

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.10.038

不同原理的保护用电流互感器暂态特性对比分析

杨忠州¹, 冯建华¹, 谢婷婷¹, 王露¹, 郝海鹏², 姚梦珏¹,
王博¹, 张媛¹, 郭晗¹

(1. 西安高压电器研究院有限责任公司, 西安 710077; 2. 西电宝鸡电气有限公司, 陕西 宝鸡 721306)

摘要:在现代智能电网的智能化变电站中,电子式电流互感器逐渐取代传统的电磁式电流互感器,得到越来越广泛的应用。暂态特性是保护用电流互感器的重要性能,文中针对不同原理的电流互感器的暂态特性进行了相关的试验研究。首先概述了电磁式电流互感器的暂态保护TPY级和电子式电流互感器暂态保护TPE级的定义及试验要求,然后通过实际的试验,对不同原理的多台电流互感器的暂态特性进行比对,得到多组比对试验数据。试验结果表明:电子式和传统电磁式的电流互感器都能达到标准要求的暂态性能指标,对用户的选型及生产厂家的设计均有指导意义。

关键词:电磁式电流互感器;电子式电流互感器;暂态误差;比对试验

Comparative Analysis on Transient Characteristics of Protective Current Transformers with Different Principles

YANG Zhongzhou¹, FENG Jianhua¹, XIE Tingting¹, WANG Lu¹, HAO Haipeng²,
YAO Mengjue¹, WANG Bo¹, ZHANG Yuan¹, GUO Han¹

(1. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China;
2. XD Baoji Electric Co., Ltd., Shaanxi Baoji 721306, China)

Abstract: In the modern smart grid intelligent substation, the electronic current transformers gradually replace the traditional electromagnetic current transformers and get more and more widely used. Transient characteristics are important for the protection of current transformers. In this paper, the transient characteristics of current transformers with different principles are studied by actually test. Firstly, the definition of TPY class for electromagnetic current transformer and TPE class for electronic current transformer are overviewed, and then the transient characteristics of multiple current transformers with different principles are compared though actually test. The test results show that the electronic current transformers and the traditional electromagnetic current transformers all can meet the standard requirements of transient performance indicators. This discussion may be useful to manufacturers and users.

Key words: electromagnetic current transformer; electronic current transformer; instantaneous error; comparative test

0 引言

在电力系统中,互感器是最重要的测量和保护设备。在中国电压较低的电网中,短路电流非周期性分量衰减速度很快,短路电流很快达到稳定状态,采用一般的保护用电流互感器即可满足要求^[1]。在超、特高压电力系统中,短路电流非周期性分量衰减时间较长,而要求切除短路故障的时间很短,此时电流互感器处于过渡工作状态,因此必须采用

暂态保护用电流互感器。电流互感器暂态误差性能的要求是出于快速保护动作的需要,以免故障发展到电网失稳,电流互感器暂态误差是对这种瞬变性能的直接体现^[2-4]。

目前工程上应用的电流互感器有传统的电磁式电流互感器和电子式电流互感器2种^[5]。电子式电流互感器按照一次传感器类型主要分为有源式(光学电流互感器)和无源式(空心线圈电流互感器)^[6-7],不同类型的电流互感器,其原理不同,暂态特性有

一定差异,国内外学者针对各种原理的电流互感器暂态传变特性的设计和改善进行了深入的研究。文[8]研究了电磁式电流互感器励磁的非线性参数对暂态特性的影响,提出二次动态时间系数概念,研究了剩磁对暂态特性的影响;文[9]根据空心线圈电流传感器的工作原理,并结合具体参数进行了仿真,分析和仿真说明,通过适当的参数选择,空心线圈传感器完全能够满足暂态电流测量的要求;文[10]从光纤电流互感器原理及结构出发,分析其对交、直流系统的暂态响应特性及对保护应用的影响,提出了提高光纤电流互感器可靠性的方法和技术应用水平。这些研究从结构设计的角度阐述了各原理电流互感器的暂态特性并进行软件仿真分析,但并没有以实际的试验来对比分析各原理电流互感器的实际暂态性能差异。通过在实验室对不同原理的多台电流互感器进行的暂态误差试验,得到多组对比试验数据,反映出各类型的电流互感器监测暂态故障电流的响应特性。

