

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2017.04.013

功率变换器中磁元件损耗测量方法的综述

叶建盈^{1,2}, 郑荣进², 黄晓生²

(1.福建工程学院 福建省汽车电子与电驱动技术重点实验室, 福建 福州 350118;
2.福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 磁元件损耗在功率变换器总损耗中占据了较大的比例,其损耗的准确评估对功率变换器的效率至关重要。测量技术是一切研究磁元件损耗的基础,也是评估磁元件损耗的最直接和有效的手段。总结现有磁元件损耗的测量技术,对比分析各种热量测量法,电气测量法的工作原理、特点及应用场合,展望磁元件损耗测量技术的发展趋势和研究方向。

关键词: 磁元件; 绕组损耗; 磁芯损耗; 测量; 电气; 热量

中图分类号: TM 936

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)04-0371-07

Review of magnetics losses measurement in power converter

Ye Jianying^{1,2}, Zheng Rongjin², Huang Xiaosheng²

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The losses of magnetics account for a relatively large proportion of the total loss of power converter, the accurate estimation of which is critical to the efficiency of power converters. The measurement technology is the foundation of all research on the magnetics losses, which is also the most direct and effective means to evaluate the magnetics losses. Available magnetics losses measurement techniques were reviewed. The principle, characteristics and application of various calorimetric methods and electrical measurement methods were compared and analysed. Finally, the development trends and research directions of the magnetics losses measurement technology were envisaged.

Keywords: magnetics; winding loss; core loss; test; electricity; heat

开关功率变换器可以实现不同形式电能的变换,作为高效的电能变换装置,其应用领域日益广泛和普及,因此设计和研制高可靠性、高效率和高功率密度的功率变换器对提高电能变换效率、降低能耗具有重要的现实意义。磁元件,如变压器和电感,由于磁性材料和导电材料的进步相对缓慢,且制作工艺复杂,又需要客制化设计,对功率变换器的体积、重量、高度、损耗、温升、成本、电磁

兼容和可靠性等性能都有很大影响。因此,磁元件技术已经成为制约功率变换器技术继续提高工作频率和提高功率密度的瓶颈之一,也已成为国内外学术界和产业界的关注热点^[1-2]。

磁元件的损耗包括绕组损耗和磁芯损耗,对于磁性材料的高频损耗特性研究,目前的研究主要集中在损耗测量和模型建立两个方面,磁元件损耗的测量是实验研究,它为磁元件损耗模型的

收稿日期: 2017-07-19

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2017J01470);福建省教育厅科技项目(JAT160324);福建工程学院科研基金项目(GY-Z160004)

通讯作者: 叶建盈(1980-),男,福建宁德人,讲师,博士,研究方向:电力电子功率变换、高频磁技术。

建立提供基础和验证,模型的建立为损耗分析和磁元件设计提供理论基础。本文阐明了研究磁元件磁芯损耗的重要性,详细介绍了绕组损耗和磁芯损耗的测量原理与方法,分析了各种测量方法的特点,探讨了磁元件测量技术的主要研究方向和发展趋势。

1 磁元件绕组损耗的测量方法

根据从磁元件的特性和应用场合,磁元件可分为有气隙磁元件和无气隙磁元件。对于无气隙磁元件,其绕组损耗的测量可以采用绕组短路测量的方法获得。

对于广泛应用的有气隙磁元件,如非晶或铁氧体等高磁导率材料的电感器,文献[3]通过构造一个气隙等效磁元件,提出了一种绕组损耗的测量方法,这种方法是基于气隙等效面电流代替气隙磁压降的原理,在一定程度上解决了有气隙磁元件绕组损耗无法测量的问题。但是这种方法本质上还是通过测量绕组的交流等效电阻,再根据实际工况的电流计算出绕组损耗。

文献[4]采用了 DC/AC 逆变电路为磁元件提供矩形波励磁,被测磁元件并绕成变压器且将副边短路,同时引入一个辅助空芯电感,通过测量逆变电路在两种负载情况下的损耗而获得矩形波激励下磁元件的绕组损耗。这种方法为矩形波励磁下绕组损耗的直接测量提供了一种可行的方法,但是由于引入了空芯电感和将被测磁元件绕制成变压器并短路副边,则施加在被测磁元件的励磁波形与实际的励磁波形不一定一致,磁场对绕组损耗的影响并未考虑,而且精度会受到 DC/AC 逆变电路本身的固有损耗的影响。

