

DOI: 10.7667/PSPC171300

一种新型抗直流电流互感器检定系统的研究

王保帅, 肖霞, 徐雁, 宋宏天

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对目前抗直流互感器缺乏相关标准和性能检定系统的现状, 在传统互感器校验法的基础上, 提出一种无需标准互感器的数字式直接校验法。通过分析现有标准, 利用半波电流进行检定, 提出抗直流互感器在半波电流下的误差极限。通过频谱分析, 得出了抗直流互感器和传统电磁式互感器在半波电流下的传变特性。为减小频谱泄露影响, 采用加窗插值傅里叶分析算法进行比差的计算, 并推导出相关的修正式。进行了检定系统的软硬件设计和样机的研制。实验测试表明: 该检定法可提高检定系统的可靠性, 具有较好的稳定性、可操作性和实用性。

关键词: 抗直流互感器; 检定系统; 数字式校验; 半波电流; 傅里叶分析

Research on test system of a novel anti-DC current transformer

WANG Baoshuai, XIAO Xia, XU Yan, SONG Hongtian

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the current situation of lack of relevant standards and performance testing devices for anti-DC transformers, and combining with the traditional transformer calibration method, a digital direct calibration method without standard transformer is proposed. Through the analysis of the existing standard and the use of half-wave current, this paper presents the error limit of anti-DC transformer under half-wave current. Through the spectrum analysis, the transmission characteristics of anti-DC and traditional electromagnetic transformers under half-wave current are obtained. In order to reduce the influence of spectrum leakage, the windowing interpolation Fourier analysis algorithm is used to calculate the ratio difference, and the relevant amendments are derived. The hardware and software design of the test system and the prototype development are carried out. Experimental results show that this method can improve the reliability of the test system and has good stability, operability and practicability.

This work is supported by Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51307066).

Key words: anti-DC current transformer; verification device; digital calibration; half wave current; Fourier analysis

0 引言

当用电设备侧的非线性负荷大量工作时, 会在电网中产生含有直流分量的谐波电流^[1]。当其通过电流互感器(Current Transformer, CT)的一次绕组时, 直流分量会使得电磁式电流互感器工作在接近饱和和区的状态, 二次电流将会产生严重畸变且幅值大幅下降, 从而导致计量失准^[2]。此外, 线路故障以及交直流线路的耦合都会在系统中产生直流分量。甚至有不法分子为了窃电, 在测量回路中人为加入直流分量^[3-4]。可见, 直流分量下电流互感器的计量特性研究应引起足够重视。

关于直流偏磁对计量用电磁式CT传变特性及对电能计量的影响, 国内外的相关研究结果表明^[3-8], 在CT一次存在直流分量时, 直流偏磁磁通与交流磁通相叠加, 励磁电流呈现出正负不对称的形状, 产生大量谐波, 且CT的角差会向正方向变化, 比差则向负方向变化, 这种影响会随着一次侧直流分量的增加而增长, 导致计量出现严重偏差, 对电网造成不可估量的损失。

为解决此问题, 国内外相继展开了抗直流分量互感器的研究。抗直流分量的电流互感器在一次电流含有直流分量的情况下, 仍具有较为良好的工作状态, 二次侧输出电流能较好地还原一次电流的波形。但目前抗直流互感器的抗直流性能还缺乏相关

的标准、规程及检测装置, 迫切需要相关的检定系统^[2]。本文基于传统互感器校验方法提出了一种无需标准互感器的数字式直接校验法, 并进行了样机的设计。经实验验证, 该检定系统装置可操作性强, 使用方便, 具有广泛的市场应用前景。

1 抗直流电流互感器

现有标准技术文件中缺乏电流互感器在含直流分量的交流环境中技术指标的要求。在 GB/T 17215.321-2008《交流电测试设备 特殊要求 第 21 部分: 静止式有功电能表(1 级和 2 级)》中^[9], 进行直流与偶次谐波的试验时, 采用的是半波电流波形。并且该标准规定在交流电路中存在直流和偶次谐波分量时, 1 级有功电能表的误差极限是 $\pm 3\%$ 。虽然是电能表的标准, 但对互感器具有一定的参考价值, 所以本文将抗直流分量互感器在半波电流下的比值误差极限设定为 $\pm 3\%$ 。