1 暂态保护用电流互感器 TPE 级和 TPY 级误差定义及试验条件

电磁式或电子式电流互感器皆以不同的瞬时误差重现一次电流的交流分量和暂态直流分量^[11]。交流分量的瞬时误差影响继电保护的运行,暂态直流分量的瞬时误差通常与继电保护的判断运算无关,但交流分量的瞬时误差取决于其输入的电流幅值和暂态直流分量的大小以及该暂态直流分量的衰减时间常数^[12]。工程中采用的暂态保护用电磁式电流互感器的准确级一般为 TPY^[13],暂态保护用电子式电流互感器的准确级一般为 5TPE^[14],TPY 级和 5TPE 级在额定一次电流下的电流误差限值为 $\pm 1\%$,相位误差限值为 $\pm 60'$;在准确限值条件下最大峰值瞬时误差为 10%。在规定的工作循环中,用额定一次短路电流峰值的百分数表示最大峰值瞬时误差 (ε) %。

$$\varepsilon = 100 \cdot \hat{i}_e / (\sqrt{2} \cdot I_{psc}) \quad (1)$$

式(1)中: $\hat{i}_e$ 是最大瞬时误差电流; I_{psc} 额定一次短路电流有效值。

电力系统中,当出现短路电流时,断路器分闸从而切断短路故障。由于许多短路故障是直击雷或雷电感应突然施加到电力系统中,使电气设备所承受的电压超过其额定值而引起的瞬时故障,因此断路器设定采用重合闸的自动工作循环方式,在短时间内消除这些故障后又重合闸接通电网^[15];但如果是真实的线路系统故障,重合闸后会再次出现短路故障电流,然后断路器会再次分闸,电力线路进

行故障检修。因此为确定电流互感器在这种故障电流下的暂态特性,试验时需要有 2 次短路电流的组合^[16]。

综上所述,要准确测定暂态电磁式或电子式电流互感器最大峰值瞬时误差值,必须满足以下要求:

- 1) 试验主回路时间常数要与产品设计的一次时间常数一致,并符合标准要求。
- 2) 进行试验时,要求每次通流时的一次电流均为全偏移。对于 2 次通流试验来说,需 2 次选相合闸。并要求 2 次通电电流的第 1 个半波方向相同。
- 3) 试验时的额定对称短路电流倍数(K_{sc})满足标准要求。
- 4) 电磁式电流互感器,以及模拟量输出的电子式电流互感器,应接额定二次负荷。
- 5) 试验循环满足标准及产品设计的要求。

2 不同原理电流互感器的典型暂态性能

1) 电磁式电流互感器。对电磁式电流互感器而言,短路时故障电流中的衰减直流分量是引起互感器铁心饱和的重要因素,并且随着时间常数的增长饱和愈加严重,造成电流互感器二次电流数值和波形的严重失真,从而导致继电保护误动作。即使选择具有暂态特性的电流互感器也不可能完全排除此类情况的出现,传统的电磁式电流互感器无法保证暂态测量的精确度,给继电保护的可靠性和灵敏性构成威胁^[8]。

2) 光学电流互感器。光学电流互感器的暂态响应范围大,测量精度高,有很宽的动态范围,一个测量通道额定电流可测到几十安培至几千安培,过电流范围可达几万安培,因此既可同时满足计量和继电保护的需要,又可免除电磁感应式互感器多个测量通道的复杂结构^[9,17]。

3) 空心线圈电流互感器。空心线圈电流互感器的暂态特性主要取决于对暂态电流中非周期分量的测量特性,而该测量误差主要取决于互感器的积分电路能否准确地将微分信号还原为衰减直流量,单纯的 RC 积分电路很难同时满足积分时时间常数尽量大和输出信号高灵敏度的要求,采用电子式积分器可有效满足要求^[10,18]。

