

电磁式电流互感器谐波比值误差实验与分析*

陈利翔¹, 邵振国¹, 张逸²

(1. 福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院 福州 350000)

摘要:电磁式电流互感器谐波传变特性复杂多变,传变误差难以估计。设计了铁磁性材料磁滞回线的观测实验,分析了磁滞回线形状对电流互感器谐波传变误差的影响。针对谐波误差检测精度要求高的难点,研制了高精度的电流互感器谐波误差检测系统,并通过实验分析了频率、负载、基波电流、谐波相角、直流量对电流互感器谐波传变误差的影响。

关键词:磁滞特性;谐波传变;谐波误差检测;谐波比值误差

中图分类号: TM452 TH183.3 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Experiment and analysis on electromagnetic current transformer harmonic ratio error

Chen Lixiang¹, Shao Zhenguo¹, Zhang Yi²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350000, China)

Abstract: The harmonic transfer characteristics of electromagnetic current transformer is complex, and the transfer error varies and is hard to estimate. This article designs the experiment of hysteresis loop of ferromagnetic material, and analyzes the influence of the hysteresis loop shape on the transfer error of current transformer. Aiming at the difficulty of high accurate detection of harmonic error, a high-precision detection system of current transformer harmonic error was developed. With the experiment, the influence of frequency, load, fundamental current, harmonic phase and DC component on the harmonic transfer error of current transformer is analyzed.

Keywords: hysteresis characteristic; harmonic transfer; harmonic error detection; harmonic ratio error

1 引言

准确的谐波电流测量是电能质量谐波污染评估、谐波危害治理、谐波功率计量的重要前提。受铁磁材料磁滞特性的影响,电流互感器(current transformer, CT)的传变特性与一次侧电流的频率和波形密切相关,导致谐波传变误差复杂多变,制约了谐波电流的准确测量。《GB/T 20840.2-2014 互感器 第2部分:电流互感器的补充技术要求》^[1]只规定了电磁式电流互感器的工频误差限值,并未对谐波误差限值做出要求。文献[2]认为所有传统互感器都不能满足电能质量品质测量级误差限值要求。因此,深入分析电磁式电流互感器的谐波传变特性对电能质量谐波精确测量具有重要意义。

文献[3]研究表明,谐波比值误差和相位误差随着谐波相角的变化而改变;文献[4]进一步研究了CT铁心气隙长度和一次载流导体相对磁环的位置对谐波比值误差和相位误差的影响。此外,二次负载阻抗大小^[5]、基波大小^[6]、直流偏磁^[7]、低频电流及外加磁场^[8]也会影响谐波测量精度。

目前已有CT工频传变误差检测设备^[9-11],但尚未有针对电磁式CT谐波传变误差的检测设备。电磁式CT谐波传变特性实验的关键在于稳定的大电流谐波源与高精度的谐波传变误差检测手段。可采用等安匝原理实现大电流谐波源^[12],并提高谐波检测精度^[13-15],实现CT误差检测。本文首先设计了铁磁性材料磁滞回线的观测实验,分析了磁滞回线形状对电流互感器谐波传变误差的影响,进而研制了以STM32F407和AD7606为核心的电

流互感器谐波比值误差检测系统,为电流互感器谐波误差检测提供了基本手段。

2 CT 磁滞特性观测

2.1 CT 磁滞特性观测实验

CT的一次侧电流在铁心中产生交变磁通,在二次侧产生感应电流,其传变过程如图1所示。其中 i_1 、 i_2 、 i_m 分别为一次、二次、励磁电流, N_1 、 N_2 为一次、二次绕组匝数, ϕ 为铁心磁通, u_2 为二次电压, Z_2 为二次总阻抗。

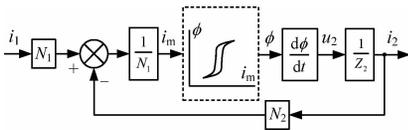


图1 CT 电流变换原理

Fig.1 CT current transfer principle

由图1可知, i_m 是导致 i_1 与 i_2 之间存在传变误差的关键所在,与铁磁性材料的固有磁滞特性密切相关。

在工频激励下,未饱和状态下的 $\phi - i_m$ 曲线为椭圆形。进入饱和以后,磁滞特性具有明显的非线性特征,引起CT传变误差。在谐波激励下, $\phi - i_m$ 形态变化更大。本文从磁滞回线观测实验出发,分析CT的谐波传变误差。CT磁滞特性观测实验的原理接线如图2所示。