当在互感器一次绕组施加半波电流时, 传统 CT 以及抗直流 CT 的二次电流波形如图 1 所示, 三者的频谱分析结果如图 2 所示。

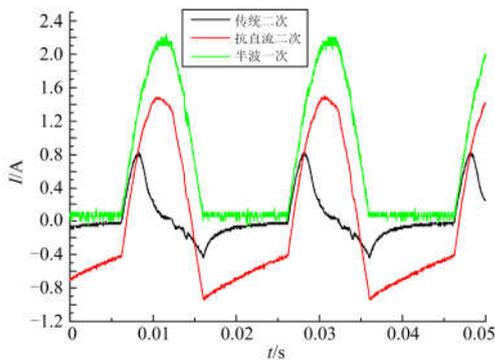
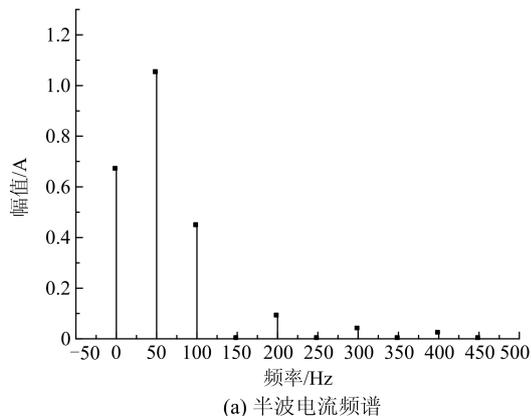
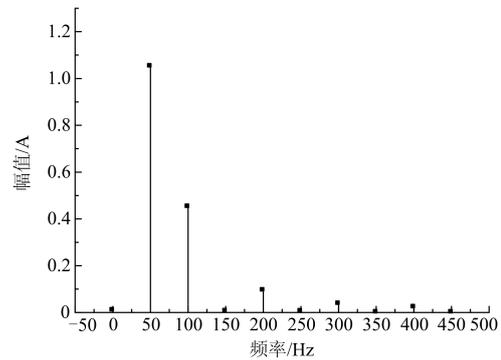


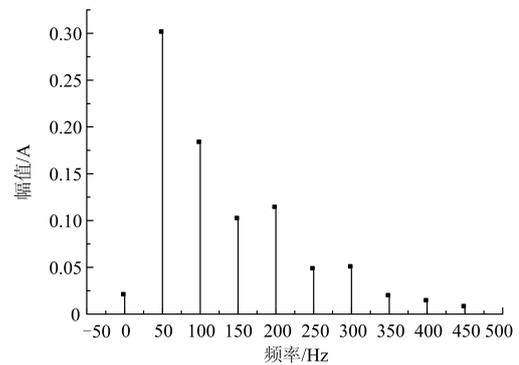
图 1 半波电流下传统 CT 和抗直流 CT 的二次电流
Fig. 1 Secondary current waveform of traditional CT and anti-DC CT under half-wave current



(a) 半波电流频谱



(b) 抗直流 CT 二次电流频谱



(c) 传统 CT 二次电流频谱

图 2 各电流波形的频谱

Fig. 2 Spectrum of each current waveform

峰值为 E 的半波信号的傅里叶级数展开式为

$$\frac{E}{\pi} + \frac{E}{2} \sin(\omega_0 t) + \frac{2E}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{1-4k^2} \cos(2k\omega_0 t) \quad (1)$$

由式(1)可见, 半波信号中只含有直流分量、基波及偶次谐波分量, 且直流分量占半波有效值的 63.66%。图 1 中, 当半波电流通过一次绕组时, 传统 CT 二次电流的正负半周波形已完全畸变; 抗直流 CT 的二次电流波形较好。又由图 2 可知, 传统 CT 的二次侧已经产生了一次侧没有的奇数次谐波且基波信息出现较大偏差; 抗直流 CT 的二次电流过滤掉了一次的直流分量, 且能正确传变一次的基波和谐波信息。