文献[5]提出了一种测量平面变压器绕组损耗的测量方法,文中在平面变压器中增加一个辅助绕组并开路,给平面变压器的一次侧施加 PWM 波励磁,二次侧连接一个低感值的负载电阻,通过测量辅助绕组两端和负载电阻两端的电压,以及负载电阻的阻值、二次侧绕组与辅助侧绕组的匝比 n ,再根据推导出的公式得到该工况下二次侧绕组损耗的等效电阻。该测量方法考虑到了变压器中磁场对绕组损耗的影响情况,一定程度上克服了绕组损耗难以直接从变压器中分离出来的问题。但是,该方法受负载电阻的影响很大,即负载电阻阻值的稳定性、分布电感和频率特性等会严

重影响到测量结果,为此文献[5]也建议采用低感值的电阻作为负载电阻,并且采用阻抗分析仪对负载电阻进行定标以获得准确的阻值和相位响应。另外,该测量方法只是可以测量通过给定的励磁波形工况下的绕组损耗,还是无法实现真正意义工况下功率变换器中磁元件绕组损耗的在线测量。

2 磁元件磁芯损耗的测量方法

磁芯损耗的测量是一切研究磁元件磁芯损耗的基础,它是评估磁芯损耗的最直接和有效的手段,因此准确地测量各种不同励磁工况下磁芯损耗是研究磁芯损耗的重要基础保障。现有测量方法根据测量原理的不同可以分为两大类:热量测量法和电气测量法。

2.1 热量测量法

热量测量法又称量热计法是一种传统的能量和损耗测量方法^[6-9],是通过测量被测件损耗发热引起的热工质温升得到损耗的方法,即将被测件放在盛有导热良好热工质的容器里,若知道热工质的比热容,则可根据式(1)通过测量热工质的温升来获得损耗。

$$W = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中的 W 是焦耳能量, c 是热工质比热容, m 是工质的质量, ΔT 是温升。必要时,还需要考虑被测件本身的热容量。

量热计法原理最早可追溯到 18 世纪^[6]。1760 年,为了测量被测件的比热容,文中采用了量热计法将冰和被测件放入与外界具有隔热性能的容器里,被测件产生的热量使得冰融化成水,测量已融化的水的容量从而获得了被测件的比热容。1789 年, Lavoisier 详细介绍了量热计法及其装置,装置采用多层容器,容器中用冰作为工质,同样测量由于被测件产生的热量使冰融化成水的温升来得到被测件的热量。

根据结构的不同,目前量热计法主要可以分为:开放式热量计法、封闭式热量计法、平衡式热量计法和串联式量热计法。以下将主要对前两种测量方法进行简单介绍。

(1) 开放式热量计法

开放式量热计法^[10-11]的测量原理图如图 1 所示,容器里的热工质是气体,整个系统是开放的,只要测量输入、输出气体温度差以及气体单位

时间的流量,根据式(1)求出被测件的损耗。式中的比热容 C 采用气体的比热容 C_a ,工质的质量 m 采用气体的单位时间流量 m_a , ΔT 是输入、输出气体的温度差, P 是功率。开放式量热计法测量的精度主要取决于 c_a 和 m_a 两个量的测量精度。气体的密度很小,要得到一定的温度差,须输入、输出的开口比较大才行,且 m_a 的精确测量很困难,而 c_a 会随着温度和湿度的改变而改变。气体流速的不均匀和输入、输出端温度的分布不均匀都会引入较大的测量误差。

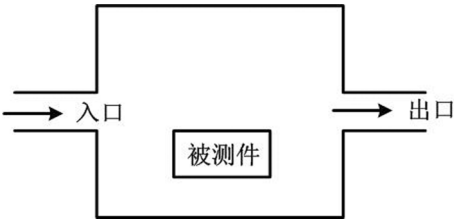


图 1 开放式量热计法

Fig.1 Open type calorimetric measurement method

(2)封闭式热量计法

封闭式量热计法^[12]采用液体作为热工质,一般采用水或油。其结构如图 2 所示,液体在热交换器的闭合环内循环,被测件产生的热量先传递给容器内的空气,然后通过热交换器和辅助风扇传递给液体工质,只要测量输入、输出液体的温度差和液体单位时间的流量,就可根据式(1)得到功率。