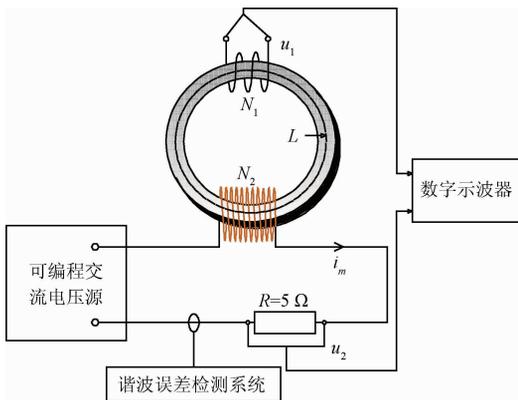


图2 CT 磁滞观测实验

Fig.2 CT magnetic hysteresis observation experiment

当一次绕组 N_1 中无电流时,根据安培环路定理,流经二次绕组 N_2 的电流即为铁心励磁电流 i_m 。

$$i_m = \frac{u_2}{R} \quad (1)$$

i_m 在铁心中建立磁通 ϕ ,根据电磁感应原理,绕组 N_1 两端电压为:

$$u_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

本文实验对象为BH-0.66 低压电流互感器,铁心材料为硅钢片,参数如表1所示。利用数字示波器DXO3024T的差分探头N2790A采集采样电阻电压 u_2 ,电压探头N2843A采集感应电压 u_1 。调节电压源输出以改变励磁电流大小,采用梯形方法求解式(2),即可得到磁滞回线轨迹 $\phi - i_m$ 。

表1 实验对象参数

Table 1 Experiment object parameters

内径、外径、 宽度、叠片 厚度/mm	匝数比 $N_1 : N_2$	二次绕组 电阻/ Ω 、 电感/mH	额定 电流/A	准确度/ %
38、53、23、0.23	5: 30	0.16、0.93	18	3

2.2 磁滞回线与频率变化的关系

在图2中调节电压源输出幅值和频率,并使感应电压 u_1 有效值保持不变,可得不同频率下的磁滞回线轨迹如图3所示。

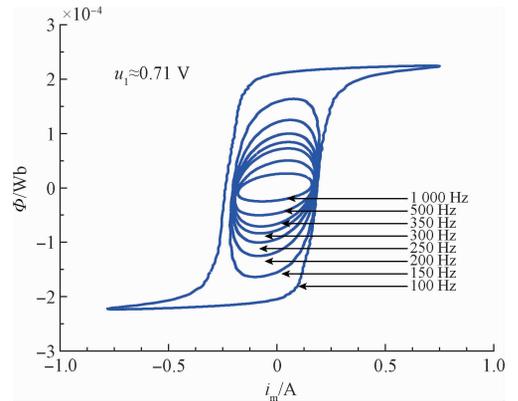


图3 u_1 有效值保持不变时频率变化对磁滞回线的影响

Fig.3 Influence of frequency on hysteresis loop when the RMS of u_1 keeps unchanged

假设铁心中的磁通 ϕ 按正弦变化,由式(2)可得不同频率下的最大磁通 ϕ_{max} 为:

$$\phi_{max} = \frac{u_1}{\sqrt{2}\pi f N_1} \quad (3)$$

由式(3)可知,当感应电压 u_1 保持不变而频率增大时,最大磁通 ϕ_{max} 将减小,磁滞回线面积减小, i_m 对应减小。

在图2中同时调节电压源输出幅值和频率,并保证 i_m 峰值保持不变,不同频率下的磁滞回线轨迹如图4所示。

从图4可看出在 i_m 峰值相同的情况下,磁滞回线面积随着频率增加而增加。频率变化引起的涡流损耗、异常损耗及总损耗可表示为式(4)~(6)^[16]。

$$P_{edd} = \frac{dW_{edd}}{dt} = \frac{d^2}{2\rho\beta} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (4)$$