3 试验样机原理及参数

文中对比试验选取了 8 个国内主要互感器生产厂家的共计 9 台样机,其中光学电流互感器由 4 个厂家各提供一台共计 4 台,空心线圈电流互感器一

台,电磁式电流互感器由4个厂家各提供一台共计4台。 样机参数汇总见表1。

表1 试验样机汇总表
Table 1 Test objects summary

编号	生产厂家	CT类型	二次输出类型	额定延迟时间/ms	备注
1	厂家A	光学	ST光接口(IEC 60044-8—2002扩展22通道);采样率10 kHz	0.212	—
2	厂家B	光学	ST光接口(IEC 60044-8—2002扩展22通道);采样率10 kHz	1.078	—
3	厂家B	空心线圈	ST光接口(IEC 60044-8—2002扩展22通道);采样率10 kHz	1.195	—
4	厂家C	光学	ST光接口(IEC 60044-8—2002扩展22通道);采样率10 kHz	0.130	缠绕式,缠绕12圈
5	厂家D	光学	ST光接口(IEC 60044-8—2002扩展22通道);采样率10 kHz	0.200	—
6	厂家E	电磁式	6 000 A/1 A, 12 VA	—	—
7	厂家F	电磁式	6 000 A/1 A, 12 VA	—	—
8	厂家G	电磁式	6 000 A/1 A, 12 VA	—	—
9	厂家H	电磁式	6 000 A/1 A, 12 VA	—	—

4 试验布置及试验方法

为了验证暂态保护用电流互感器的准确度限值条件下是否达到瞬时误差限值,采用直接法试验,试验时一次端子通过条件满足标准要求的暂态电流,在额定负荷、额定一次短路电流、额定一次时间常数和额定工作循环下进行。所有样机一次串联(或穿心安装)于试验回路,确保返回导体与试品

距离足够大,不小于2 m,消除返回导体的影响^[19],并确保安装连接紧固,试品本体放于平整地面。安装方式:厂家B的空心线圈CT和光学CT安装在GIS罐体内,罐体两端提供接线排连接一次母线;厂家C的光学CT为缠绕式,直接缠绕在GIS罐体上即可;厂家A的光学CT固定在GIS罐体一侧;厂家D的光学CT,所有的电磁式CT提供试验工装,固定在地面,一次导体从CT中心穿过,试验原理布置图见图1。

