

功率变换器磁性元件PWM波励磁磁心损耗建模研究

杨磊^{1,2}, 黄玉平^{1,2}, 郭希贤³, 陈庆彬³

(1. 北京精密机电控制设备研究所, 北京, 100076; 2. 控制执行机构技术创新中心, 北京, 100076;

3. 福州大学电气工程与自动化学院, 福州, 350108)

摘要: 高精度的磁心损耗模型是伺服电源功率变换器损耗评估和效率优化的重要基础。针对修正的 Steinmetz 模型 (Modified Steinmetz Equation, MSE) 评估 PWM 波励磁磁心损耗误差较大的问题, 提出了基于直流功率法的 PWM 波励磁磁心损耗建模方法。该方法以直流功率法获得的 PWM 波励磁磁心损耗测量结果直接建立损耗模型, 避免了 MSE 模型在波形等效变换环节引入的误差, 具有更好的模型精度。结果表明, 在不同激励波形、不同频率、不同占空比、不同交流磁通密度峰值和不同温度下所提出模型损耗评估的最大相对误差为 -5.029%, 相对误差绝对值的平均值仅 1.72%, 远低于 MSE 的模型误差 (最大相对误差: 87.663%, 相对误差绝对值的平均值: 38.04%), 验证了 PWM 波励磁磁心损耗模型在宽范围工况下的准确性, 为功率变换器磁性元件 PWM 波励磁损耗评估提供了高精度的计算模型。

关键词: 伺服电源; 磁性元件; 磁心损耗模型; 直流功率法; PWM 波励磁

中图分类号: TM46; V19

文献标识码: A

Study on Modeling of Core Loss in Magnetic Components for Power Converters Under PWM Excitation

YANG Lei^{1,2}, HUANG Yuping^{1,2}, GUO Xixian³, CHEN Qingbin³

(1. Beijing Institute of Precise Mechatronics and Controls, Beijing, 100076; 2. Innovation Center for Control Actuators, Beijing, 100076; 3. Electrical Engineering and Automation Department, Fuzhou University, Fuzhou, 350108)

Abstract: High-accuracy core loss models are an essential foundation for loss evaluation and efficiency optimization in servo power converters. A PWM excitation core loss model is proposed based on the DC power method to address the issue of large errors in core loss evaluation under PWM excitation using the Modified Steinmetz Equation (MSE) in traditional methods. This method directly establishes a loss model based on the measurement results of magnetic core loss under PWM excitation obtained by the DC power method, which can avoid the errors introduced by the MSE model in the waveform equivalent transformation stage and has better model accuracy. The experimental results show that the maximum relative error of the proposed model for loss evaluation under different excitation waveforms, frequencies, duty cycles, peak AC magnetic flux densities, and temperatures is -5.029%. The average absolute value of the relative error is only 1.72%, much lower than the model error of MSE (maximum relative error: 87.663%, average absolute value of relative error: 38.04%). It verifies the accuracy of the PWM excitation core loss model proposed under a wide range of operating conditions and can provide a high-precision calculation model for loss evaluation of power converter magnetic components under PWM excitation.

Keywords: servo power supply; magnetic component; core loss estimation model; DC power method; PWM excitation

0 引言

高转换效率、高功率密度、高可靠性的电源技术研究已经成为了功率变换器在航天伺服领域应用中十分重要的发展方向^[1-2]。磁性元件是伺服电源的重要组成部分, 高精度的磁件损耗评估是开展高性能功率变换器研制的基础。对于伺服电源功率变换器而言,

磁心损耗不仅直接影响系统的整体效率和温升, 更关系到其输出精度、响应速度和可靠运行。

磁件损耗^[3-5]通常可以分为绕组损耗和磁心损耗两部分。其中绕组损耗为线性损耗, 对流经绕组的电流进行傅里叶分解, 并将各次谐波下绕组损耗相加, 可获得总绕组损耗。而磁心损耗为非线性损耗, 其损

耗可通过试验测量直接获取,但工程应用中磁心工作工况繁杂多样,仅依靠测量得到的损耗数据点数量十分有限。因此,在精准测量磁心损耗的基础上,构建覆盖宽范围工况的非线性磁心损耗模型具有关键意义。

针对磁性元件磁心损耗的测量,目前国内外专家学者、工业界大多使用交流功率法^[6-8]测量正弦波激励下的磁心损耗。同时使用Steinmetz^[9-10]方程进行磁心损耗的建模。然而功率变换器中的磁性元件通常处于PWM波激励下,这使得现有磁心损耗模型的预测结果与实际工况下的磁心损耗误差较大,并且使用交流功率法在磁心元件阻抗角接近90°时和高温工况时会带来较大的测量误差。

为建立功率变换器磁性元件实际激励波形下的高精度磁心损耗预估模型^[11-12],本文采用直流功率法测量不同激励电压波形(对称/不对称PWM波)、不同占空比、不同交流磁通密度峰值、不同温度下的磁心损耗,并且对其进行数学分析,从而获得可以表征功率变换器磁性元件实际激励波形下磁心损耗特性的磁心损耗模型,为功率变换器磁性元件的设计和 optimization 提供基础。