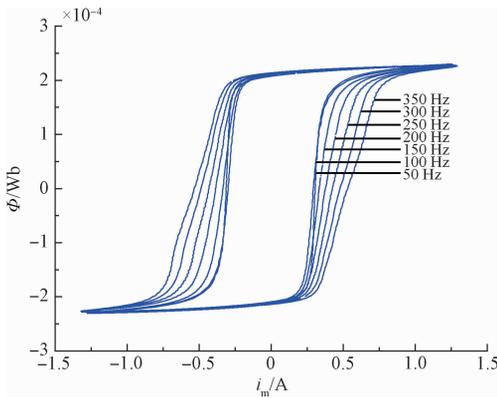


图4 i_m 峰值保持不变时频率变化对磁滞回线的影响

Fig.4 Influence of frequency on hysteresis loop when the peak value of i_m keeps unchanged

$$P_{exc} = \frac{dW_{exc}}{dt} = \left(\frac{GSH_0}{\rho}\right)^{1/2} \left(\frac{dB}{dt}\right)^{3/2} \quad (5)$$

$$P = \oint HdB = P_{hys} + P_{edl} + P_{exc} \quad (6)$$

式(4)~(6)中各参数物理意义参见文献[16]。式(4)、(5)说明频率增加将引起磁感应强度变化率增加,造成涡流损耗和异常损耗增加。式(6)说明在 i_m 峰值相同的情况下造成磁滞回线面积变大。

2.3 磁滞回线形状对谐波传变特性的影响

由上分析可见,当频率增加时,磁滞回线横向面积增大,而纵向面积减小。如果同时存在基波和多种谐波,磁滞回线形状将发生多种变化。

铁心未饱和时的磁滞回线如图5所示。图中斜直线代表理想线性传变关系,即励磁电流与磁通是线性变换关系,此时一次电流和二次电流之间仅存在比值误差但不存在相位误差。当磁滞回线是椭圆轨迹时,二次电流与一次电流之间存在相位误差。