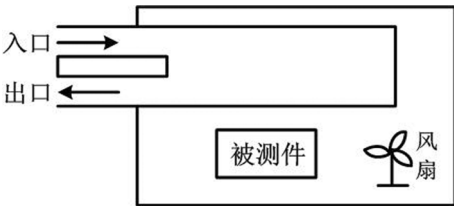


图 2 封闭式量热计法

Fig.2 The schematic of closed type calorimetric measurement

液体的密度较大,所以容器的输入、输出的开口比开放式量热计法小,液体的性质较气体性质稳定,因此其精度较开放式量热计高。

为了进一步提高热量测量法的精度,文献[13]和文献[14]提出了平衡式量热计法和串联式量热计法以消除热工质相关参数引起的误差。总之,这些量热计测量法大都适合于测量大功率

电机的磁元件损耗,不适用于小损耗被测件的损耗测量。

文献[15]根据量热计法原理提出了定标量热计法测量小损耗角磁元件的磁芯损耗,采用一个温度系数很小的电阻作为参考热源,对量热计法进行定标以消除量热计法中的杂散因素带来的误差。其测量原理图如图 3 所示。其中,隔热容器采用隔热性能很好的杜瓦瓶,热工质采用不易挥发、惰性、绝缘性和导热性好的甲基硅油,并且采用高精度水银温度计测量杜瓦瓶中硅油的温升。另外,为了加快温度传递并均匀分布在硅油中,将旋转磁子放入容器中,通过磁力搅拌器使得磁子在硅油中以适当的速度旋转搅拌,具体的实验装置如图 4。

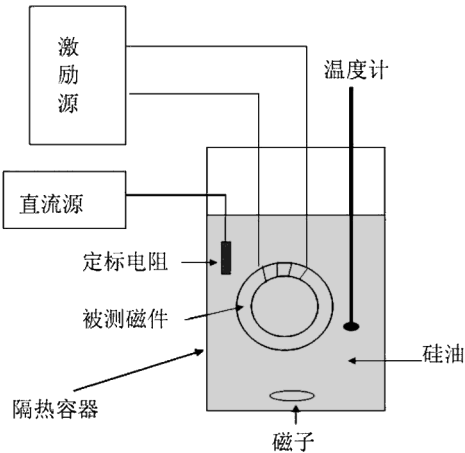


图 3 定标量热计法原理图

Fig.3 Schematic diagram of calorimetric equipment

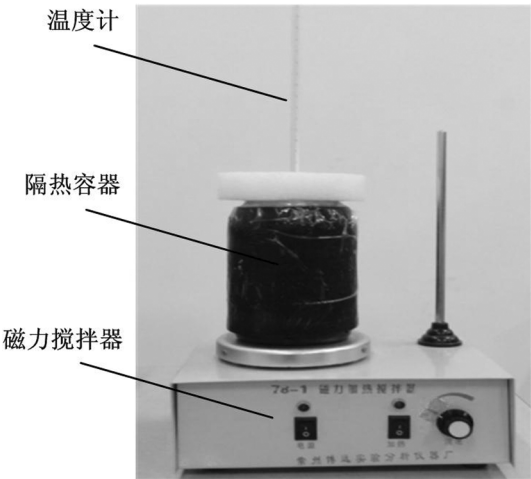


图 4 定标量热计法测量装置

Fig.4 Calorimetric equipment

由于隔热容器无法做到完全隔热,磁子在硅油中旋转多少都会产生少许热量,以及容器中除硅油外的其他部件也会吸收热量,这些杂散因素会带来一定的误差。但是这些误差可以通过定标来消除,将式(1)进行修正为:

$$W = k_1 \cdot \Delta T + k_2 \tag{2}$$

式中, k_1 和 k_2 为通过定标电阻得到的定标系数, ΔT 为磁元件发热在硅油中引起的温升。

因此,这种测量方法只要通过直流电压给定标电阻加热,对该模型进行定标就可以获得参数 k_1 和 k_2 ,进而可以得到温升与热量的关系,进而通过温升而获得被测元件的损耗。