1 基于MSE公式的PWM波激励下磁心损耗模型

交流功率法是目前被广泛采用的电气测量方法,通过直接测量施加在磁性元件上的电压和电流得到磁心损耗,如图1所示。被测磁心采用双绕组绕制,数字示波器记录磁心上磁通感应的电压瞬时值 $u(t)$ 和绕组励磁电流瞬时值 $i(t)$,通过式(1)可计算磁心损耗。

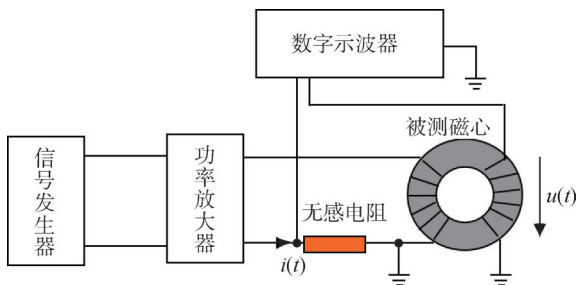


图1 交流功率计法测试原理

Fig.1 Test principle diagram of AC power meter method

$$P_v = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \frac{N_1}{N_2} \cdot u(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

式中 P_v 为磁心损耗密度; N_1 为励磁绕组匝数; N_2 为

感应绕组匝数; T_s 为一个周期时间。

经过理论分析与推导可知交流功率法测量磁心损耗的相对误差最大值 δ 如式(2)所示:

$$\delta = \left| \frac{\Delta P}{P} \right| = \left| \frac{\Delta U}{U} \right| + \left| \frac{\Delta I}{I} \right| + |\tan \varphi \cdot \Delta \varphi| \quad (2)$$

由式(2)等式右边的第3部分可知,当阻抗角 φ 趋向90°时,其正切值趋向无穷大,此时会产生非常大的测量误差。当相位误差 $\Delta\varphi$ 分别为0.02°、0.2°和2°时,不同阻抗角所引起的损耗误差百分比如图2所示。

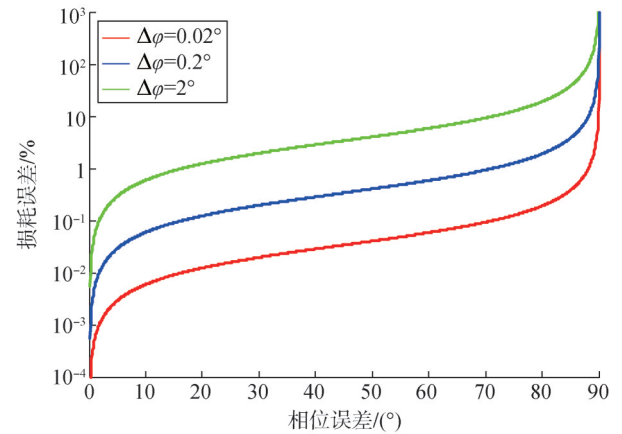


图2 不同阻抗角下相位误差引起的损耗误差百分比

Fig.2 Power loss error percentage caused by phase error at different impedance angles

交流功率法在测量阻抗角接近90°的磁性元件的磁心损耗时,测量误差很大,同时交流功率法只适用于正弦波激励下的磁心损耗的测量,无法用于PWM波激励下的磁心损耗测量。

为了便于预测磁心损耗,相关研究人员在交流功率法测量磁心损耗的基础上提出了相应的磁心损耗模型并不断对其进行优化。最早且最为人知的磁心损耗模型是Steinmetz模型(Steinmetz Equation, SE)^[13],该模型如式(3)所示,只有三个待定参数需求解,但该模型只适用于计算正弦波激励时的磁心损耗,当激励波形为PWM波或其他波形时误差会变得很大。

$$P_v = k \cdot f^\alpha \cdot B_m^\beta \quad (3)$$

式中 f 为频率; B_m 为交流磁通密度峰值; k , α 和 β 为待定参数。

考虑到温度对磁心损耗的影响,此时的磁心损耗模型在SE模型的基础上乘以一个与温度相关的开口向上二次函数^[14],如式(4)所示。

$$P_v(\tau) = k \cdot f^\alpha \cdot B_m^\beta \cdot (ct_2 \cdot \tau^2 - ct_1 \cdot \tau + ct) \quad (4)$$

式中 τ 为温度, 该模型新增三个待定参数 ct , ct_1 , ct_2 。

为解决 SE 只适用于正弦激励这一问题, 文献 [15] 认为磁心损耗与磁通密度变化率有关。宏观层面可认为, 磁心损耗密度与磁心材料的重复磁化率 dM/dt 有直接关系。因此, 将式 (4) 中的频率 f 用参数 dM/dt 来表示, 即可获得磁心损耗密度与磁心的重复磁化率的关系。同时由于 dM/dt 与磁感应强度变化率 dB/dt 是对应的, 因此可以建立磁心损耗密度与磁通变化率的关系。