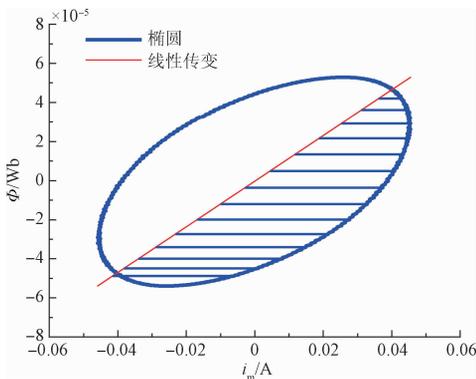


图5 椭圆形轨迹传变特性

Fig.5 Elliptic track transfer characteristic

在图2中设置电压源输出,在较大的输出电压下得

到铁心饱和时的磁滞回线如图6(a)所示;以及在基波叠加2次与基波叠加3次谐波输出电压下,铁心未饱和时的磁滞回线如图6(b)与图6(c)所示。

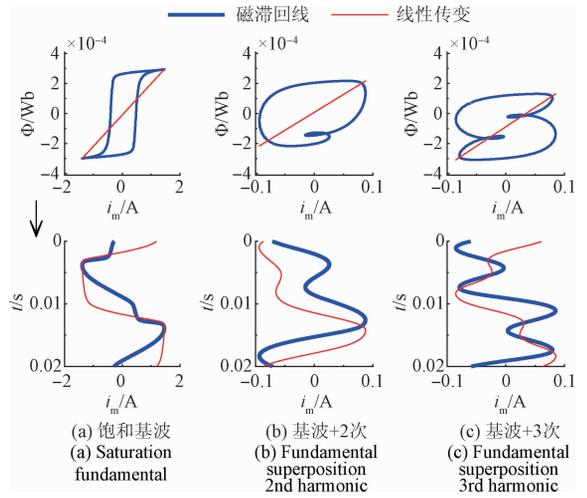


图6 复杂多变的磁滞回线轨迹传变特性

Fig.6 Diverse hysteresis loop track transfer characteristics

这种情况反映在CT的传变特性上表征为:铁心饱和与否则是影响CT谐波传变误差的因素之一。但即使铁心不饱和,在基波与谐波叠加以后也可能造成谐波传变误差。

2.4 磁滞回线对称性对谐波传变特性的影响

在图2中调节电压源输出,交流分量5V保持不变,直流分量分别为0、3、5、7V,不同直流分量下的磁滞回线轨迹如图7所示。

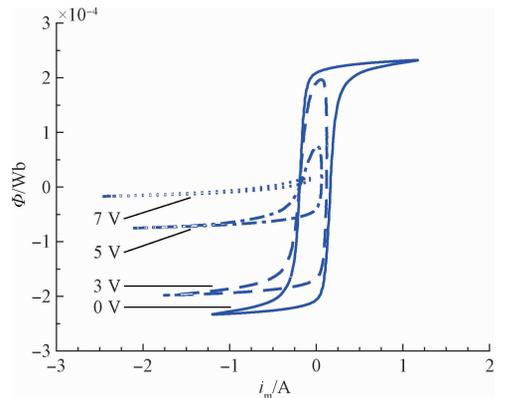


图7 直流分量变化对磁滞回线的影响

Fig.7 Influence of DC component on hysteresis loop

从图7中看出,当直流分量为0V时,磁滞回线具有半周期负对称关系,励磁电流具有如下关系 $i_m(t) = -i_m(t + T/2)$ 。将 i_m 前半周期和后半周期分解成傅里叶级数,在整个周期内偶次谐波将相互抵消,只含奇次谐波。当直流分量不为0V时,直流分量造成明显的非对称磁滞回线,励磁电流不再满足半周期负对称关系,偶次

含量不再相互抵消。CT 运行于磁滞非对称状态将同时引起奇次、偶次谐波传变误差。

在图 2 中调节电压源输出, 交流分量 5 V、50 Hz, R 为 100 Ω , 直流分量输出 0 ~ 4 V, i_m 中 2 ~ 5 次谐波含量如图 8 所示。

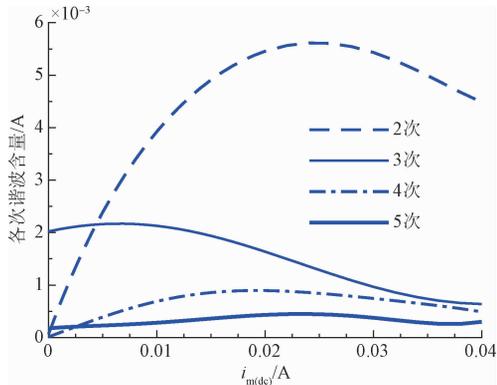


图 8 直流分量对励磁电流谐波含量的影响
Fig. 8 Influence of DC component on harmonic content of excitation current

由图 8 可见, 如果没有施加直流分量, i_m 在铁心饱和时只含奇次谐波分量。随着直流分量增加, i_m 中 2、4 次谐波含量显著增加, 3、5 次谐波含量变化较小。直流分量超过 0.025 A 时, 直流偏磁造成铁心导磁性能明显下降, 各次谐波含量都减小。

综上所述, CT 运行于对称磁滞回线时, 铁心饱和时 i_m 只含奇次谐波电流; 运行于直流分量引起的非对称磁滞回线时, i_m 将同时含有奇次与偶次谐波电流。

3 CT 谐波误差检测

CT 谐波误差检测实验原理如图 9 所示, 其中谐波电流源为 Fluke6100A。采用模数转换芯片 AD7606 同时采集一、二次模拟量电压信号并转换为数字量信号。采用应用较为广泛的 STM32F407 微控器作为数据处理单元^[17-18], 利用快速傅里叶算法计算各次谐波。实验中取 100 个周期的谐波计算结果取平均值作为检测结果。经精度测试, 以上系统 2 ~ 50 次谐波检测结果符合电能质量测量 A 级精度要求, 2 ~ 10 次谐波检测结果与 Fluke6100A 标准源直接对比误差小于 $\pm 0.2\%$ 。

根据国标文献[1]对比值误差的定义, 谐波比值误差 $e_{(h)}\%$ 可相应表示为:

$$e_{(h)}\% = \frac{ki_{2(h)} - i_{1(h)}}{i_{1(h)}} \times 100 = -\frac{i_{m(h)}}{i_{1(h)}} \times 100 \quad (7)$$

式中: h 表示谐波次数, k 为一、二次绕组的匝数比, $i_{1(h)}$ 、 $i_{2(h)}$ 、 $i_{m(h)}$ 分别为一次、二次、励磁谐波电流。谐波比值误差为一、二次谐波电流的相对运算, 因此由系统引起的误

