形的磁芯损耗, 而且可以避免现有常用磁芯损耗测量方法——交流功率计法^[20]在高频和被测磁芯损耗角很小的情况下而带来较大误差和直流功率计法^[21]受测试电路本身固有损耗的影响等问题。下文简单介绍差值法, 详细的分析与研究见文献[22]。

如图 6 所示, 以 DC/AC 全桥逆变电路作为产生各种实际 PWM 波的励磁源, 以空心电感 L_0 作为逆变电路的负载, L_1 为被测磁元件, 且 L_1 的阻抗远远大于 L_0 。首先, 测量逆变电路以空芯电感作为负载时的直流输入功率 P_{in1} ; 再将被测元件 L_1 接入电路(闭合开关 S), 测量这时(以空芯电感 L_0 和被测电感 L_1 为负载)的直流输入功率 P_{in2} ; 由于被测电感阻抗远远大于空芯电感的阻抗, 因此流过被测电感磁路的电流很小, 其绕组损耗和该部分电流在电路中引起的损耗均可以忽略不计, 则直流输入功率的增量 ΔP 即为磁芯损耗:

$$P_{core} = \Delta P = P_{in2} - P_{in1} \quad (12)$$

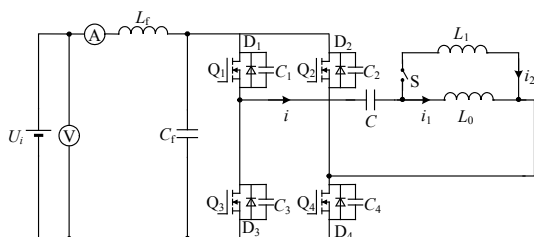


图 6 差值测量法测量磁芯损耗的测试电路

Fig. 6 Test circuit of core losses measurement at differential method

另外, 对于直流偏磁工况下磁芯损耗的测试原理如图 7 所示。图 7 中: I_{bias} 为直流源; L_2 、 L_3 为感值足够大的电感, 保证在高频下有足够大的阻抗以阻断测试电路与直流偏磁源的相互影响; 隔直电容 C 起到了阻隔由于逆变桥可能的控制不平衡所引起的直流分量的作用; 隔直电容 C_0 是为了阻隔直流源 I_{bias} 的部分电流流过空芯电感。

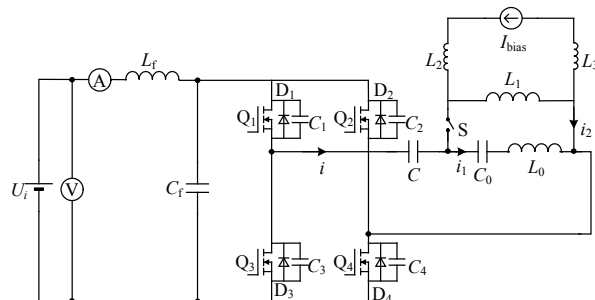


图 7 直流偏磁工况下磁芯损耗的测试电路

Fig. 7 Test circuit of core losses measurement at differential method with dc bias

2.2 磁芯损耗模型的验证

首先, 根据图 6 所示的测试电路, 采用差值测量法对无直流偏磁工况下占空比为 0.5 的 PWM 波励磁的磁芯损耗模型进行实验验证。电感 L_0 为空芯电感 ($L_0=25.0 \mu\text{H}@100 \text{ kHz}$), 被测磁元件 L_1 采用 PC47(生产厂为 TDK)铁氧体磁芯和 $100 \times \Phi 0.1 \text{ mm}$ 厘兹线绕组 ($L_1=300.0 \mu\text{H}@100 \text{ kHz}$)。通过测量 50、100、150、200、250、300 kHz 频率下不同交流磁通密度 B_m 的磁芯损耗, 并利用所提出的磁芯损耗模型(式(6))与实验测量结果进行对比验证, 如图 8 所示。图 8 中, 不同颜色实线为所提出模型的计算值, 不同颜色的点为实验测量值, 通过 origin 数据分析软件对两者进行拟合, 可以得到模型中的系数 $k_1=0.1075$, $k_2=6.424 \times 10^{-7}$, $\alpha=1.9834$, $\beta=2.28$, 且实验值和模型计算值的拟合准确合度为 0.9995。可见, 本文提出的模型可以准确地评估预测 PWM