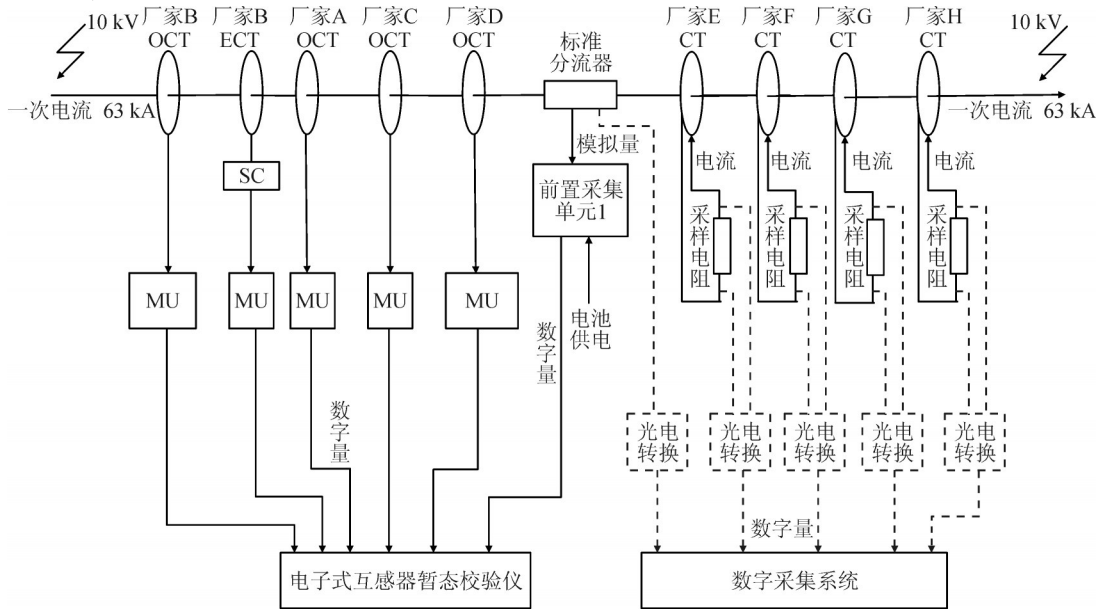


图1 试验原理图

Fig. 1 Test principle

暂态误差的测试采用比对法^[20]。即用一台标准的、具有良好暂态特性的标准分流器与被试电流互感器串联接入主回路,标准分流器将一次大电流真

实地转化为二次电压信号,该电压信号经采集单元变为数字量信号,再通过光纤将该信号传输到电子式互感器暂态校验仪和数字采集系统,它能准确地

反映主回路的稳态及暂态过程。标准分流器是德国某公司生产的无感同轴高准确度分流器,该分流器参加了国际比对,暂态测量误差小于0.5%。采用电子式电流互感器暂态测试系统采集光学CT及空心线圈CT的测试数据;把电磁式CT的二次电流经过采样电阻转成电压信号后,通过光电转换单元与一次回路进行光电隔离,并将电压信号转成数字信号,然后由数字采集系统采集电磁式CT的测试数据。2个测试系统分别将它所测到的标准和被试电流波形用软件进行逐点差分,求出其误差曲线,从标准分流器的电流波形上读取一次对称电流值峰值,再利用式(1)计算出误差曲线,从该误差曲线中读取最大瞬时误差值^[21]。

5 试验参数及试验数据

试验参数如下:①试验电流为全偏移暂态电流;②对称分量有效值为63 kA;③一次电流时间常数为100 ms;④工作循环:C-100 ms-O-500 ms-C-250 ms-O。

暂态误差比对测试实景布置图见图2。