2 互感器检验方法

传统互感器校验仪的校验方法主要有两大类: 直接比较法和差值法^[10-13]。早期的互感器校验仪主要是直接比较法, 即将标准互感器和被检互感器的二次电压或电流, 分别送入互感器校验仪, 通过电阻分压、阻容分压或磁势比较仪等测量电路, 测得的差信号经过刻度变换就是被校互感器相对于标准互感器的比差与角差。常用的主要有磁势比较型和交流电桥型^[13]。

差值法是将标准互感器的输出经过处理后和被校互感器的输出作差,再将差值信号和标准信号一起送到校验仪^[13]。差值法在互感器校验仪中应用广泛,常用的主要有电位比较型、电流比较型、电桥比较型和数字型,其示意图如图3所示。

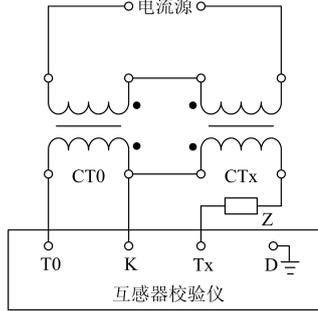


图3 差值法示意图

Fig. 3 Diagram of difference method

上述互感器检验法全部是采用标准互感器,而且是基于电磁感应的取样。一方面,目前缺乏抗直流标准互感器;另一方面,电磁感应取样方式对全波正弦信号具有较高的传递特性,但对于含有直流分量的半波电流信号传变特性较差。所以传统的互感器校验方法都不适用于抗直流互感器的检定。

除电磁感应取样外,电阻取样方式被广泛应用于各种电流波形的取样中,选择具有合适阻值特性、温度特性和频率特性的取样电阻即能满足要求。基于精密电阻取样方式,并结合微控制器技术,本文提出一种新颖的数字式直接检定方法,其接线简单,智能化程度高,操作界面友好。数字式直接测试法的结构框图如图4所示。

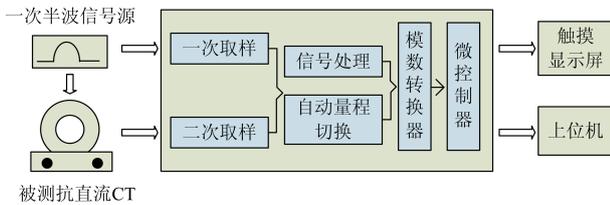


图4 数字式直接检定法的结构框图

Fig. 4 Block diagram of digital direct test method

3 系统算法研究

本文提出的数字式直接检定法,即在一次侧施加半波电流,通过微控制器算法得到一次和二次的基波电流信息,经系统处理后,得到被检互感器的比差和角差,通过比差和角差进而判定抗直流电流互感器的性能。所以高精度的数据处理算法是检定系统的关键部分,目前系统采用的主要有均方根算

法、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)和加窗插值FFT等。

3.1 均方根算法

交流电的有效值(Root Mean Square)等于在同一电阻性负载上与其产生等热量的直流量的大小^[14-15]。其定义由式(2)式(3)给出。

$$\int_0^T i^2 R dt = I^2 RT \quad (2)$$

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (3)$$

将式(3)中的电流进行 N 点离散化,可得定义计算方法如式(4)。

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i^2(n)} \quad (4)$$

均方根算法只要满足奈奎斯特采样条件就能得到有效值,但根据有效值的定义,数字测量系统必须满足整周期采样条件,即采样周期必须等于交流信号周期的整数倍^[16]。但由于基频的波动性,在采样频率一定的情况下,采样点数与采样间隔的乘积很难完全等于信号周期,从而产生非同步误差。