量热计法不依赖于被测件的电气参数,从原理上来说是最直接和准确的一种测量方法,但准确的热测量需要复杂的量热装置和严格的定标来消除各种误差因素,如装置的散热、装置带来的附加热量以及测温装置的读数等因素,测试操作复杂费时,一般用于实验室研究,难以在工程上广泛应用。

2.2 电气测量法

电气测量法是一种通过测量被测磁元件的电参数并根据功率公式计算获得损耗的方法。根据测量参数和电路的不同又可以分为阻抗测量法^[13-14]、交流功率测量法^[15-21]和直流功率测量法^[22-23]。

(1) 阻抗测量法

在电路中,对于由绕组和磁芯组成的磁结构,如电感器,在某个励磁频率下,可以等效为 L_s-R_s 串联和 L_p-R_p 并联两种电气模型,其中电感 L_s 或 L_p 体现了电感器的储能作用,电阻 R_s, R_p 代表了电感器的损耗。可以通过阻抗分析仪、LCR 表或其他测量电路测量电感器对应于该频率下的等效电阻,通过式(3)或式(4)得到损耗。

$$P = I_{\text{rms}}^2 \cdot R_s \tag{3}$$

$$P = U_{\text{rms}}^2 / R_p \tag{4}$$

式中, I_{rms} 为串联电气模型电感中电流的有效值, U_{rms} 为并联电气模型电感两端电压的有效值。

由于磁芯损耗的非线性特性,而阻抗分析仪等仪器的输出为小信号,为了获得大功率励磁下的损耗,需要将仪器的小信号输出通过功率放大器放大。图 5 为阻抗分析仪和高频功率放大器测量损耗的原理图^[16],阻抗分析仪的小信号输出经高频功率放大器放大后作为励磁源通过阻抗探头

施加到被测件上,其响应信号也通过阻抗探头采集后经衰减器衰减后送到阻抗分析仪,从而得到被测件在大信号电压下的阻抗特性,进而根据式(3)或式(4)获得损耗。

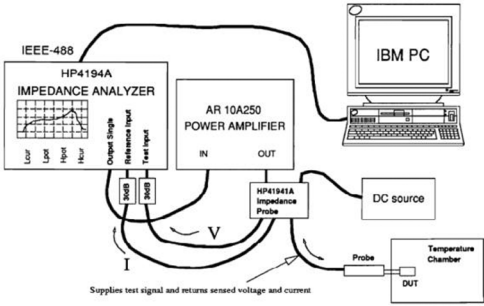


图 5 阻抗测量法原理图

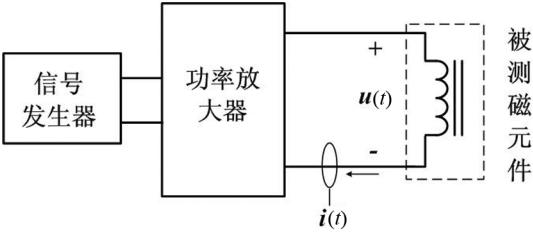
Fig.5 The schematic of resistance measurement

从上述分析可看出,阻抗测量法具有简单和快捷的优点,但是该方法仅适用于正弦波励磁,且磁芯只能工作在线性区,而且由于磁芯损耗的非线性特性,也不能通过各次谐波励磁的叠加来获得非正弦励磁的损耗。

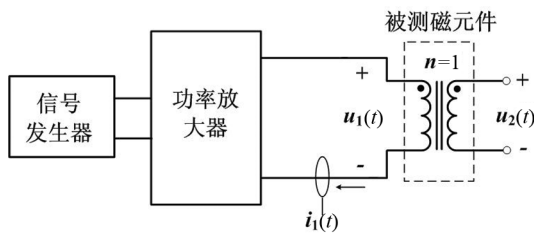
(2) 交流功率测量法

交流功率测量法是目前被广泛采用的电气测量方法,通过采集磁元件绕组的励磁电压和励磁电流,再计算出被测磁元件的磁芯损耗。该方法根据励磁电压采样方式的不同分为单绕组采样测量法和双绕组采样测量法。图 6(a)为单绕组采样测量原理图,图 6(b)为双绕组采样测量原理图,其中,信号发生器用于产生各种波形信号,经过高频功率放大器产生大电压信号作为磁元件的励磁源。