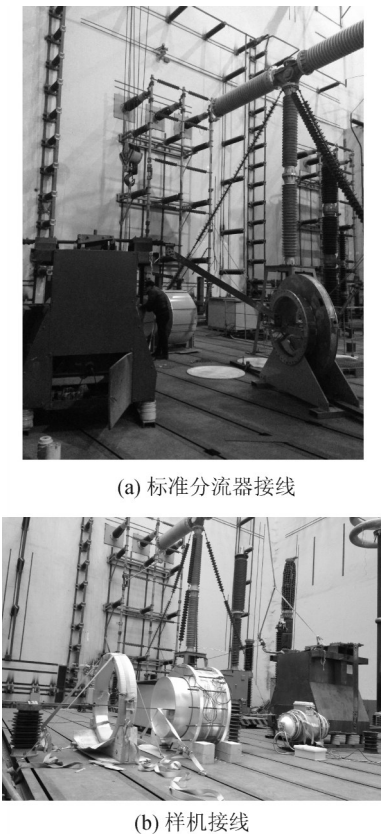


图2 暂态误差实景布置图

Fig. 2 The photos of instantaneous error test

所有样机与标准分流器相比的暂态误差数据见表2。曲线图见图3-5。

表2 暂态误差数据
Table 2 Instantaneous error test data

样机序号	生产厂家	CT类型	暂态误差/%	试验波形
1	厂家A	光学	1.7	图3
2	厂家B	光学	3.1	—
3	厂家B	空心线圈	-5.8	图4
4	厂家C	光学	5.5	—
5	厂家D	光学	5.6	—
6	厂家E	电磁式	8.2	—
7	厂家F	电磁式	9.5	图5
8	厂家G	电磁式	6.3	—
9	厂家H	电磁式	7.5	—

从图3-5试验误差曲线中可以看出,3类电流互感器的实际暂态性能与理论分析基本一致,光学电流互感器的暂态误差主要受由于额定变比的设定值影响,其暂态电流曲线趋势与标准分流器基本吻合;空心线圈电流互感器在测量第1个暂态电流会出现拖尾现象,暂态误差逐渐增大,并且导致在测量重合闸暂态电流时误差会在之前拖尾的基础上迭加,误差也随时间递增,在暂态电流结束时达到最大值,但其最大暂态误差依然能够满足小于10%的要求;电磁式电流互感器在测量第1个暂态电流时产生剩磁,导致在测量重合闸短路电流时铁芯出现轻度饱和现象,暂态误差逐渐增大,但其最大暂态误差也能够满足小于10%的要求。