为了表征一个周期下的 dB/dt 特性, 引入 dB/dt 在一个磁化周期内的平均值 B_{av} , 即:

$$B_{av} = \frac{1}{\Delta B} \oint \frac{dB}{dt} dB \quad (5)$$

其中, $\Delta B = B_{max} - B_{min}$ 。对上式进行转化, 得:

$$B_{av} = \frac{1}{\Delta B} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (6)$$

当激励波形采用正弦波时, B_{av_sin} 为

$$B_{av_sin} = (B_{max} - B_{min}) \cdot \frac{\pi^2}{2} \cdot f \quad (7)$$

当激励波形为 PWM 波等非正弦波时, 其平均磁通密度变化率为 B_{av_nsin} 。若非正弦波激励下的磁心损耗对应一个正弦波下的磁心损耗, 那么这两个波形就应该具有相同的 B_{av} 。在非正弦波激励下的 B_{av_nsin} 已知的前提下, 就可以计算等效正弦波激励时的频率, 即:

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B \cdot \pi^2} B_{av_nsin} \quad (8)$$

式中 ΔB 为磁通密度峰值。

根据 Steinmetz 公式可以得到一个磁化周期内的损耗能量为

$$W_v = C_m \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot B_m^\beta \quad (9)$$

其中, $B_m = \Delta B/2$ 。当磁化频率为 f 时, 单位体积的磁心损耗为

$$P_v = (C_m \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot B_m^\beta) \cdot f \quad (10)$$

由式 (5) 和式 (10) 可知, 激励波形对磁心损耗的影响主要表现在不同激励波形下, 等效重复磁化频率的差异性。因此, 计算 f_{eq} 要先明确激励波形。

采用修正的 Steinmetz 模型 (Modified Steinmetz Equation, MSE) 计算 PWM 波励磁下的磁心损耗, 还需考虑温度对磁心损耗影响, 这时的 MSE 模型如式 (11) 所示。

$$P_v = (k \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot B_m^\beta) \cdot f \cdot (ct_2 \cdot \tau^2 - ct_1 \cdot \tau + ct) \quad (11)$$

然而使用 MSE 模型计算 PWM 波激励下的磁心损耗是通过正弦波激励下的磁心损耗数据, 结合 PWM 波激励的工况获取等效频率, 从而间接获得 PWM 波

激励下的损耗, 在波形的变换过程中会带来相应的误差。

2 基于直流功率法的 PWM 波激励磁心损耗建模

针对传统交流功率测量法和 MSE 模型所存在的不足, 本文提出采用直流功率测量法来进行磁性元件磁心损耗测量, 并且使用测量获得的数据对本文提出的 PWM 波激励下的损耗模型进行非线性拟合, 从而直接获取 PWM 波激励下的磁心损耗。

直流功率测量法的电路原理如图 3 所示, 将通过 DC/AC 电路产生交流电压施加在被测磁性元件上, 该交流电压为占空比可变的 PWM 波。

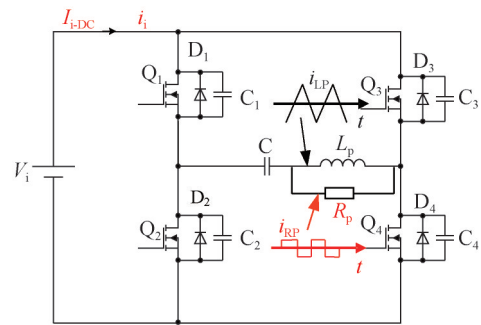


图3 直流功率法测量原理

Fig.3 Test principle diagram of DC power method

图 3 中的磁性元件采用并联模型 (其中 L_p 表示被测磁件的电感, R_p 表示被测磁件磁心损耗电阻), 相比串联模型更能体现出磁心损耗与所施加的电压激励呈直接关系。图 3 中 C 为隔直电容, 电感上的电流则为三角波 i_{Lp} , R_p 上的电流为 PWM 波电流 i_{Rp} 。直流电压源输出的有功功率等于直流激励源以外电路消耗的总功率。当被测磁性元件以外的电路损耗和被测磁性元件的绕组损耗占比很小时, 被测磁性元件的磁心损耗 P_{core} 可以认为就是直流电压源的输出功率 P_{Vin_out} :

$$P_{core} = P_{Vin_out} \quad (12)$$

$$P_{Vin_out} = V_i \cdot I_{i_DC} \quad (13)$$

式中 V_i 是输入直流电压; I_{i_DC} 是输入端电流的直流分量。

从式 (13) 中可以看出, 只要测量出直流激励源的输入端电流 I_i 的直流分量 I_{i_DC} , 便可得到 P_{Vin_out} 。该功率测量方法避免了交流功率法被测磁元件上电压和电流之间相位差带来的误差, 也就规避了阻抗角对测量的影响。同时通过对 DC/AC 逆变电路的控制可以实