3.2 双谱线插值FFT算法

快速傅里叶变换在非同步采样下,同样存在频谱泄露现象,目前多采用加窗插值算法^[16-25]来降低频谱泄露的影响。

含谐波信号在时域中的一般表达式为

$$x(t) = \sum_{m=1}^H A_m \cos(2\pi f_0 m t + \varphi_m) \quad (5)$$

式中: m 是谐波次数; H 是谐波总次数; f_0 是基波频率; A_m 和 φ_m 分别为谐波的幅值和初相位。

以采样频率 f_s 对信号进行 N 点采样,得离散序列为

$$x(n) = \sum_{m=1}^H A_m \cos\left(\frac{2\pi f_0 m n}{f_s} + \varphi_m\right) \quad (6)$$

对 $x(n)$ 在时域加窗后进行傅里叶变换得

$$X(\omega) = \sum_{m=1}^H \frac{A_m}{2j} \left[e^{j\varphi_m} W(\omega - \omega_0) - e^{-j\varphi_m} W(\omega + \omega_0) \right] \quad (7)$$

忽略负频点谱峰的影响,并以第 m 次谐波为例,进行分析得

$$X(k\Delta f) = \frac{A_m}{2j} e^{j\varphi_m} W\left[\frac{2\pi}{N}(k - k_m)\right] \quad (8)$$

式中: $\Delta f = f_s/N$ 是频谱分辨率; $W(\omega)$ 是窗函数的频谱函数。

在对信号进行非同步采样时,谱峰频率 $f_m = k_m \Delta f$ 一般不在离散谱线的频点上^[17-25]。设目标频点附近幅值最大和次最大的谱线分别为 k_1 和

k_2 , 当 $k_1 < k_m < k_2 = k_1 + 1$ 时, 这两根谱线的幅值分别为 $y_1 = |X(k_1 \Delta f)|$ 和 $y_2 = |X(k_2 \Delta f)|$ 。引入变量

$$\beta = \frac{y_2 - y_1}{y_2 + y_1} \text{ 和 } \alpha = (k_m - k_1 - 0.5) \in (-0.5, +0.5)。$$

令

$$u = \left| W \left[\frac{2\pi(0.5 - \alpha)}{N} \right] \right|, \quad v = \left| W \left[\frac{2\pi(-0.5 - \alpha)}{N} \right] \right|$$

则由式(8)可得

$$\beta = \frac{u - v}{u + v} \quad (9)$$

从式(9)中解得 $\alpha = g(\beta)$, 从而得到频率修正式

$$f_m = k_m \Delta f = (\alpha + k_1 + 0.5) \Delta f \quad (10)$$

对 k_1 和 k_2 两谱线加权得幅值修正式

$$A_m = \frac{2(y_1 + y_2)}{u + v} = \frac{y_1 + y_2}{N} h(\alpha) \quad (11)$$

式中, 幅值修正式为

$$h(\alpha) = \frac{2N}{u + v} \quad (12)$$

由式(8)得相位修正式为

$$\varphi_m = \arg[X(k_1 \Delta f)] + \frac{\pi}{2} - \pi(\alpha + 0.5) \quad (13)$$

当 $k_2 < k_m < k_1 = k_2 + 1$ 时, 同理可推导出频率、幅值、相位的修正式分别为

$$f_m = k_m \Delta f = (k_1 - \alpha - 0.5) \Delta f \quad (14)$$

$$A_m = \frac{y_1 + y_2}{N} h(\alpha) \quad (15)$$

$$\varphi_m = \arg[X(k_1 \Delta f)] + \frac{\pi}{2} + \pi(\alpha + 0.5) \quad (16)$$

窗函数的选取要求主瓣窄, 旁瓣峰值小且衰减速率大。因此, 本文选用四项三阶 Nuttall 窗^[18], 其旁瓣衰减速率达 30 dB/oct。为减少计算工作量, 本文利用多项式曲线拟合函数 polyfit(), 求出的频率和幅值的修正式为

$$\alpha = g(\beta) = 2.954\ 945\ 066\ 150\beta +$$

$$0.176\ 736\ 800\ 282\beta^3 + 0.091\ 517\ 547\ 026\beta^5$$

$$h(\alpha) = 3.209\ 758\ 149\ 990 +$$

$$0.918\ 952\ 623\ 132\alpha^2 + 0.145\ 865\ 237\ 490\alpha^4$$

4 系统实验研究

4.1 系统实现

本文设计的抗直流电流互感器检定系统以 MSP430F6459 为主控单元, 以 AD7606 为同步采样单元。考虑了 30:1、40:1、50:1、60:1 和 80:1 五种