6 结语

随着智能电力系统的发展,电子式电流互感器相比传统的电磁式电流互感器在体积等方面存在诸多的优势,得到越来越广泛的应用,文中对电子式电流互感器的暂态保护功能是否可以替代成熟的电磁式电流互感器进行了试验研究,通过对不同原理的多台电流互感器进行的实际暂态误差试验,得到多组被试电流互感器与标准分流器相比的暂态误差数据,试验结果表明:电子式电流互感器和电磁式电流互感器都能满足标准规定的暂态性能要求。

参考文献:

[1] 陈建玉,孟宪民,张振旗,等. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策[J]. 电力系统自动化,2000,24(6): 54-56.
CHEN Jianyu, MENG Xianmin, ZHANG Zhenqi, et al. Influence of the current transformers aturation on relay unit and its countermeasures in medium voltage power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 54-56.

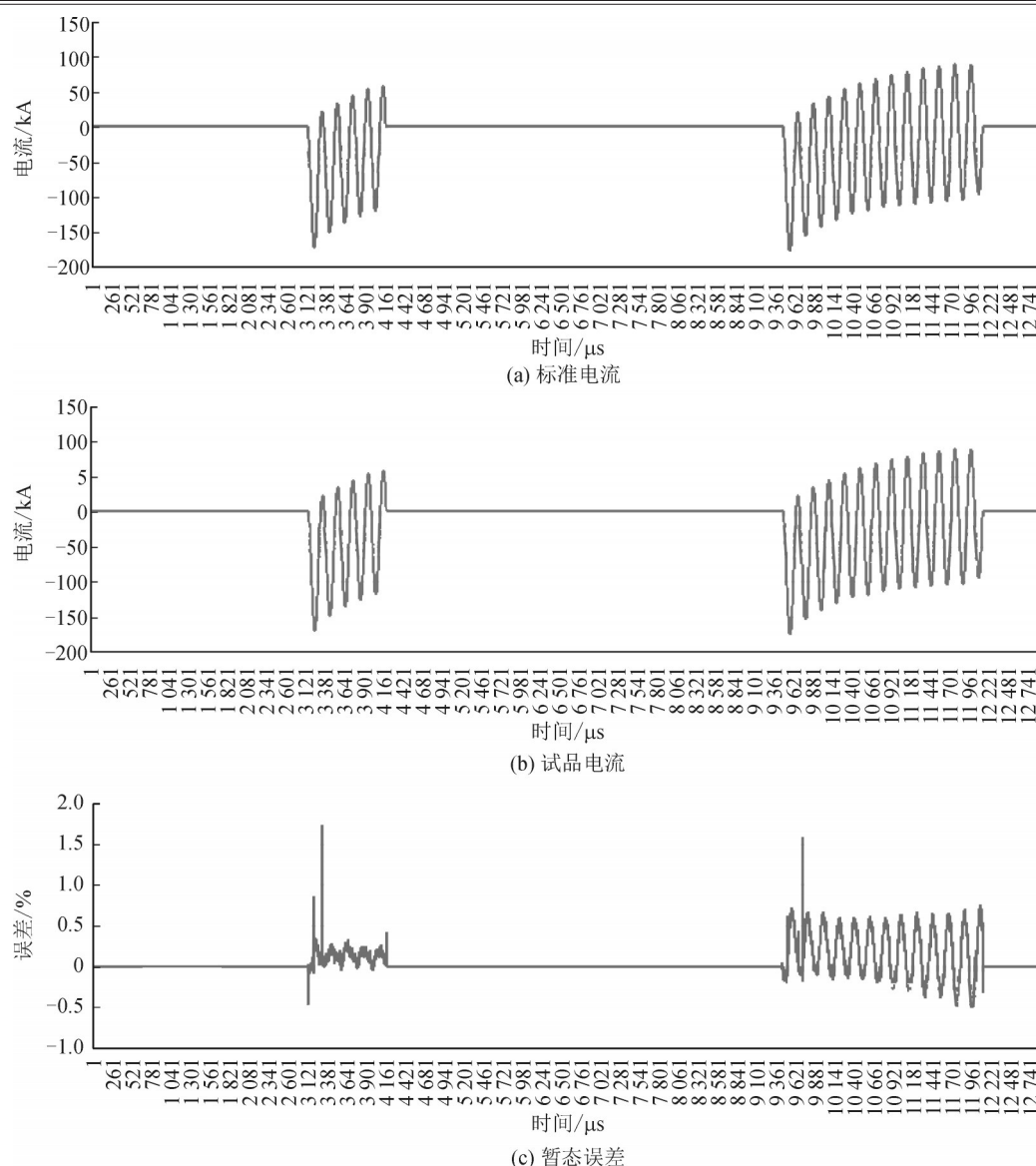


图3 1号光学CT暂态误差曲线

Fig. 3 Test waveform of No.1 OCT

- [2] 王志华. 高压电网电流互感器饱和对继电保护的影响应用分析与研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(3): 39-44.
WANG Zhihua. Analysis and study on effects of saturation of current transformers on relay protection in the high voltage grid[J]. Power System & Clean Energy, 2013, 29(3): 39-44.
- [3] 闫少俊. GIS智能变电站电子式互感器技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
YAN Shaojun. Electronic transformer technology of GIS smart substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [4] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
ZHANG Renyu, CHEN Changyu, WANG Changchang. High voltage testing technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [5] 徐政, 刘高任, 张哲任. 柔性直流输电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 1-8.
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHANG Zheren. Research on fault protection principle of DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.
- [6] 王玲, 汪本进, 吴士普, 等. 电子式电流互感器暂态特性检测系统研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 86-91.
WANG Ling, WANG Benjin, WU Shipu, et al. Study on transient characteristics test method of electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 86-91.
- [7] 张建超, 刘晓波, 张飞, 等. 电子式高压电力互感器的发展现状及在电力系统中的应用[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 106-110.
ZHANG Jianchao, LIU Xiaobo, ZHANG Fei, et al. Development of high-voltage electronic transducers and their application in powersystem[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 106-110.
- [8] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 电磁式电流互感器暂态特性试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 1-4.