从图 6 的原理图可看出,单绕组测量法仅需一个绕组,但是该方法测量到的绕组电压包含了绕组的电阻电压降,因此测量计算结果包含了绕组损耗。双绕组测量法的最大优点是由于采样的是二次侧开路的感应电压作为计算磁元件磁芯损耗的电压,仅包含磁芯磁通感应的电动势,因此所



(a) 单绕组测量法



(b) 双绕组测量法

图 6 磁芯损耗交流功率测量法

Fig.6 Magnetic core losses AC measurement

得到的损耗只有磁芯损耗。双绕组一般需要采用并绕的方式以降低一次侧励磁绕组产生的磁通与二次侧感应绕组感应的磁通的差异,但两个绕组之间的寄生参数(如分布电容)在高频下也有可能对损耗测量产生影响。

单绕组和双绕组法计算磁芯损耗的方法分别如式(5)和式(6)所示。

$$P_{\text{core}} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_{T_s} u(t) \cdot i(t) dt \quad (5)$$

$$P_{\text{core}} = \frac{1}{T_s} \cdot \int_{T_s} u_2(t) \cdot i_1(t) dt \quad (6)$$

式中, T_s 为励磁周期, $u(t)$ 和 $i(t)$ 分别为单绕组法测量得到的被测磁元件绕组电压和电流, $u_2(t)$ 和 $i_1(t)$ 分别为双绕组法测量得到的被测磁元件二次侧的电压和一次侧的电流。

交流功率计法简单、快捷,在低频磁性材料的磁化曲线和损耗测量中广泛应用,但对于电力电子高频功率变换器应用的磁芯,在高频下,尤其是当测量小损耗角的磁芯损耗时(磁元件的阻抗角接近 90° ,即低磁导率和低损耗的磁芯),此方法的测量精度对相位误差是非常敏感的^[19],而实际上电流的采样是通过采样电阻上的电压或采用各种电流传感器获得的,同时采样仪器的电压、电流采样通道的信号传输时间差异,以及大功率连接线的寄生参数都会导致所获得的电流与实际电流之间产生相位误差。因此,实际操作上,对于较高频率且低磁导率和低损耗磁芯的应用场合,交流功率计法的测量精度会受到很大影响。

为了提高交流功率计法的测量精度,美国弗吉尼亚理工大学 Fred Lee 教授研究团队对此展开了深入研究^[21]。如图 7 所示,通过在测试电路加入一个谐振电容 C_r ,与励磁电感发生谐振,从而抵消励磁电感电压,进而降低了阻抗角,也降低了

相位误差对磁芯损耗测量误差的敏感度,提高测量精度。测量 $u_3(t)$ 和采样电阻的电压 $u_R(t)$,再根据式(7)以获得磁芯损耗。

$$P_{\text{core}} = \frac{1}{T_s \cdot R_{\text{ref}}} \cdot \int_{T_s} u_3(t) \cdot u_R(t) dt \quad (7)$$

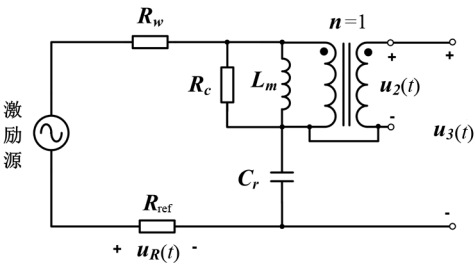


图 7 引入谐振电容的交流功率计法

Fig.7 AC power measurement method with resonant capacitor

但是该方法引入了谐振电容,其本身固有的等效串连电阻(equivalent serial resistance, ESR)损耗也会影响到测量精度,只适用于正弦波励磁下的磁芯损耗测量。另外,电容的选择要根据被测电感感值的不同而不同,增加了测量的复杂性。且该方法适用于正弦波励磁下磁芯损耗的测量。

