

方波激励下纳米晶体铁心损耗模型建立与验证

王彦新¹, 迟青光²

(1. 吉林交通职业技术学院 轨道交通学院, 吉林 长春 130614;

2. 大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116300)

摘要: 为了实现电力机车小型化轻量化的发展要求, 国内外专家考虑通过采用提高变压器的工作频率减小变压器整体的体积和质量。铁心作为高频变压器的关键部件, 可以准确计算铁心损耗, 对中高端变压器的设计和优化具有重要作用。针对高频变压器铁心通常是工作在方波或脉宽调制(PWM)波等非正弦激励下的特点, 对传统 Steinmetz 损耗计算模型进行了优化改进, 给出了考虑磁密的变化率及波形系数对损耗的影响的 Steinmetz 改进损耗模型。同时, 为了提高损耗模型在不同特征频率下的通用性, 进一步对损耗模型系数的非线性进行研究, 给出了模型系数随频率变化的非线性函数。最后, 利用有限元计算结果同实物测量结果进行比较, 证明了所提损耗模型在方波激励下对纳米晶体铁心计算的准确性。

关键词: 电力机车; 铁耗; 高频变压器; 方波激励; 纳米晶体

中图分类号: TM 301.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)04-0094-05

doi: 10.12177/emca.2020.226

Establishment and Verification of Core Loss Model of Nanocrystalline Under Square Wave Excitation

WANG Yanxin¹, CHI Qingguang²

(1. School of Rail Transportation, Jilin Communications Polytechnic, Changchun 130614, China;

2. College of Electrical Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116300, China)

Abstract: In order to realize the development requirements of miniaturization and lightweight of electric locomotives, the overall volume and weight of transformer are reduced by increasing the working frequency of transformer. As the key component of high-frequency transformer, the iron core can accurately calculate the core loss, which plays an important role in the design and optimization of medium and high-frequency transformer. Aiming at the characteristics of high-frequency transformer cores that usually work under non-sinusoidal excitation such as square wave or pulse width modulation (PWM) wave, the traditional Steinmetz loss calculation model is optimized and improved. The Steinmetz improved loss model considering the change rate of magnetic density and the influence of waveform coefficient on the loss is given. At the same time, in order to improve the generality of the loss model at different characteristic frequencies, the nonlinearity of the loss model coefficients is further studied, and the nonlinear relation function between the model coefficients and the frequency is given. Finally, the finite element calculation results are compared with the physical measurement results, which proves the accuracy of the loss model for the calculation of nanocrystalline core under square wave excitation.

Key words: electric locomotive; Fe core loss; high-frequency transformer; square wave excitation; nanocrystalline

收稿日期: 2020-11-13; 收到修改稿日期: 2021-01-25

作者简介: 王彦新(1978—), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为交通信息工程及控制。

迟青光(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电工材料电磁特性分析。(通信作者)

0 引言

近年来,电力机车朝着小型化、轻量化、高效率的方向发展^[1]。为了降低电力机车中电气元件的体积和质量,中高频变压器逐步应用和推广。铁心作为中高频变压器的关键部件之一,其性能的好坏直接影响变压器的性能。目前,包括铁氧体、非晶和纳米晶合金在内的软磁材料被广泛应用于中高频变压器铁心材料中。区别于工频变压器,高频变压器通常工作在 DC-DC 电路中,其激励电压通常为方波、脉宽调制(PWM)波等非正弦激励。因此,准确计算非正弦激励下铁心材料的磁性能对中高频变压器优化设计起到至关重要的作用。

铁心损耗特性是评价变压器运行效率好坏的重要依据。现有计算铁心损耗的方法大致可以概括为 3 种:(1)损耗分离法,比较有代表性的是 Bertotti 损耗三项式模型^[2-4],铁心损耗看作是磁滞损耗,涡流损耗和异常损耗三者之和;(2)磁滞模型法,如 Preisach 模型, Jiles-Atherton (J-A) 模型^[3];(3)基于斯坦梅兹方程的经验公式^[4]。其中,斯坦梅兹经验公式由于结构相对简单、便于计算、准确度高,是目前较为常用的损耗计算公式之一。由于斯坦梅兹公式是基于正弦波激励推导拟合的损耗计算公式,若要将其应用于非正弦激励,则须对其进行相应的改进。为此,国内外学者对斯坦梅兹经验公式进行了改进。考虑到铁心的损耗除了与磁密的幅值 B_m 有关以外,还与磁密的变化率有关(dB/dt),文献[5-6]提出了斯坦梅兹修正公式。之后,国外学者认为损耗不但与磁密的变化率有关,还与磁化周期内磁密的瞬时值 $B(t)$ 有关,从而提出了广义的斯坦梅兹公式^[4]。考虑到磁化的过程除了与磁化周期的变化率有关还与磁化的历史有关,不同的磁化过程的反转点会使一个磁化周期内磁滞回线的形状有很大区别,文献[7]提出了广义斯坦梅兹改进公式。中高频变压器在非正弦激励下铁心损耗的大小与其磁化过程中的诸多因素有关。各种修正公式重点考虑了非正弦激励下磁感应强度变化率(dB/dt)、磁感应强度瞬时值 $B(t)$ 和磁化历史 ΔB 这 3 种影响因素中的 1~2 个因素对铁心损耗所带来的影响^[8]。上述公式虽然相比于传统的斯坦梅兹公式提高了计算精度,但是并没有考虑在不同的激励频率下