差在谐波比值误差上反映更小。

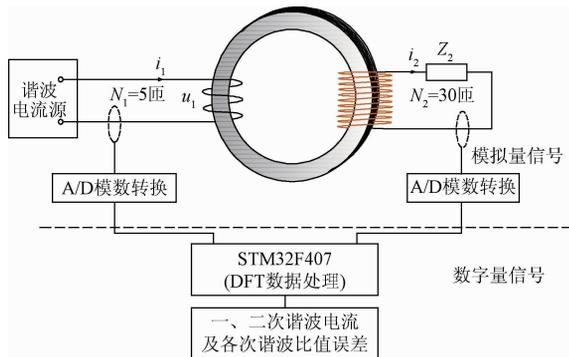


图 9 CT 谐波误差检测系统
Fig. 9 CT harmonic error detection system

4 CT 谐波比值误差分析

4.1 铁心饱和对谐波比值误差的影响

当阻性负载 R_2 分别为 0.20、0.40、0.56 Ω 时, 在 5% ~ 120% 额定工频电流范围内检测 CT 的比值误差, 结果如图 10 所示。

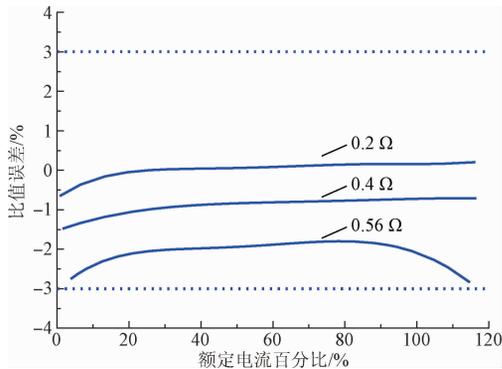


图 10 比值误差限值
Fig. 10 Ratio error limit

将 CT 一次电流等效为不受负载变化影响的理想电流源, 则 CT 磁滞特性等值电路如图 11 所示。

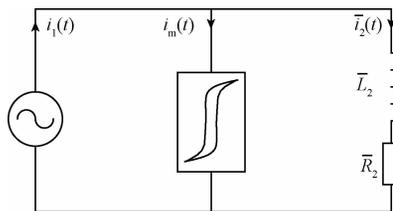


图 11 CT 磁滞特性等值电路
Fig. 11 Equivalent circuit of CT magnetic hysteresis characteristic

由等值电路图可知二次负载电阻越大 i_m 就越大,因此比值误差也越大。实验对象在阻性负载 0.56Ω 以内比值误差满足精确度3级要求。

在负载阻抗固定的情况下,当 i_1 幅值较小不足以使得铁心饱和时,磁滞回线如图5中的椭圆轨迹,此时 i_m 、 i_2 都为同频正弦波形电流,CT不存在谐波比值误差。当 i_1 增大使得铁心饱和时, i_m 将包含谐波分量,即使 i_1 为工频正弦波形, i_2 也将含有谐波分量,如图6(a)所示。当 i_1 含有谐波电流时,磁滞回线随着 i_1 谐波分量的不同而千变万化,如图6(b)、(c)所示。此时 i_m 中包含更多的谐波分量,从而导致谐波传变误差。

4.2 负载大小对谐波比值误差的影响

阻性负载 R_2 为 0.2 、 0.4 、 0.56 、 1.60Ω 时,基波电流 6 A 、谐波电流 3 A 、基波叠加单次谐波谐波次数变化时,谐波比值误差变化如图12所示。

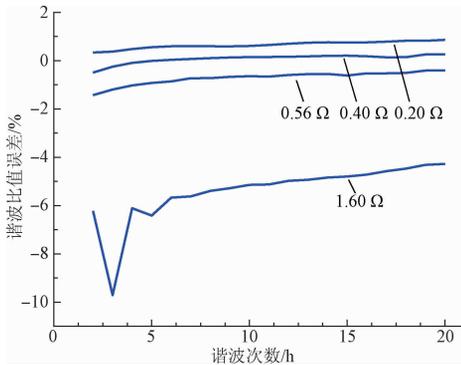


图12 不同负载对谐波比值误差的影响

Fig. 12 Influence of load on harmonic ratio errors

从图12可以看出,负载较小时 i_m 较小,磁滞回线未饱和, i_m 并不产生谐波。在负载较小时谐波比值误差随着谐波次数的增加而减小。

随着负载增加 i_m 增加,当增加到铁心饱和阶段时,饱和和磁滞特性引起 i_m 产生谐波,在对称的情况下 i_m 含有奇次谐波,因此明显引起3、5次谐波比值误差增大。

4.3 频率变化对比值误差的影响

负载分别为阻性负载 0.56Ω 和阻感性负载 $0.45 + j0.035 \Omega$,一次电流幅值保持 6.708 A 不变,频率变化范围为 $50 \sim 1000 \text{ Hz}$,一、二次电流比值误差变化如图13所示。