为了适应不同波形励磁磁芯损耗测量,文中采用了空心变压器取代谐振电容,且空心变压器采用了双绕组法绕制,如图 8 所示。该测量方法的精度受被测电感与引入的空芯电感感值比值影响很大,只有比值接近 1 时误差较小。因此,文中又对该方法进行改进,通过引入一个无功抵消因子 k 的方法以降低测量误差。但测量方法都是采用空芯电感,因此感值难以做大,因此,该测量方法只适用于对小感值电感磁芯损耗的测量。

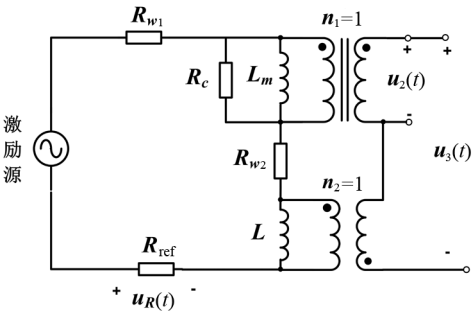


图 8 引入空芯电感的交流功率计法

Fig.8 AC power measurement method with air core inductor

(3) 直流功率测量法

直流功率测量法原理如图 9 所示,通过 DC/AC 逆变电路将直流电压源 U_{in} 转换为高频 PWM 波为被测磁元件提供所需的励磁。由于输入电压为直流电压,即使磁元件中有很大的励磁电流纹波,则输入电流 i_{in} 中含的这部分高频分量的输入功率为零,因此,通过测量输入电流中的直流分量 I_{in_dc} 、输入直流电压 U_{in} 以及定标 DC/AC 电路的固有损耗,再根据根据式(8)和式(9)可得到被测件损耗^[23]。

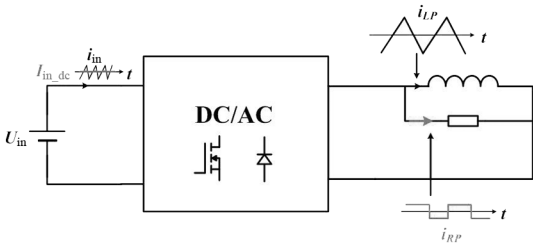


图 9 直流功率测量法原理图

Fig.9 The schematic of direct power measurement method

$$P_{core} = P_{in} - P_{other} \tag{8}$$

$$P_{other} = \alpha \cdot I_{pk}^2 + \beta \cdot f \cdot U_{dc} \cdot I_{pk} \tag{9}$$

式中, P_{in} 为逆变器输入功率,即为 $U_{in} \cdot I_{in_dc}$, P_{other} 为全桥 DC/AC 逆变电路的固有损耗,包含了 MOSFET 管的开通损耗、关断损耗和导通损耗;滤波电容的 ESR 损耗;PCB 的连接线损耗等其他一些电阻损耗,这部分损耗需通过定标的方法来获得。文中采用了一个空芯电感对该损耗进行定标,从而将该部分固有损耗从磁芯损耗中去除,进而提高测量精度,但该方法的精度受 DC/AC 逆变电路的损耗模型影响较大,在被测电感值比较小时,电路电流较大,其模型影响程度特别明显,因此该方法适合于被测电感感值较大情况下磁芯损

耗的测量。

3 测量技术的发展趋势

测量技术是研究磁元件损耗的基础,其测量精度影响到功率变换器中磁元件损耗模型的精确建立,以及磁元件的设计和优化等,因此损耗的测量技术对功率变换器和磁元件都至关重要。从近年的研究成果来看,将来损耗测量技术的主要研究方向为:其一,研究高频励磁下如何克服交流功率法中测量相位误差对磁芯损耗影响的关键技术,以及寻找适用于不同励磁波形下的磁元件损耗的通用方法,现有研究在这方面做了不少工作,但是还远远不够。其二,寻找其他电气测量方法以避免高频励磁下测量相位误差对磁芯损耗的影响。其三,温度对磁元件的损耗影响较大,由于磁元件在功率变换器工作过程中温度都比较高,且不同功率变换器和不同工作状态磁元件的温度也不一样,甚至磁元件中磁芯和绕组内部温度分布情况受影响因素较多,因此指定温度下磁芯损耗的研究很有必要。