互感器的变比, 并且考虑了 5%~180% U_N 的动态范围。检定系统整体的原理框图如图 5 所示。一次分流器采用大功率精密分流电阻, 其阻值为 2 m Ω , 阻值精度达到 $\pm 0.1\%$, 温度系数为 0~ ± 5 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, 最大功率为 500 W, 内置 Pt100 传感器用于监测分流器的温度。二次取样电阻采用保型封装高精密度电流检测箔电阻, 阻值为 200 m Ω , 阻值精度达到 $\pm 0.02\%$, 额定功率 2 W, 温度系数为 ± 2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

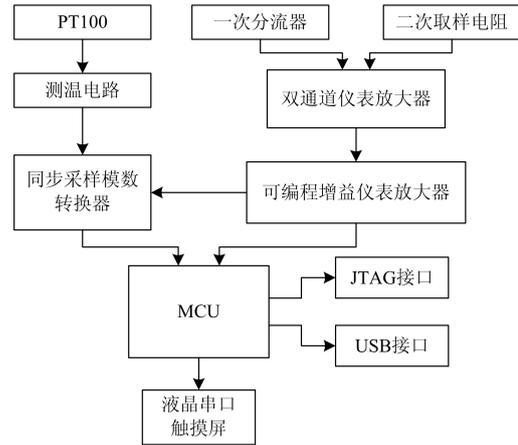


图 5 检定系统整体框图

Fig. 5 Block diagram of the test system

系统软件整体的流程框图如图 6 所示。测试系统装置的样机如图 7 所示。

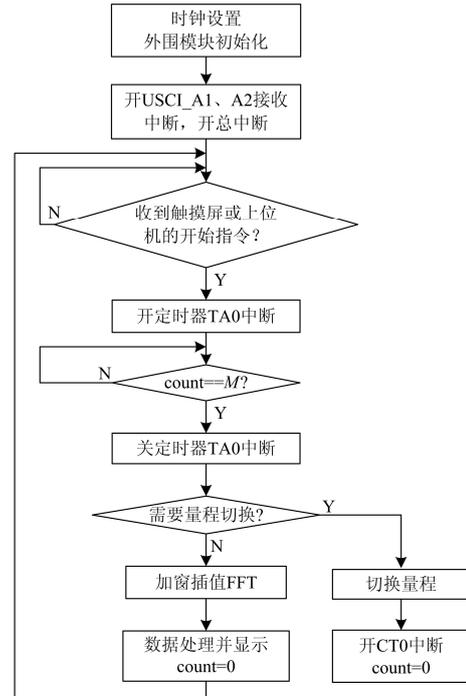


图 6 系统流程图

Fig. 6 Flow chart of the system



图 7 检定系统样机
Fig. 7 Tester prototype

4.2 系统误差分析

检定系统总的误差来源主要有：一次和二次的取样电阻，模数转换器和系统算法。对于取样电阻，设其工作温度变化范围达到 80℃，则一次分流器由温度变化所引起的阻值最大变化为 $\pm 5 \text{ ppm}/^\circ\text{C} \times 80^\circ\text{C} = \pm 0.04\%$ ，再考虑其 $\pm 0.1\%$ 的阻值精度，综合引入的误差为 $\pm 0.14\%$ 。同理，二次取样电阻由温度变化及初始阻值精度所引入的误差为 $\pm 0.036\%$ 。

系统 ADC 的积分和微分非线性误差之和为 $\pm 1\text{LSB}$ (0.0015%)。检定系统内算法采用双谱线加窗插值 FFT 算法，验证其准确度的实验如图 8 所示。其中以泰克 Tektronix 公司 AFG3022 任意函数发生器作为测试信号源，以泰克 Keithley2000 系列的 6 位半数字万用表的结果作为比较。实验结果如表 1 所示。