修正公式的通用性问题。

作为一种新型的高频变压器铁心材料,纳米晶损耗模型的研究已引起研究人员的关注。本文通过分析现有模型的误差,引入磁通波形系数(F_{wc})代替广义 Steinmetz 模型中的瞬时值 $B(t)$ 。同时,为了提高不同特征频率下损耗计算模型的通用性,对损耗模型系数的非线性展开研究。给出了损耗模型系数随频率变化的函数表达式,从而提高了损耗模型的计算精度。最后,通过试验验证了损耗模型的计算精度及工程实用性。

1 方波激励下损耗模型的优化改进

1.1 测量系统的硬件组成

为了获取纳米晶体铁心损耗特性,搭建铁心损耗测量系统。图 1 为测试系统和测量样片的实物图。考虑到中频变压器实际工作时的特性,加载的激励信号为方波信号,加载信号如图 2 所示。

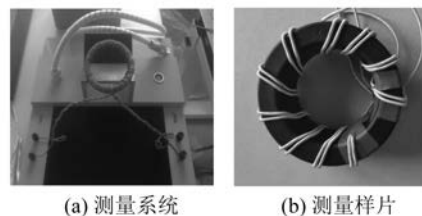


图 1 中频铁心磁特性测量装置与测试试样实物图

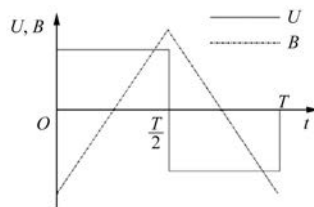


图 2 方波激励下电压和磁密的波形

通过上述测量装置,测量实际状态下的 $B-H$ 回环,从而估算实际状态下铁心损耗。同时,绕组的铜耗被忽略。其测量原理为:首先在铁心上绕制两组线圈,通过在一次线圈加载方波激励信号,然后通过对二次线圈电压 U 进行积分,可以获得铁心的感应磁密 B :

$$B(t) = \frac{1}{N_2 A_e} \int U(t) dt \quad (1)$$

式中: N_2 为二次绕组的匝数; A_e 为铁心的有效截面积。

通过安培环路定律可知,加载在一次绕组的电流和磁场强度 H 成比例关系,因此可以计算磁场强度 H 为

$$H(t) = \frac{N_1 i(t)}{l_e} \quad (2)$$

式中: N_1 为一次绕组的匝数; l_e 为铁心环路有效磁路长度。

因此,单位体积下铁心损耗可以通过对 B - H 回环的面积进行积分并乘以频率 f :

$$P = \frac{f}{\rho_v} \int_T H(t) \frac{dB(t)}{dt} dt \quad (3)$$

式中: P 为单位体积铁心材料的损耗; f 为激励电压的频率; ρ_v 为铁心的密度; T 为激励周期。

1.2 损耗模型的优化改进

纳米晶体铁心作为中高频变压器的铁心材料,通常工作在方波激励和 PWM 激励下。研究发现,铁心损耗的大小与一个磁化周期内的磁密 $B(t)$ 变化有关。因此,定义磁密在一个周期内的平均变化率^[9]为

$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{\Delta B} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (4)$$

式中: ΔB 为磁密在一个磁化周期内的峰峰值。

在此基础上,利用归一化常数 $2/(\Delta B^2 \pi^2)$ 进一步定义了一个等效频率 f_{eq} 的概念,可推导出:

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \pi^2} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (5)$$

基于 Steinmetz 经验模型,给出了在一个磁化周期内单位铁心损耗的计算模型:

$$P = F_{wc} (K f_{eq}^{\alpha-1} B^\beta) f \quad (6)$$

式中: F_{wc} 为方波激励的波形系数。

波形系数定义为一个磁化周期内非正弦激励波形和正弦激励波形的比。无论是正弦波信号还是方波信号,其磁密的峰值信号相同。对于正弦波信号,磁密的平均值为

$$B_{avg} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} B_m \sin(\omega t) dt = \frac{2B_m}{\pi} \quad (7)$$