4 结论

通过对磁元件损耗测量技术的综述,分析了绕组损耗的几种测量方法和特点,重点讨论了磁芯损耗的测量方法,分别总结了开放式热量计法、封闭式热量计法、平衡式量热计法和串联式量热计法四种热量测量法,以及阻抗测量法、交流功率计法和直流功率计法三种电气测量法的测量原理,归纳了各种测量方法的特点和适用场合,并对磁元件损耗测量技术的未来研究方向进行了探讨,这对深入研究磁元件损耗的评估技术具有重要的指导作用。

参考文献:

[1] Kolar J W, Drofenik U, Biela J, et al. PWM converter power density barriers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 128(4): 468-480.

[2] 周洁敏, 赵修科, 陶思钰. 开关电源磁性元件理论及设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.

[3] 叶建盈, 陈为. 一种有气隙磁元件高频绕组损耗的测量评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1749-1755.

[4] Han Yongtao, Eberle W, Liu Yanfei. A practical copper loss measurement method for the planar transformer in high-frequency switching converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(4): 2276-2287.

[5] 汪晶慧, 陈为. 矩形波激励下磁芯损耗测量中绕组损耗的测量[J]. 南昌大学学报, 2012, 34(3): 279-282.

[6] Lavoisier A. Elements of Chemistry[M]. New York: Dover Publications, 1984: 1-539.

[7] Bowman J K, Cascio R F, Sayani M P, et al. A calorimetric method for measurement of total loss in a power transformer[C]//

- Power Electronics Specialists Conference, June 24–27 1991, Cambridge, MA, USA. Cambridge: [s.n.], 1991 (C): 633–640.
- [8] Baholo B, Mellor P H, Howe D, et al. An automated calorimetric method of loss measurement in electrical machines[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1994, 133(1/3): 433–436.
- [9] Szabados B, Mihalcea A. Design and implementation of a calorimetric measurement facility for determining losses in electrical machines[J]. Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 902–907.
- [10] Turner D R, Binns K J, Shamsaddeen B N, et al. Accurate measurement of induction motor losses using balance calorimeter[J]. Electric Power Applications, 1991, 138(5): 233–242.
- [11] Jalilian A, Gosbell V J, Perera B S P, et al. Double chamber calorimeter (DCC): A new approach to measure induction motor harmonic losses[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(3): 680–685.
- [12] 汪晶慧, 陈为. 超低损耗角磁芯损耗测量的量热计法[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(4): 6–9.
- [13] Gradzki P. Core loss characterization and design optimization of high-frequency power ferrite devices in power electronics applications[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1992.
- [14] Zhang Ju, Skutt G, Lee F C. Some practical issues related to core loss measurement using impedance analyzer approach [C]// Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference, March 5–9, 1995, Hyatt Regency, Dallas. Dallas: [s.n.], 1995 (C): 547–553.
- [15] 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.
- [16] Shen W, Wang F, Boroyevich D, et al. Loss characterization and calculation of nanocrystalline cores for high-frequency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 475–484.
- [17] Chen D Y. High-frequency core loss characteristics of amorphous magnetic alloy[J]. Proceedings of the IEEE, 1981, 69(7): 853–855.
- [18] Lancarotte M S, Goldemberg C, Penteado A, Jr. Estimation of FeSi core losses under PWM or DC bias ripple voltage excitations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2): 367–372.
- [19] 颜冲, 何俊, 郭晓东. 不同激励条件对铁氧体磁心损耗的影响[J]. 磁性材料及器件, 2012(2): 37–42.
- [20] Mu Mingkai, Li Qiang, Gilham D, et al. New core loss measurement method for high-frequency magnetic materials[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4374–4381.
- [21] Hou D, Mu M, Lee F C, et al. New high-frequency core loss measurement method with partial cancellation concept[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2987–2994.
- [22] 管峻峰, 陈为, 吴一凡. 磁芯元件损耗的测量装置: 200710142784.1 [P]. 2007–08–03.
- [23] 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.

(责任编辑: 肖锡湘)