图 8 实验接线图
Fig. 8 Experimental wiring diagram

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

数字万用表测得值/V	本文算法测得值/V	相对误差/%
0.024 637	0.024 634	-0.012
0.035 244	0.035 242	-0.005
0.070 641	0.070 634	-0.010
0.105 87	0.105 880	0.009
0.176 61	0.176 592	-0.009
0.212 4	0.212 387	-0.006
0.264 98	0.265 001	0.008
0.303 91	0.303 931	0.005

由表 1 中的实验结果可知，本算法的准确度在 $\pm 0.008\%$ 左右。总的系统误差远小于 $\pm 3\%$ 的抗直流互感器误差极限。

4.3 实验研究

以某公司生产的 50:1 抗直流电流互感器为被检定对象，实验接线图如图 9 所示，结果如图 10 所示。



图 9 实验接线图
Fig. 9 Experimental wiring diagram

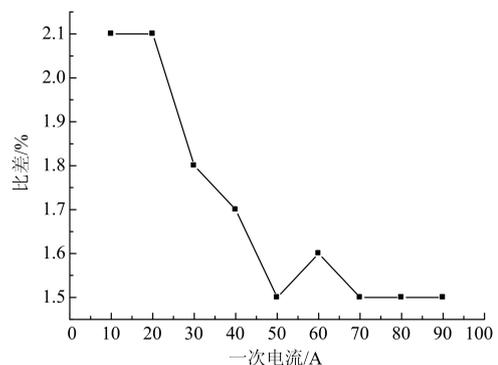


图 10 实验结果

Fig. 10 Experimental results

由实验结果可知，被检抗直流分量互感器的比差小于 $\pm 3\%$ ，测试合格，也说明了本文设计的抗直流互感器检定系统的可行性与可靠性。

5 结论

1) 从现有标准中找到了对抗直流分量互感器具有参考价值的误差指标，提出 $\pm 3\%$ 的误差极限，对抗直流互感器的标准完善具有参考意义。

2) 分析了半波电流下抗直流 CT 和传统 CT 的二次电流波形。与传统 CT 的计量出现严重失准相比，抗直流 CT 能正确转变一次的基波和各次谐波信息。

3) 在传统互感器校验方式的基础上，提出一种针对抗直流互感器的数字式直接检定法。提出以双谱线加窗插值法作为检定系统的算法，并且完成

了软硬件设计和样机的制作, 其系统误差远小于误差极限。理论分析和样机实验都验证了该检定系统的可行性和可操作性。下一步将主要完成抗直流互感器测试系统的溯源以及相关标准的制订等工作。