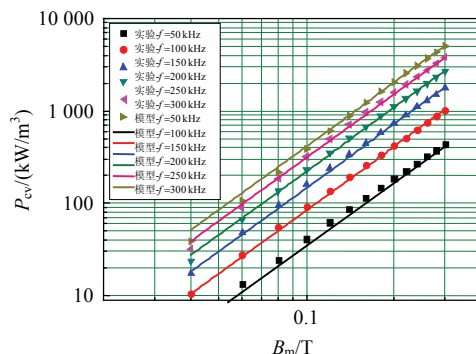
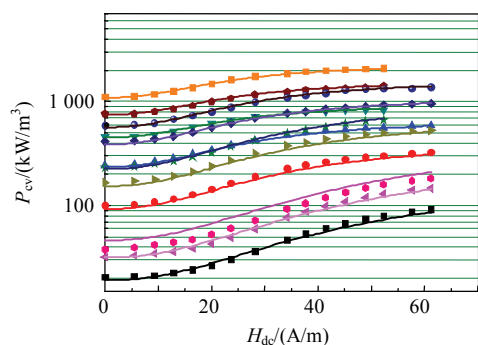


图 8 无直流偏磁工况下磁芯损耗实验与模型计算的比较

Fig. 8 Comparison between model calculation and measurement for core losses without dc bias

波励磁下的磁芯损耗。

其次,根据图 7 所示的测试电路,采用差值测量法对直流偏磁工况下占空比为 0.5 的 PWM 波励磁的磁芯损耗模型进行验证,空芯电感和被测磁元件与上文相同。通过测量频率分别为 100、150 和 200 kHz,交流磁通密度 B_m 分别为 0.05、0.1、0.15 和 0.2 T 励磁下的直流偏磁的磁芯损耗,并利用所提出的磁芯损耗模型(式(11))与实验测量结果进行对比验证,如图 9 所示。图 9 中,不同颜色实线为所提出模型的计算值,不同颜色的点为实验测量值,通过数据分析软件对两者进行拟合,可以得到模型中的系数为 $k_1=0.1075$, $k_2=6.4248 \times 10^{-7}$, $\alpha=1.9834$, $\beta=2.28$, $\kappa_1=0.37764$, $\delta_1=1.0669$, $\kappa_2=9.23623$, $\delta_2=0.67322$,且实验值和模型计算值的拟合准确度为 0.9981。可见,所提出的模型能够准确地评估预测直流偏磁下的磁芯损耗。



图中标识与图 8 相同。

图 9 直流偏磁工况下磁芯损耗实验与模型计算的比较

Fig. 9 Comparisons between model calculation and measurement for core losses with dc bias

3 结论

1) 将椭圆回线和动态磁滞回线进行等效,推导出等效磁场强度 H_m 与交流磁通密度 B_m 、频率 f 的函数关系,进而反推出无直流偏磁工况下 PWM 波励磁的磁芯损耗模型。

2) 通过分析直流偏磁对磁芯损耗的影响,以 B - H 基本磁化曲线模型为基础,提出了直流偏磁工况下 PWM 波励磁的磁芯损耗模型。

3) 通过差值法思想测量实际励磁工况下的 PC47 铁氧体磁芯损耗,将实验测量值和所提出的无直流偏磁、有直流偏磁工况下的磁芯损耗模型计算值进行对比验证,采用数据分析软件对实验值和模型计算值进行拟合,从而验证了提出的模型具有较好的精度,完全可以用于功率变换器在工程分析、设计和研究方面的磁芯损耗评估。