现对称PWM激励和不对称PWM激励下的磁心损耗的测量。

在磁心损耗模型的研究中,综合考虑不同激励波形及温度的影响,可以直接借鉴式(11)来建立磁心损耗的模型。

磁性元件的激励波形随变压器拓扑结构的不同而不同,其激励波形可分为两类:第一类为不对称PWM激励,单向磁化,如正激变换器中的变压器;第二类为对称PWM激励,双向磁化,如推挽、桥式变换器中的变压器。不对称PWM激励波形激励电压 u 及其磁感应强度 B 变化规律见图4,对称PWM激励波形激励电压 u 及其磁感应强度 B 变化规律见图5。

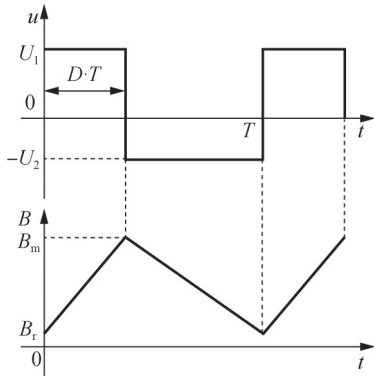


图4 不对称PWM激励波形及其磁感应强度变化规律

Fig.4 Asymmetric PWM excitation waveform and its magnetic flux density variation

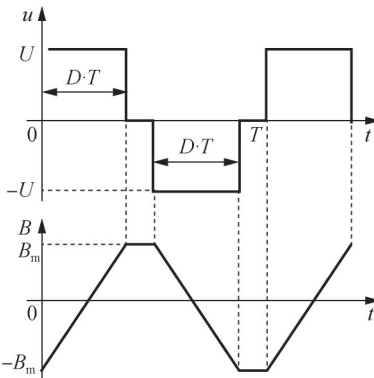


图5 对称PWM激励波形及其磁感应强度变化规律

Fig.5 Symmetric PWM excitation waveform and its magnetic flux density variation

根据式(8),不对称PWM激励下的等效重复磁化频率为

$$f_{eq} = \frac{2 \cdot f}{\pi^2 \cdot D \cdot (1-D)}, 0 < D < 1 \quad (14)$$

对称PWM激励下的等效重复磁化频率为

$$f_{eq} = \frac{4 \cdot f}{\pi^2 \cdot D}, 0 < D < 0.5 \quad (15)$$

式(14)和式(15)的等效重复磁化频率可以通过式(8)计算获得。模型中的损耗系数 k 、 α 、 β 不再由正弦波激励下的磁心损耗测量结果拟合得到,而是由基于直流功率法的PWM波激励磁心损耗测量结果拟合得到。因该方法没有波形的等效变换过程,避免了变换过程所产生的误差,模型精度更高。

3 基于直流功率法的PWM波激励的磁心损耗模型精度验证

3.1 对称PWM波激励下磁心损耗模型精度验证

结合式(4)、式(10)以及式(15)可推导得到考虑温度影响的不带直流偏置的对称PWM波磁心损耗模型如式(16)所示,带直流偏置的对称PWM波磁心损耗模型则需在此基础上引入一个与直流偏置状态相关的放大系数进行修正,因此本文的试验方法和最终结论同样适用于带直流偏置的对称PWM波磁心损耗模型。

$$P_v = C_{m2} \cdot f \cdot \left[\frac{4 \cdot f}{\pi^2 \cdot D} \right]^{n_2-1} \cdot B_m^{n_2} \cdot (ct_0 - ct_1 \cdot T + ct_2 \cdot T^2) \quad (16)$$

磁心损耗的影响因素包括:占空比、交流磁通密度峰值、频率和温度。本文以工程上应用广泛且性能优越的横店集团东磁股份有限公司的DMR96A标准磁环作为测试对象,进行磁心损耗模型的精度验证。基于直流功率法的PWM波励磁磁心损耗测量系统框图和测量平台如图6和图7所示。

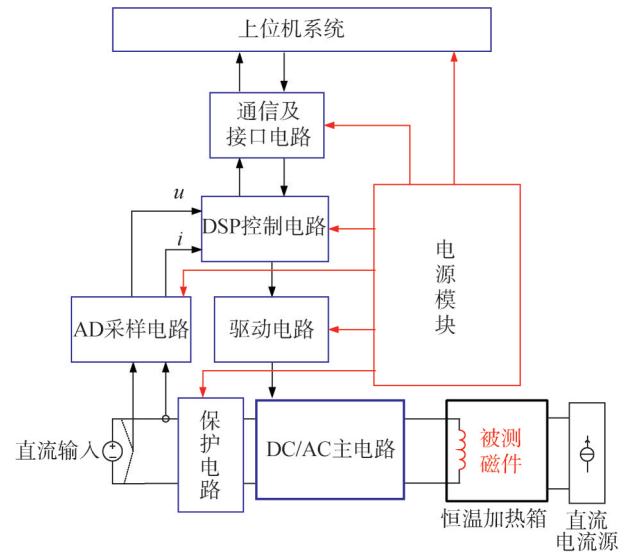


图6 磁心损耗测量系统框图

Fig.6 Block diagram of the core loss measurement system



图7 基于直流功率法的PWM波励磁磁心损耗测量平台

Fig.7 Core loss measurement platform under PWM excitation based on DC power method