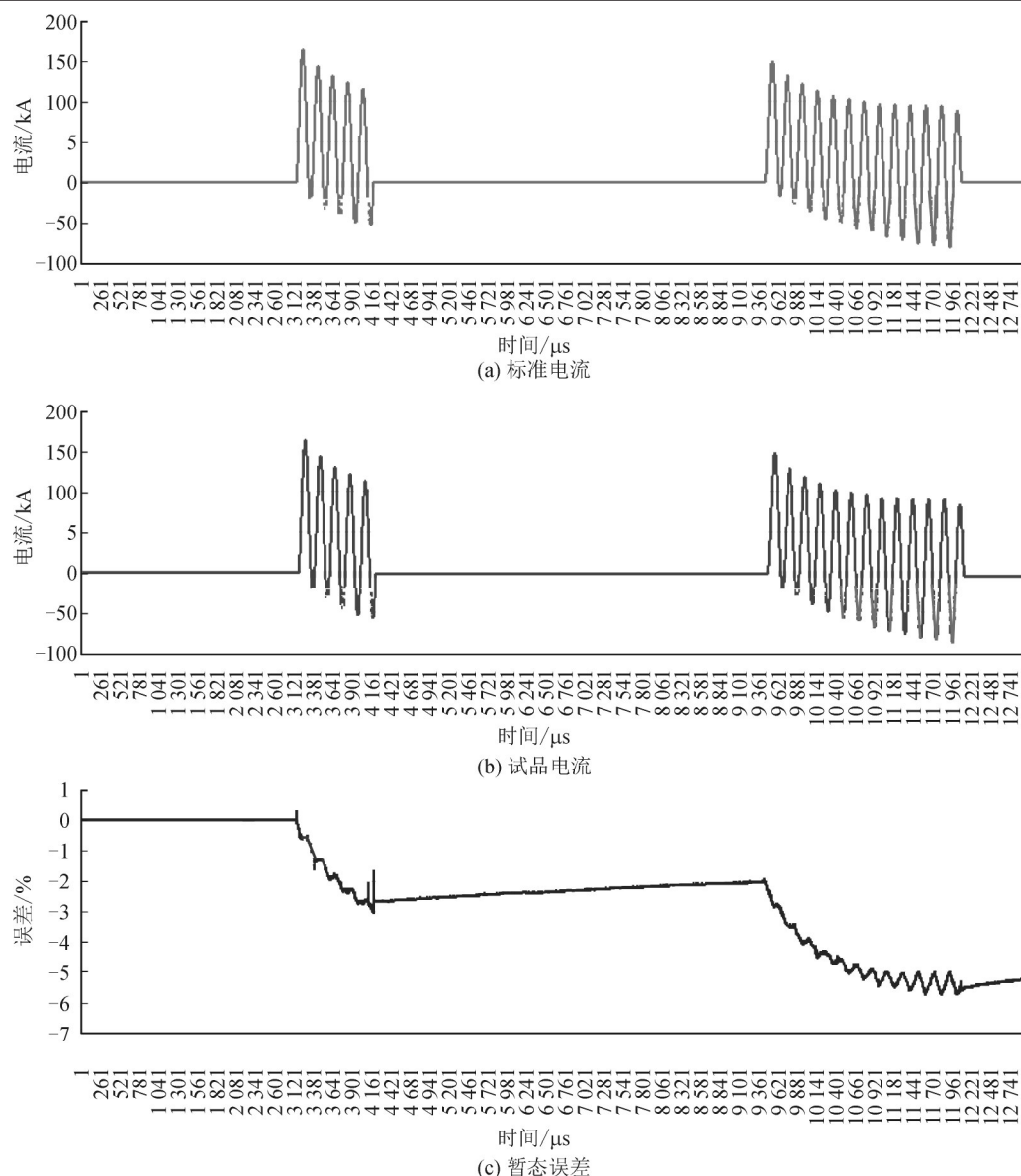


图4 3号空心线圈CT暂态误差曲线

Fig. 4 Test waveform of No.3 ECT

CHEN Deshu, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Test study on the transient performance of the electro-magnetic type current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13):1-4.

- [9] 王立辉, 杨志新, 殷明慧, 等. 数字闭环光纤电流互感器动态特性仿真与测试[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1890-1895.

WANG Lihui, YANG Zhixin, YIN Minghui, et al. Simulation and test of dynamic performance of digital closed-loop fiber optic current transformer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1890-1895.

- [10] 徐 雁, 毕 然. 空心线圈电流传感器对暂态电流响应的仿真分析[J]. 电工技术学报, 2004, 19(11): 61-65.

XU Yan, BI Ran. Analysis and simulation of air-core coil transducer's response to transient current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(11): 61-65.

- [11] 田文革, 杜建嵩, 王茂松, 等. 保护用电流互感器暂态特性的直接法试验[J]. 变压器, 2005, 42(2): 1-4.

TIAN Wenge, DU Jiansong, WANG Maosong, et al. Direct method for transient characteristic test of protective current transformer[J]. Transformer, 2005, 42(2): 1-4.

- [12] 刘兆林, 殷敏莉. 华东 500 kV 电网短路电流情况的调查[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 221-224.

LIU Zhaolin, YAN Minli. Analysis of short-current failures of the 500 kV power system in east China grid[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 221-224.

- [13] 胡 云, 于跃海. 电子式互感器暂态性能测试方法的研究[B]. 电气开关, 2012, 44(2): 54-56.

HU Yun, YU Yuehai. Study on transient performance test method of electrical transformers[J]. Electrical Switch, 2012, 44(2): 54-56.