4) 所提出的模型形式简单,参数较少,而且适用于宽频率范围的 PWM 波励磁下的磁芯损耗计算评估,对功率变换器磁元件磁芯损耗的评估和预测具有一定价值。

参考文献

- [1] Jiles D C, Atherton D L. Theory of ferromagnetic hysteresis[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1986(61): 48-60.
- [2] 曹林,何金良,张波. 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[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 141-146.
Cao Lin, He Jinliang, Zhang Bo. Dynamic hysteresis loss model of power transformer under DC current biasing and its verification[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 141-146(in Chinese).
- [3] Mayergoyz I D, Frieman G. Generalized preisach model of hysteresis (invited)[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 1988, 24(1): 212-217.
- [4] Mayergoyz I D. Mathematical models of hysteresis [M]. New York: Springer, 1991: 1-201.
- [5] Steinmetz C P. On the law of hysteresis[J]. AIEE Transactions, 1892(9): 3-64.
- [6] Brittain J E. A Steinmetz contribution to the ac power revolution[J]. Proceedings of the IEEE, 1984, 72(2): 196-197.
- [7] Albach M, Durbaum T, Brockmeyer A. Calculating core losses in transformers for arbitrary magnetizing currents a comparison of different approaches[C]//Proceedings of IEEE PESC Conference. Baveno: IEEE, 1996: 1463-1468.
- [8] Li Jieli, Abdallah T, Sullivan C R. Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms[C]//Proceedings of IEEE Industry Applications Conference. Chicago, IL, USA: IEEE, 2001: 2203-2210.
- [9] Venkatachalani K, Sullivan C R, Abdallah T, et al. Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only Steinmetz parameters[C]//IEEE Workshop on Computers in Power Electronics. Mayagüez, USA: IEEE, 2002: 36-41.
- [10] Muhlethaler J, Biela J, Kolar J W, et al. Improved core-loss calculation for magnetic components employed in power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 964-973.
- [11] Lin D, Zhou P, Fu W N, et al. A dynamic core loss model for soft ferromagnetic and power ferrite materials in transient finite element analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 1318-1321.
- [12] 张艳丽,刘洋,谢德馨,等. 一种考虑硅钢片旋转损耗的三相变压器铁心损耗简化计算方法[J]. 中国电机工程

- 学报, 2013, 33(18): 126-131.
- Zhang Yanli, Liu Yang, Xie Dexin, et al. A simplified calculation method of core losses considering rotating losses of electrical steel sheets in three-phase transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 126-131(in Chinese).
- [13] 张艳丽, 李玉梅, 刘洋, 等. 考虑不同磁特性模型的感应电机铁心损耗分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 120-126.
- Zhang Yanli, Li Yumei, Liu Yang, et al. Analysis of core losses in induction motors considering different magnetic property models[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(27): 120-126(in Chinese).
- [14] 龚宇, 崔巍, 章跃进. 考虑局部磁滞损耗的复合电机铁损耗计算[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5396-5400.
- Gong Yu, Cui Wei, Zhang Yuejin. Iron loss calculation of compound motors considering minor hysteresis losses[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5396-5400(in Chinese).
- [15] 任小永, 姚凯, 旷建军, 等. 损耗最小化输出滤波电感的设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 84-88.
- Ren Xiaoyong, Yao Kai, Kuang Jianjun, et al. Design of output inductor for minimal power loss[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 84-88(in Chinese).
- [16] Chung H Y, Poon F N K, Liu C P, et al. Analysis of buck-boost converter inductor loss using a simple online B-H curve tracer[C]//Proceedings of IEEE APEC. New Orleans, LA: IEEE, 2000: 640-646.
- [17] Muhlethaler J, Biela J, Kolar J W, et al. Core losses under the dc bias condition based on steinmetz parameters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(2): 953-963.
- [18] Simão C, Sadowski N, Batistela N J, et al. Evaluation of hysteresis losses in iron sheets under DC-biased inductions[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(3): 1158-1161.
- [19] Niedermeier G, Esguerra M. Measurement of power losses with DC-bias—The displacement factor[C]//Proceedings of IEEE PCIM. Nürnberg, Germany: IEEE, 2000: 169-174.
- [20] Dong Tan F, Vollin J L, Cuk S M. A practical approach for magnetic core-loss characterization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10(2): 124-130.
- [21] 汪晶慧, 陈为. 超低损耗角磁心高频损耗测量方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 133-138.
- Wang Jinghui, Chen Wei. High frequency core loss measurement of low loss angle magnetic component [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 133-138(in Chinese).
- [22] Ye Jianying, Chen Wei, He Jiannong. A differential method of high-frequency magnetics core loss test scheme [C]//Proceedings of IEEE PEDG Conference. Galway, Ireland: IEEE, 2014: 1-5.



叶建盈

收稿日期: 2014-11-06。

作者简介:

叶建盈(1980), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电力电子功率变换、高频磁技术等, yjy-1028@163.com;

陈为(1958), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子功率变换、高频磁技术、电磁兼容技术、电器以及工程电磁场分析与应用等, chw@fzu.edu.cn;

汪晶慧(1975), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子功率变换、高频磁技术等, wjh@fzu.edu.cn。

(责任编辑 李婧妍)