在实际测量中采用两个DMR96A磁心绕制的两个电感并联作为被测磁件，匝数为3匝，并联后感量为11.55 μH 。对不同频率、不同交流磁通密度峰值、不同占空比和不同温度下的DMR96A磁心损耗进行测量。被测磁件的PWM励磁电压 $u_L(t)$ 、电流 $i_L(t)$ 波形如图8所示。

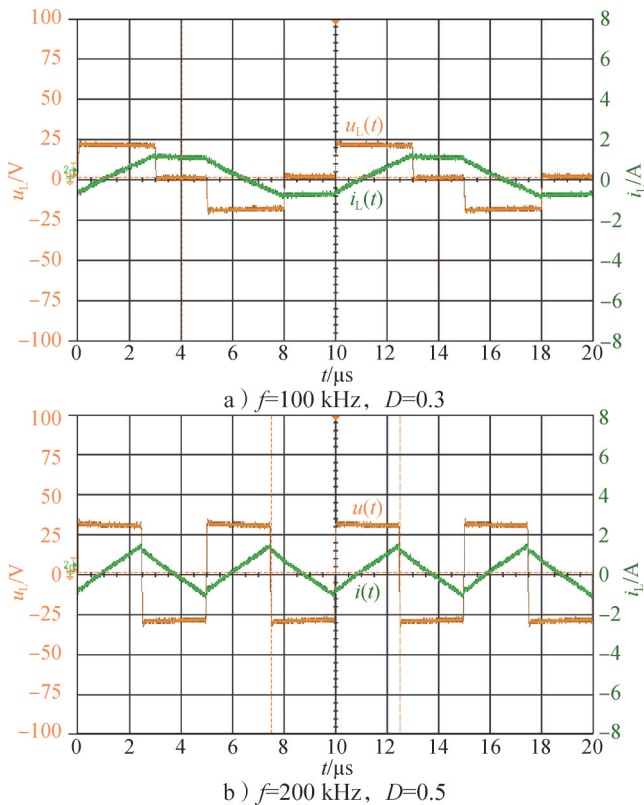


图8 被测磁件的PWM激励电压、电流波形

Fig.8 PWM excitation voltage and current waveforms of the tested magnetic component

通过测量可以得到不同工况下磁心损耗数据，对其进行非线性拟合，获得磁心损耗系数。DMR96A磁心材料在100 kHz下不带直流偏置的对称PWM波磁心损耗系数如表1所示。

表1 100 kHz对称PWM波激励下DMR96A的磁心损耗系数

Tab.1 Core loss coefficients of DMR96A under 100 kHz symmetric PWM excitation

占空比	C_{m2}	α_2	β_2	ct_0	ct_1	ct_2
0.5	0.054 5	1.00	2.949 160	0.006 760	0	0.000 000 277
0.4	0.015 2	1.20	2.895 466	0.002 578	0	0.000 000 109
0.3	0.001 07	1.11	2.816 095	0.129 462	0	0.000 005 56
0.2	0.000 031 3	1.00	2.692 160	17.364 66	0	0.000 695

本文采用力晨101-00S的恒温加热箱对被测磁件加热，在其温度稳定在预定值后，再测量其磁心损耗。

在对称PWM波激励下，测量了交流磁通密度峰值范围在0.066 7~0.383 1 T、不同温度（25 $^{\circ}\text{C}$ 、40 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ ）、不同占空比（0.2、0.3、0.4、0.5）的磁心损耗，并且对测量数据进行非线性拟合，获得该工况下的磁心损耗模型。对于非线性拟合测量数据，模型值和测量值的相对误差如图9和图10所示。

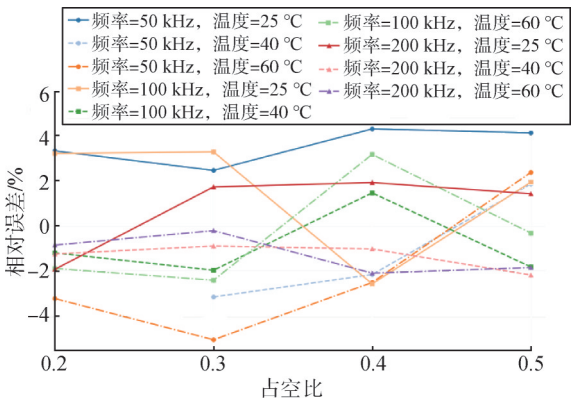


图9 对称PWM波激励下不同工况下随占空比变化磁心损耗模型相对误差

Fig.9 Relative error of core loss model with duty cycle under different conditions with symmetric PWM excitation

由图9和图10可知，本文提出的对称PWM波磁心损耗模型在对称PWM波宽频率、宽占空比、宽交流磁通密度峰值激励下，最大相对误差仅为-5.029%，相对误差绝对值的平均值仅为1.72%，验证了本文提出的对称PWM波激励下宽范围工况磁心损耗模型的准确性。