平均磁密与磁密的峰值占比为

$$W_{sin} = \frac{B_{avg}}{B_m} = \frac{2}{\pi} \quad (8)$$

对于方波信号,磁密的平均值为

$$B_{avg} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{2B_m}{T} t dt = \frac{1}{2} \quad (9)$$

平均磁密与磁密的峰值占比为

$$W_{sq} = \frac{B_{avg}}{B_m} = \frac{2}{\pi} \quad (10)$$

因此,方波与正弦波比值的波形系数为

$$F_{wc} = \frac{W_{sq}}{W_{sin}} = \frac{\pi}{4} \quad (11)$$

则改进的损耗计算模型式(6)可以写成:

$$P = F_{wc} K \left(\frac{8}{\pi} \right) f^\alpha B^\beta \quad (12)$$

式中: K 、 α 、 β 为改进损耗计算模型的系数,通过对测量数据进行拟合可以获取。

搭建测量系统,测试不同频率下的 B - H 如图3所示。可以看出,在不同频率下,磁滞回环的面积不同,导致在不同频率下损耗也不尽相同。为了提高损耗计算模型在不同特征频率下的通用性,对损耗模型系数 K 、 α 和 β 在不同特征频率下的非线性展开研究。

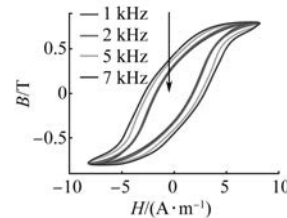


图3 纳米晶体铁心方波激励下的磁滞回线

表1给出了不同特性频率下的损耗计算模型式(12)系数的变化规律。

表1 不同频率下拟合的系数

f/kHz	α	β	K
1	-0.121 60	3.046	10.82
2	0.012 49	3.666	10.32
3	0.046 16	3.099	10.83
4	0.094 85	3.195	10.86
5	0.129 70	3.139	10.64
6	0.147 20	2.952	10.84
7	0.184 20	3.102	10.02

从表1可以看出,随着频率的变化,损耗系数 α 也随频率的增加而增加。但是系数 β 和 K 随频率的变化不明显。因此,对系数 α 的非线性展开研究。给出了 α 随着频率变化的函数:

$$\alpha(f) = A f^b + C \quad (13)$$

通过表 1 的数据可以计算出 α 为

$$\alpha(f) = -1.469f^{0.1166} + 1.347 \quad (14)$$

将式(14)代入式(12),可得损耗随频率变化的非线性计算模型:

$$P = F_{wc} K \left(\frac{8}{\pi} \right)^{\alpha(f)-1} f^{\alpha(f)} B^{\beta} \quad (15)$$

式中:系数 K 取值为 10.656; β 取值为 3.146。

2 损耗模型的验证

2.1 铁心样品损耗测量验证

为了验证损耗预测模型的准确性,通过试验设备测量方波激励下,在不同频率下的损耗值。比较传统的损耗计算模型与改进的损耗计算模型,结果如图 4 所示。可以看出,与传统的损耗计算模型相比,改进的损耗模型在不同的特征频率下同测量结果的拟合度更高,计算精度更高。

2.2 变压器铁心损耗计算

为了验证损耗计算模型对变压器铁心损耗计算的精度,完成一个中频变压器的设计,并以该设计方案参数为依据,通过有限元分析和实物模型测量进行比较,验证损耗计算式(15)的准确性。

通过电磁计算,可以获取中频变压器的电磁参数。变压器容量为 11 kVA,额定工作频率为 6 kHz,匝数比为 10/4,额定电压为 110 V/44 V,铁心选用非晶合金方形铁心。铁心窗高为 70 mm,轴距为 135 mm,方形铁心叠片厚度为 16 mm,铁心宽度为 40 mm。在铁心的一个柱上分别由内而外绕组二次侧绕组和一次侧绕组。

然后通过 COMSOL 软件建立了变压器空载运行时的仿真模型。仿真模型及其剖分图如图 5 所示。

建模的变压器铁心材料为纳米晶体铁心。通过上述测试可以得出,铁心材料的磁导率 μ 与磁场强度之间呈现非线性的关系。因此,为了获取更精确的仿真结果,对所建模型赋予测量获取的非线性相对磁导率数据。

图 6 给出了加载频率为 6 kHz,电压为 110 V 时,变压器空载运行 $T/4$ 时刻磁密的分布图。铁心的平均工作磁密约为 0.75 T。通过 MATLAB 软件编程读取磁通密度仿真结果,在基于前文提出的损耗计算模型式(15)基础上,得到额定功率下铁心的损耗计算结果 13.57 W。