当负载为阻性时,随着频率增加一、二次电流比值误差逐渐减小。根据式(3)可知,最大磁通 ϕ_{max} 随着 f 增加而减小,造成磁滞回线面积相应减小, i_m 相应减小,比值误差减小。

当负载为阻感性时,比值误差在 200 Hz 以内随着频率增加而减小。但高于 300 Hz 时,比值误差随着频率的增加而增大。这是由于随着频率的增加,感性负载相应

增大。当高于 300 Hz 时,铁心逐步饱和,进而造成 i_m 增加,因此一、二次电流比值误差增加。

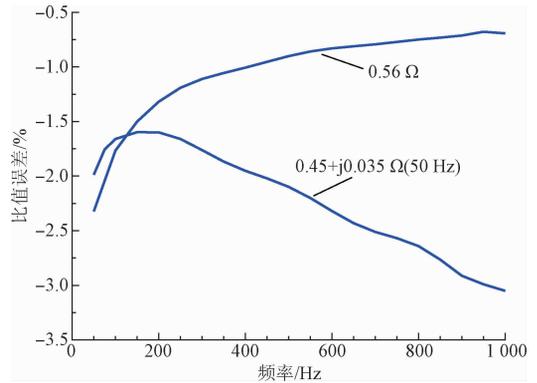


图13 频率变化对一、二次电流比值误差的影响

Fig. 13 Influence of frequency on primary and secondary current ratio errors

4.4 谐波相角变化对谐波比值误差的影响

选用基波分别叠加2、3次谐波分析谐波相角对谐波比值误差的影响。一次基波电流为 6 A ,负载为 0.56Ω ,分别叠加单次谐波 3 A ,谐波相角从 0° 增加到 360° 时,谐波相角变化对谐波比值误差的影响如图14所示。图中虚线表示一次电流 6.708 A ,频率为 100 与 150 Hz 下测量的比值误差。

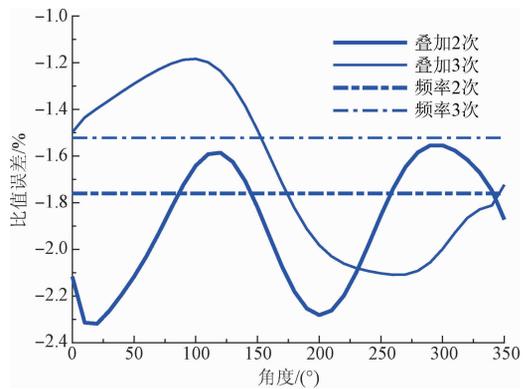


图14 谐波相角对2、3次谐波比值误差影响

Fig. 14 Influence of harmonic phase on 2nd and 3rd harmonic ratio errors

从图14可以看出,CT谐波比值误差随着谐波相角不同而变化。这主要是由于谐波相角变化使得一次侧电流波形有较大差异,造成铁心的磁滞回线不同,引起CT谐波传变误差变化。

这种现象表明,频率响应法测量的比值误差无法全面反映CT在谐波工况下的传变误差,零度相角并非是谐波测量误差的最大值。

4.5 基波电流对谐波比值误差的影响

阻性负载 $R_2 = 0.56 \Omega$ 时,谐波电流 3 A,基波电流变化范围 1 ~ 15 A,基波叠加单次谐波时各次谐波比值误差变化如图 15 所示。

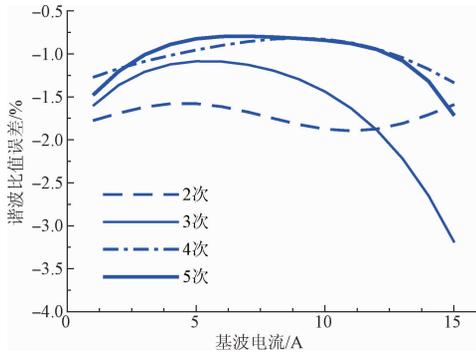


图 15 基波电流对各次谐波比值误差的影响

Fig. 15 Influence of fundamental current on harmonic ratio errors

从图 15 看出,在基波小于 5 A 时,各次谐波比值误差都随着基波电流的增加而减小,与图 10 中额定电流 0% ~ 20% 范围内的比值误差减小是一致的。这是由于 CT 在铁心未饱和前,磁导率随着一次电流的增加而增大^[19],此时比值误差随着磁导率的增大而减小。随着基波电流进一步增大,磁通逐渐饱和, i_m 产生奇次谐波,因此 3 次、5 次谐波比值误差明显增加。在一次电流波形接近对称的情况下, i_m 产生的偶次谐波含量较小,因此 2 次、4 次谐波的比值误差变化不明显。