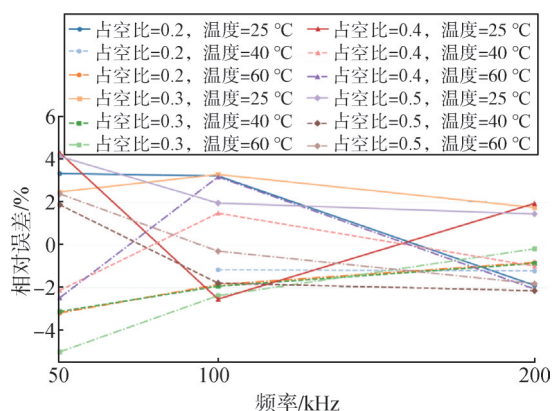


图 10 对称 PWM 波激励下不同工况下随频率变化磁心损耗模型相对误差

Fig.10 Relative error of core loss model with frequency under different conditions with symmetric PWM excitation

3.2 不对称 PWM 波激励下磁心损耗模型精度验证

同理，结合式（4）、式（10）以及式（14）可推导出考虑温度影响的不带直流偏置的不对称 PWM 波磁心损耗模型为

$$P_v = C_{m2} \cdot f \cdot \left[\frac{2 \cdot f}{\pi^2 \cdot D \cdot (1 - D)} \right]^{\alpha_2 - 1} \cdot B_m^{\beta_2} \cdot (ct_0 - ct_1 \cdot T + ct_2 \cdot T^2)$$

(17)

同样以横店集团东磁股份有限公司的 DMR96A 标准磁环为测试对象进行不对称 PWM 波激励下的磁心损耗模型精度验证，通过测量和非线性拟合，获得 100 kHz 下磁心损耗模型系数如表 2 所示。

表 2 100 kHz 不对称 PWM 波激励下 DMR96A 的磁心损耗系数

Tab.2 Core loss coefficients of DMR96A under 100 kHz asymmetric PWM excitation

占空比	C_{m2}	α_2	β_2	ct_0	ct_1	ct_2
0.5	0.000 004 02	1.286 68	2.917 25	3.406 70	0	0.000 144
0.4	0.000 007 02	1.165 88	2.912 43	7.642 65	0	0.000 345
0.3	0.003 54	1.077 27	2.892 32	0.043 10	0	0.000 001 96
0.2	0.000 506	1.220 64	2.854 09	0.062 25	0	0.000 002 71

对不同温度、不同频率、不同占空比工况下，交磁通密度峰值为 0.106 7~0.383 1 T 的不对称 PWM 激励下磁心损耗进行测量。对于非线性拟合测量数据，实测结果与本文提出的不对称 PWM 波激励下的磁心损耗模型计算结果的相对误差见图 11、图 12，可知不对称 PWM 波磁心损耗模型在宽工况下的计算结果最大相对误差小于 4.97%，相对误差绝对值的平均值仅为 1.28%，在宽工况下验证了本文提出的磁心损耗模型的准确性。

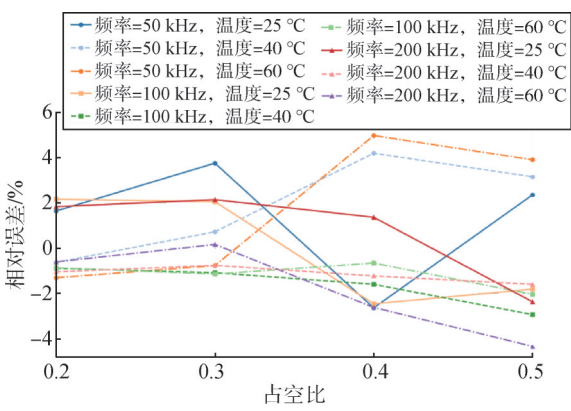


图 11 不对称 PWM 波激励下不同工况下随占空比变化磁心损耗模型相对误差

Fig.11 Relative error of core loss model with duty cycle under different conditions with asymmetric PWM excitation

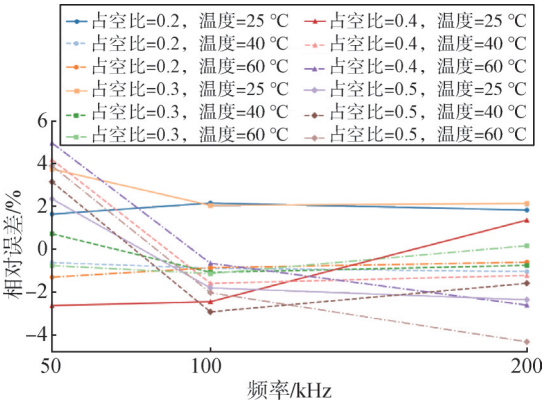


图 12 不对称 PWM 波激励下不同工况下随频率变化磁心损耗模型相对误差

Fig.12 Relative error of core loss model with frequency under different conditions with asymmetric PWM excitation

3.3 对称 PWM 波与不对称 PWM 波激励下磁心损耗模型与 MSE 磁心损耗模型精度对比

对于 DMR96A 磁心材料，不同频率下考虑温度影响的 MSE 损耗系数如表 3 所示。

表 3 DMR96A 磁材不同频率考虑温度影响的 MSE 模型损耗系数

Tab.3 MSE model loss coefficients of DMR96A magnetic material at different frequencies considering temperature effects