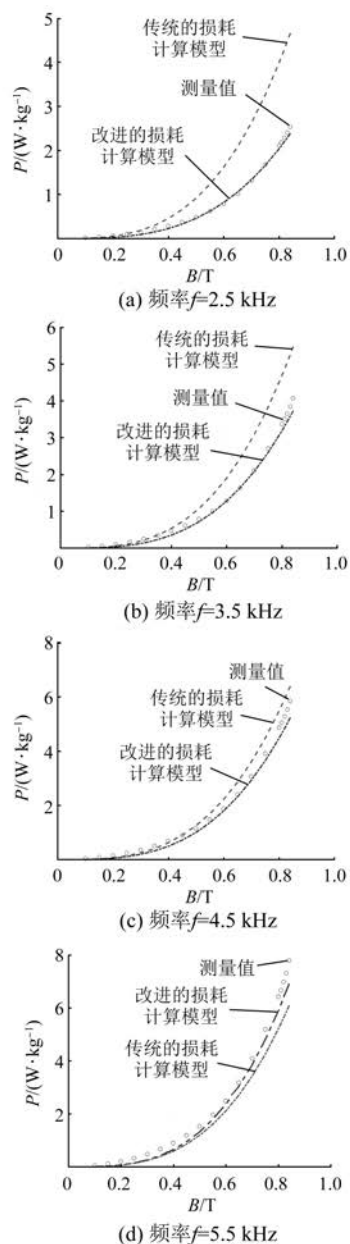


图 4 纳米晶体铁心损耗模型验证

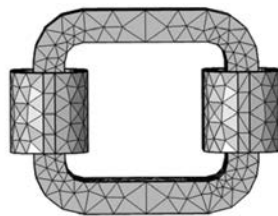


图 5 中频变压器有限元剖分图

2.3 实物样机验证

在对变压器铁心实物损耗特性进行测量时,



图6 中频变压器铁心磁密分布图

需要搭载变压器空载运行测试平台,试验现场如图7所示。在进行性能测试时,通过调节加载于一次侧绕组的电压改变变压器铁心磁密,从而获取变压器铁心的磁特性数据。加载于变压器一次侧绕组中激励电压的大小及对应的磁密与有限元分析时条件相同。对中频变压器样品铁心的损耗特性进行测量。



图7 变压器空载测量实物图

图8给出了所设计的中频变压器空载运行时一次侧绕组中电压和电流的波形图。通过功率测试仪分别对不同激励电压下的损耗值进行测量,测量结果为14.26 W。

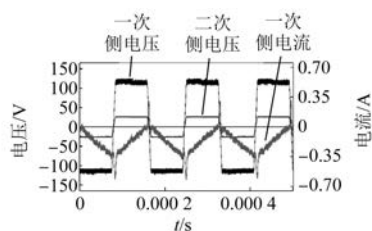


图8 空载损耗试验时一次侧电压电流波形

通过计算值和测量值比较可以看出,改进的损耗计算模型,在实际应用中能较好地估算中频变压器实际工况下的铁心损耗值,计算误差小于5%,满足工程设计要求。

3 结 语

本文首先对方波激励下纳米晶体损耗特性进行测量,通过测量数据分析得出,在不同的特征频

率下,纳米晶体铁心存在不同的损耗特性。考虑到正弦波激励和方波激励下铁心材料损耗特性的不同,对传统的损耗计算模型进行改进,给出了方波激励下考虑频率变化的变系数非线性损耗计算模型。通过测量曲线与预测曲线的比较及实物模型验证,可以得出所提铁耗模型能够准确地预测铁心材料在方波激励下的铁耗特性。

【参考文献】

- [1] 李伟,张黎. 铁道牵引单相电力电子变压器及控制[J]. 铁道学报, 2013, 35(4): 37.
- [2] KRINGS A, SOULARD J. Overview and comparison of iron loss models for electrical machines[J]. Journal of Electrical Engineering, 2010, 10(3): 162.
- [3] HUI S Y R, ZHU J. Magnetic hysteresis modeling and simulation using the Preisach theory and TLM technique [C] // Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference-PESC'94, 1994.
- [4] LANCAROTTE M S, PENTEADO A D A. Estimation of core losses under sinusoidal or nonsinusoidal induction by analysis of magnetization rate[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(2): 174.
- [5] BARG S, AMMOUS K, MEJBRI H, et al. An improved empirical formulation for magnetic core losses estimation under nonsinusoidal induction[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(3): 2146.
- [6] LI J, ABDALLAH T, SULLIVAN C R. Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms [J]. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No. 01CH37248), 2001.
- [7] VENKATACHAAM K, SULLIVAN C R, ABDALLAH T, et al. Accurate prediction of ferrite core loss with nonsinusoidal waveforms using only steinmetz parameters[C]//2002 IEEE Workshop on Computers in Power Electronics, 2002.
- [8] 律方成,郭云翔. 非正弦激励下中频变压器铁损计算方法对比分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 808.
- [9] BROCKMEYER A, SCHULTING L. Modeling of dynamic losses in magnetic material[C]//1993 Fifth European Conference on Power Electronics and Applications, 1993.