4.6 直流电流分量对二次电流各次电流的影响

在图 9 中铁心中磁通 ϕ 与 u_2 是微分关系,因此 u_2 、 i_2 中不含直流分量,此时 i_1 的直流分量直接为励磁电流,容易引起铁心饱和,进而导致 i_m 含有各次谐波。阻性负载 R_2 为 0.56Ω 时,基波电流 6A,依次叠加 0 ~ 6 A 的直流电流分量,直流电流分量变化对 i_2 中 1 ~ 5 次电流影响如图 16 所示。

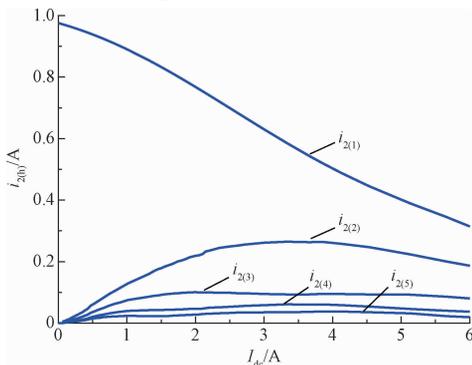


图 16 直流分量对二次电流中各次电流的影响

Fig. 16 Influence of DC component on the currents in secondary current

从图 16 可以看出,随着一次侧直流电流分量的增加,二次侧电流同时产生奇、偶次谐波电流。其中 2 次谐波含量最大,偶次谐波含量大于奇次谐波含量。当直流分量大于 3.5 A 时,二次侧电流中的各次谐波含量开始明显下降。这是由于直流分量较大时引起严重的直流偏磁,造成铁心导磁性能明显下降。因此,CT 传变含直流分量的谐波电流时,直流分量将引起显著的谐波传变误差。

5 结 论

本文通过实验观测了电流互感器铁心磁滞传变特性,分析了磁滞传变特性对电流互感器谐波传变的影响规律;实现了高精度的电流互感器谐波误差检测实验系统,对不同工况下电流互感器谐波比值误差进行测量,得到如下结论。

1) 二次负载为阻性时,电流互感器一、二次电流比值误差在低频范围内随着频率增加而减小;二次负载为阻感性时,频率较高时比值误差随着频率增加而增大。

2) 基波叠加单次谐波时,在负载较小时,随着谐波次数的增加,各次谐波比值误差减小;在负载较大引起铁心饱和时,励磁电流产生谐波,此时奇次谐波比值误差明显增加。

3) 基波叠加单次谐波时,谐波比值误差随着叠加谐波的相角而发生变化,零度角并非是谐波比值误差的最大值。

4) 基波叠加单次谐波铁心饱和时,奇次谐波比值误差随着基波电流增加而增大,偶次谐波比值误差随着基波电流的增加而变化不大。

5) 基波叠加直流分量时,非对称磁滞回线导致二次电流含有谐波电流,将显著增大谐波传变误差。

参考文献

- [1] 全国互感器标准化技术委员会. GB 20840. 2-2014 互感器(第 2 部分): 电流互感器的补充技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
National Standardization Technical Committees of Transformer. GB 20840. 2-2014 Instrument transformers-Part2: Additional requirements for current transformer[S]. Beijing: Standard Press of China, 2014.
- [2] 全国互感器标准化技术委员会. GB/T 20840. 8-2007 互感器(第 8 部分): 电子式电流互感器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
National Standardization Technical Committees of Transformer. GB/T 20840. 8-2007 Instrument transformers-Part8: Electronic current transformers[S].