频率/kHz	k	α	β	ct_0	ct_1	ct_2
50	0.000 946 1	1.477	2.756	1.281	0.028	0.000 252 1
100	0.000 058 22	1.599	2.124	1.491	0.034	0.000 286 1
200	0.000 000 005 363	2.421	2.628	1.385	0.028	0.000 240 9

对于对称 PWM 波与不对称 PWM 波激励下测量得到的数据点，使用 MSE 模型去预测该点的损耗值，

得到对应的相对误差,与本文提出的PWM波激励下的损耗模型对于同样点的相对误差进行对比。对于占空比和频率相同的点,本文选取其最大的相对误差作为代表,绘制出MSE模型和PWM波励磁磁心损耗模型预测相对误差折线图。

图13和图14为对称PWM波激励下,MSE模型与本文所提磁心损耗模型的预测相对误差对比折线图,横坐标分别为占空比与频率。对比结果显示,MSE模型预测误差显著偏高,其最大相对误差达87.663%;本文模型最大相对误差仅为-5.029%。从平均误差来看,MSE模型相对误差绝对值均值为38.04%,本文模型仅为1.72%,整体预测精度远优于MSE模型。

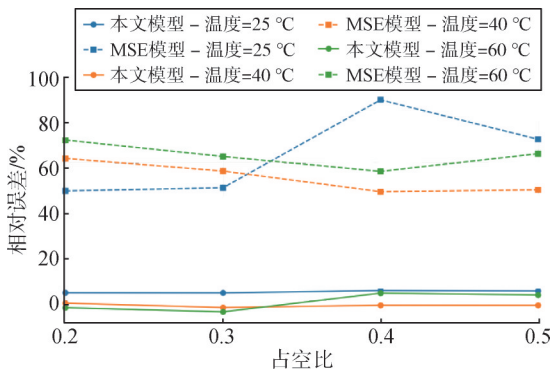


图13 对称PWM波激励下随占空比变化MSE模型和本文模型相对误差对比

Fig.13 Comparison of relative errors between MSE model and this study's model with duty cycle under symmetric PWM excitation

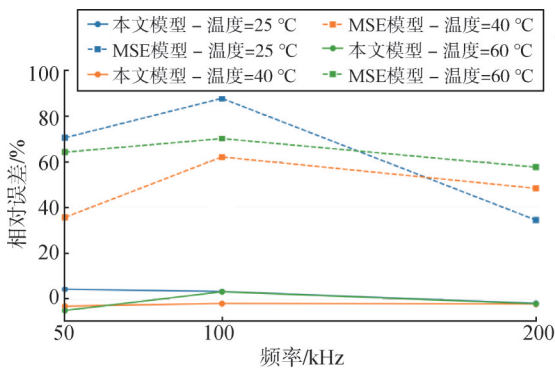


图14 对称PWM波激励下随频率变化MSE模型和本文模型相对误差对比

Fig.14 Comparison of relative errors between MSE model and this study's model with frequency under symmetric PWM excitation

图15和图16为不对称PWM波激励下两种模型的相对误差对比折线图,横坐标同样依次为占空比和频

率。该工况下规律与上述一致:MSE模型最大相对误差高达69.424%,相对误差绝对值平均值为33.11%;本文模型最大相对误差仅4.97%,误差绝对值均值仅1.28%,预测性能明显更优。

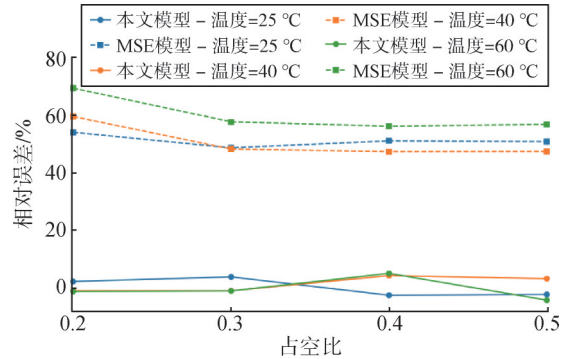


图15 不对称PWM波激励下随占空比变化MSE模型和本文模型相对误差对比

Fig.15 Comparison of relative errors between MSE model and this study's model with duty cycle under asymmetric PWM excitation

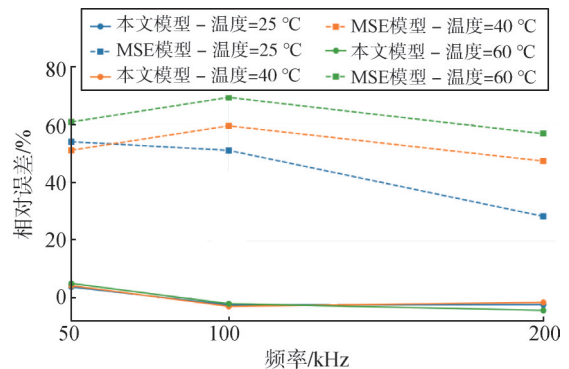


图16 不对称PWM波激励下随频率变化MSE模型和本文模型相对误差对比

Fig.16 Comparison of relative errors between MSE model and this study's model with frequency under asymmetric PWM excitation