参考文献

- [1] 赵震宇, 朱亮, 祝婧, 等. 电流直流分量对低压电流互感器计量特性影响的试验研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 44-49.
ZHAO Zhenyu, ZHU Liang, ZHU Jing, et al. Experimental study on the influence of current DC component on the metrological characteristics of low-voltage current transformer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(20): 44-49.
- [2] 靳绍平, 李敏, 刘见, 等. 低压抗直流电流互感器及检测装置研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(13): 59-63.
JIN Shaoping, LI Min, LIU Jian, et al. Research on low anti-DC current transformer and its detection device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(13): 59-63.
- [3] 李长云, 李庆民, 李贞, 等. 直流偏磁条件下电流互感器的传变特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 127-132.
LI Changyun, LI Qingmin, LI Zhen, et al. Transfer characteristics of current transformers with DC bias[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 127-132.
- [4] 陈振廷. 计量用电流互感器的传变特性及对电能计量的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
CHEN Zhenting. Measurement current transformer transfer characteristics and its influence on electric energy metering[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [5] 田晓倩. 直流偏磁对电流互感器及电能计量的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
TIAN Xiaoqian. The influence of DC bias on current transformers and power metering[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [6] 谭炳源, 卢继平, 江波, 等. 直流偏磁对计量用电流互感器的性能影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1408-1413.
TAN Bingyuan, LU Jiping, JIANG Bo, et al. Analysis of influence of DC bias on instrument current transformer[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1408-1413.
- [7] 王振浩, 王学斌, 李国庆, 等. 计及直流偏磁的保护用电流互感器仿真与实验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 15-22.
WANG Zhenhao, WANG Xuebin, LI Guoqing, et al. Analysis of simulation and experiment on the characteristic of the current transformer used for protection affected by DC magnetic bias[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 15-22.
- [8] WU Yahui, DONG Xinzhou, MIRSAEIDI S. Modeling and simulation of air-gapped current transformer based on Preisach theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 111-121. DOI: 10.1186/s41601-017-0046-0.
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 交流电测试设备特殊要求第 21 部分: 静止式有功电能表(1 级和 2 级): GB/T 17215.321—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [10] 胡浩亮. 电流互感器分析仪原理及测量方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
HU Haoliang. Research on principle and measurement method of CT analyzer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [11] 王耀锋. 电子式互感器校验仪的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
WANG Yaofeng. Study on electronic transformer calibration instrument[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [12] 尉建军. 基于嵌入式系统的电流互感器准确度测试仪的设计与实现[D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
WEI Junjun. Design and realization of accuracy tester for current transformer based on embedded system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010.
- [13] 刘庆余. 互感器校验仪的原理与整体检定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2002: 67-69.
- [14] 艾武, 李承. 电路与磁路[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [15] 宁建行, 迟长春, 苏郁林, 等. 基于快速傅里叶变换的剩余电流真有效值算法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015, 17(11): 13-16.
NING Jianhang, CHI Changchun, SU Hanlin, et al. The research of calculation for true rms of residual current based on fast Fourier transforms[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015, 17(11): 13-16.
- [16] 徐垦. 交流信号真有效值数字测量方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(2): 51-54.
XU Ken. Digital measurement for true effective value of AC signal[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, 34(2): 51-54.
- [17] 史丽萍, 谢强, 马晓伟. 基于五项 MSD 窗三谱线插值的高精度谐波分析算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 108-111.
SHI Liping, XIE Qiang, MA Xiaowei. High accuracy analysis of harmonic algorithm based on 5-term maximum-sidelobe-decay window and triple-spectrum-

- line interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 108-111.
- [18] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于四谱线插值 FFT 的谐波分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 139-144.
ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 139-144.
- [19] 李得民, 何怡刚. 基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 64-70.
LI Demin, HE Yigang. Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 64-70.
- [20] 潘文, 钱俞寿, 周鹏. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论(II)双插值 FFT 理论[J]. 电工技术学报, 1994, 9(2): 53-56.
PAN Wen, QIAN Yushou, ZHOU E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT(II)dual interpolated FFT algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994, 9(2): 53-56.
- [21] 温和, 滕召胜, 卿柏元. Hanning 自卷积窗及其在谐波分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 164-169.
WEN He, TENG Zhaosheng, QING Baiyuan. Hanning self-convolution windows and its application to harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 164-169.
- [22] 曾博, 唐求, 卿柏元. 基于 Nuttall 自卷积窗的改进 FFT 谱分析方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 59-65.
ZENG Bo, TANG Qiu, QING Baiyuan. Spectral analysis method based on improved FFT by nuttall self-convolution window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 59-65.
- [23] 卿柏元, 滕召胜, 高云鹏, 等. 基于 Nuttall 窗双谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 153-157.
QING Baiyuan, TENG Zhaosheng, GAO Yunpeng, et al. An approach for electrical harmonic analysis based on Nuttall window double-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 153-157.
- [24] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于三谱线插值 FFT 的电力谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 130-135.
NIU Shengsuo, LIANG Zhirui, ZHANG Jianhua, et al. An algorithm for electrical harmonic analysis based on triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 130-135.
- [25] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
PANG Hao, LI Dongxia, ZU Yunxiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54.

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-11-13

作者简介:

王保帅(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气信息量检测及互感器研究等; E-mail: baoshuai@hust.edu.cn

肖霞(1976—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电子式互感器及新型测量仪器等。E-mail: xiaoxiahust@163.com

(编辑 周金梅)