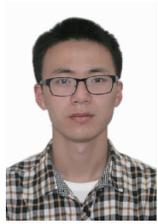
- Beijing: Standard Press of China, 2007.
- [3] CATALIOTTI A, CARA D D, EMANUEL A E, et al. A novel approach to current transformer characterization in the presence of harmonic distortion [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5):1446-1453.
- [4] CATALIOTTI A, CARA D D, EMANUEL A E, et al. Characterization of clamp-on current transformers under nonsinusoidal conditions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1):373-380.
- [5] ACKERMANN D W. Current transformer measurements of distorted current waveforms with secondary load impedance [C]. IEEE 5th Africon Conference, 1999: 765-768.
- [6] MAHESH G, GEORGE B, JAYASHANKAR V, et al. Instrument transformer performance under distorted conditions [C]. Proceedings of the IEEE Indicon, 2005: 468-471.
- [7] 郑涛,陈佩璐,刘连光,等. 计及直流偏磁的电流互感器传变特性对差动保护的影响 [J]. 电力系统自动化, 2012,36(20):89-93.
ZHENG T, CHEN P L, LIU L G, et al. Transferring characteristics of current transformer affected by DC magnetic bias and its impact on differential protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20):89-93.
- [8] SOINSKI M, PLUTA W, ZUREK S. Metrological attributes of current transformers in electrical energy meters [J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2012,44(3):279-284.
- [9] 宁康红,侯铁信,舒乃秋,等. 一种电力互感器校验的新方法 [J]. 电力系统自动化,2003,27(9):70-72.
NING K H, HOU T X, SHU N Q, et al. A new verifying method for power transformer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9):70-72.
- [10] 李童杰,张晓更. 基于 DSP 的电子式电流互感器校验仪的研制 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (8): 1695-1699.
LI T J, ZHANG X G. Design and realization of electronic current transformer calibrator based on DSP [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29 (8): 1695-1699.
- [11] 袁亮,张旭乐,张贺,等. 基于多量程控制罗氏线圈标准电流互感器研究 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(11):88-93.
YUAN L, ZHANG X L, ZHANG H, et al. Research on multiscale control standard current transformer by Rogowski coil [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(11):88-93.
- [12] 冯宇,王晓琪,汪本进,等. 采用等安匝合成电源的电流互感器谐波特性测量方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015,35(12):3154-3160.
FENG Y, WANG X Q, WANG B J, et al. A measurement method of current transformers' harmonic characteristics by using equal ampere-turns synthetic power [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (12): 3154-3160.
- [13] 张鸿博,蔡晓峰,鲁改凤. 基于双窗全相位 FFT 双谱线校正的电力谐波分析 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12):2835-2841.
ZHANG H B, CAI X F, LU G F. Double-spectrum-line correction method based on double-window all-phase FFT for power harmonic analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12):2835-2841.
- [14] 刘晏池,王雪,刘佑达,等. 基于分布式压缩感知的智能用电网络高分辨率谐波与间谐波测量 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10):2161-2166.
LIU Y CH, WANG X, LIU Y D, et al. High-resolution harmonic and interharmonic measurement in smart power utilization network based on distributed compressed sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10):2161-2166.
- [15] 赵婵娟,王建平,孙伟,等. 基于相关性分布式卡尔曼滤波的谐波检测方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(9):1333-1341.
ZHAO CH J, WANG J P, SUN W, et al. Harmonic detection method based on distributed related Kalman filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9):1333-1341.
- [16] BERTOTTI G. Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials . I. theoretical considerations [J]. Journal of Applied Physics, 1985, 57(6):2110-2117.
- [17] 姬宪法,李传江. 基于 STM32 的智能线性位移传感器信号处理系统设计 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(11): 109-112.
JI X F, LI CH J. Design of signal processing system for intelligent linear displacement sensor based on the STM32 [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(11):109-112.
- [18] 杨奕,杨川,周川云. 基于 STM32 的低功耗红外光通信系统设计 [J]. 中国测试, 2015, 41(9):96-100.

YANG Y, YANG CH, ZHOU CH Y. Design of low-power infrared light communication devices based on STM32[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(9): 96-100.

- [19] 赵修民. 电流互感器与电流比例标准[M]. 北京:中国电力出版社,2014:15-16.

ZHAO X M. Current transformer and current ratio standard[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2014: 15-16.

作者简介



陈利翔,2011 年于厦门理工学院获得学士学位,现为福州大学硕士研究生,主要研究方向为电能质量。

E-mail:chen. lx. ok@163. com

Chen Lixiang received his B. Sc. degree from Xiamen University of Technology in 2011.

Now he is a master student in Fuzhou University. His main research interest is power quality.



邵振国(通讯作者),分别在 1992 年、2001 年和 2004 年在东南大学获得学士、硕士和博士学位,现为福州大学教授,主要研究方向为电能质量及电力系统稳定性与控制。

E-mail:shao. zg@fzu. edu. cn

Shao Zhenguo (Corresponding author) received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees all from Southeast University in 1992, 2001 and 2004, respectively. Now he is a professor in Fuzhou University. His main research interest includes power quality, and power system stability and control.