4 结 论

针对传统修正Steinmetz模型评估PWM波励磁磁心损耗误差大的问题,本文提出基于直流功率法的PWM波励磁磁心损耗模型。该方法直接基于直流功率法测得的损耗结果建模,可避免MSE模型波形等效变换环节的误差。以横店集团东磁股份有限公司DMR96A磁心标准磁环为研究对象(试验同步采用横店集团东磁股份有限公司DMR95等其他厂商样品,结果与DMR96A吻合),开展多工况损耗测试,验证了所建模型的准确性与工程适用性。此外,将本文模

型与传统MSE模型对比,实测表明其预测精度优势显著。经试验证明,该结论适用于不同厂商同类型软磁心材料,本文方法与结论具有普适性,可为功率变换器磁性元件损耗评估提供依据。

参 考 文 献

- [1] 杨磊,黄玉平,曾晓辉,等.基于矩阵磁集成的隔离型双向DC-DC变换技术研究[J].导弹与航天运载技术(中英文),2025(3):76-84.
YANG Lei, HUANG Yuping, ZENG Xiaohui, et al. Research of isolated bi-directional DC-DC conversion technology based on matrix magnetic integration[J]. Missiles and Space Vehicles, 2025(3): 76-84.
- [2] 闫丽媛,郑再平,卢二宝,等.机电伺服系统的组合式能源技术研究[J].导弹与航天运载技术,2017(2):57-60+79.
YAN Liyuan, ZHENG Zaiping, LU Erbao, et al. Research on combined-type energy technology of mechatronical servo system[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(2): 57-60+79.
- [3] 高晓光,杨金旭.基于差值损耗的谐振DC/DC变换器中集成磁件磁心损耗测量方法[J].电源学报,2024(1):1-14.
GAO Xiaoguang, YANG Jinxu. Core loss measurement method for integrated magnetics based on differential power for resonant DC/DC converter[J]. Journal of Power Supply, 2024(1): 1-14.
- [4] 张宏伟,刘增,宋英,等.宽输出电压双有源桥变换器最小电流应力的磁性元件参数设计方法[J].中国电机工程学报,2022,42(23):8675-8686.
ZHANG Hongwei, LIU Zeng, SONG Ying, et al. A design method of magnetic components for minimum current stress of dual active bridge converter under wide output voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8675-8686.
- [5] ZHAO H, ELDEEB H H, ZHANG Y, et al. An improved core loss model of ferromagnetic materials considering high-frequency and nonsinusoidal supply[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 4336-4346.
- [6] 汪晶慧,肖俊涛,陈为.电感电压部分补偿交流功率法测量磁心损耗研究[J].仪器仪表学报,2022,43(1):282-292.
WANG Jinghui, XIAO Juntao, CHEN Wei. Research on measuring magnetic core loss by the inductor voltage partial compensation AC power method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 282-292.
- [7] JAVIDI N F, NYMAND M. Error analysis of high frequency core loss measurement for low-permeability low-loss magnetic cores[C]. Auckland: 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2016.
- [8] LANCAROTTE M S, GOLDEMBERG C, JR A D A P. Estimation of FeSi core losses under PWM or DC Bias ripple voltage excitations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 367-372.
- [9] 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, 2011, 27(2): 953-963.
- [10] TANG Yunyu, ZHU Fan, MA Jiong, et al. A practical core loss calculation method of filter inductors in PWM inverters based on the modified Steinmetz equation[C]. Istanbul: 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2014.
- [11] 叶建盈,陈为,汪晶慧. PWM波及直流偏磁励磁下磁芯损耗模型研究[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2601-2606.
YE Jianying, CHEN Wei, WANG Jinghui. Research on the core loss model under PWM wave and DC bias excitations[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2601-2606.
- [12] LIU S, LI T, LUO J, et al. Core loss analysis of soft magnetic composites based on 3D model considering temperature influence[J]. IEEE Access, 2021(9): 153420-153428.
- [13] STEINMETZ C P. On the law of hysteresis[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1892, 9(1): 1-64.
- [14] 沈雅静,张帅,姜潇,等.带有温度因子的Steinmetz磁芯损耗预测模型[J].长春理工大学学报(自然科学版),2025,48(2):127-133.
SHEN Yajing, ZHANG Shuai, JIANG Xiao, et al. Steinmetz core loss prediction model with temperature factor[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 48(2): 127-133.
- [15] REINERT J, BROCKMEYER A, DONCKER RWAAD. Calculation of losses in ferro and ferrimagnetic materials based on the modified Steinmetz equation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(4): 1055-1061.

作 者 简 介

杨磊(1982—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为伺服电源技术。

黄玉平(1967—),男,研究员,主要研究方向为伺服系统设计。

郭希贤(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为功率变换器的磁心损耗测量与建模。

陈庆彬(1985—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力电子高频磁技术、无线电能传输技术和电磁兼容诊断与抑制。