- [14] 任稳柱. 用于电力系统测量和保护的新型电子式互感

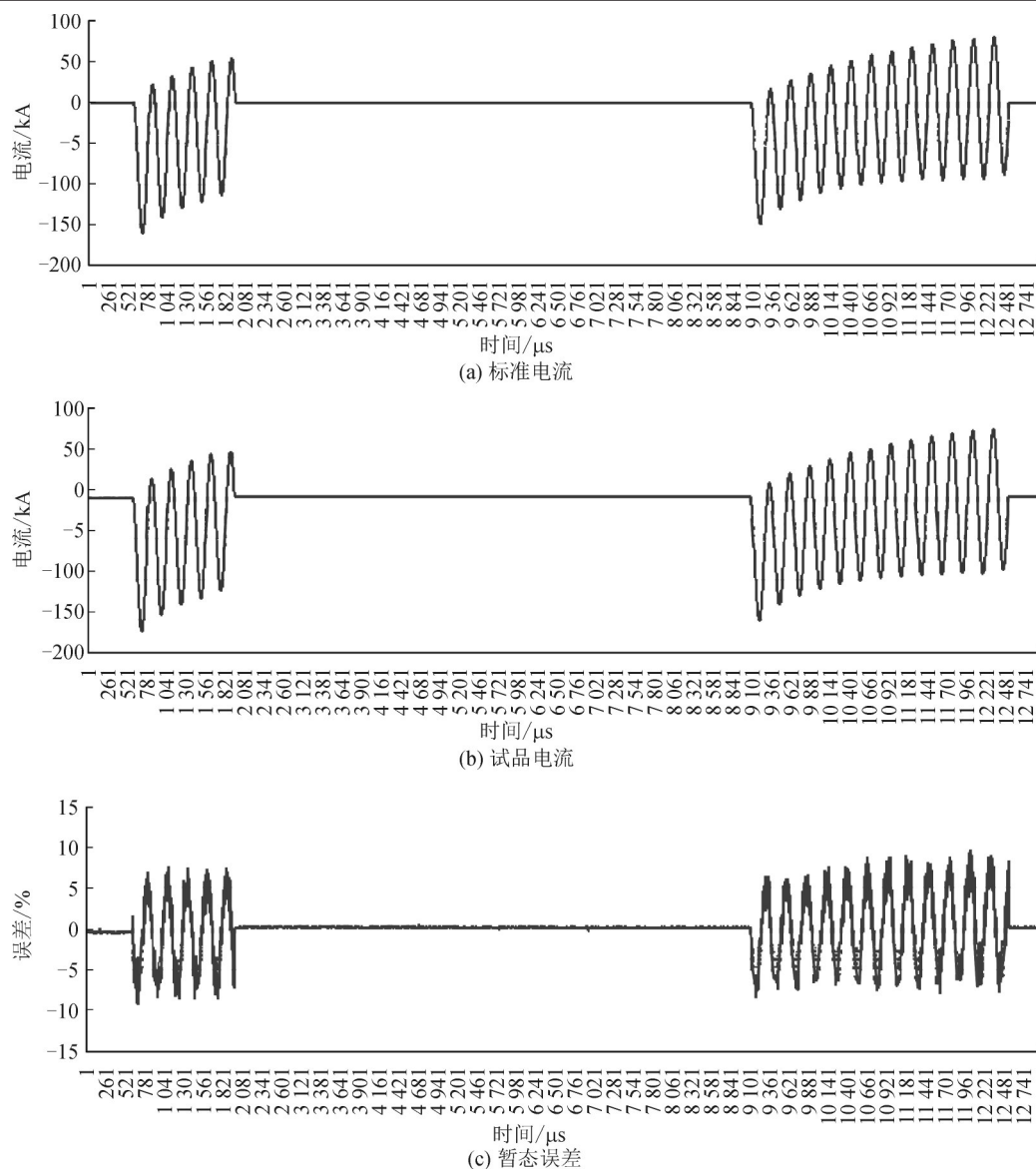


图5 7号电磁式CT暂态误差曲线

Fig. 5 Test waveform of No.7 CT

器[C]//第8届全国“智能化电器与应用”学术年会暨“2005年配网自动化和变电站自动化”论坛.深圳:中国电工技术学会,2005:73-106.

REN Wenzhu. A new type of electronic transformer in power system protection and monitorion[C]//The eighth of nation “Intelligent Electrical Apparatus & Applications” Forum. Shenzhen: CES, 2005: 73-106.

- [15] 互感器 第2部分: 电流互感器的补充技术要求: GB/T 20840. 2—2014[S]. 2014.

Transformer part II: Electronic additional requirements for current transformers: GB/T 20840. 2—2014[S]. 2014.

- [16] 钱 政, 李童杰, 张 翔. 电子式互感器校验方法的设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1316-1319.
QIAN Zheng, LI Tongjie, ZHANG Xiang. Design and realization of calibration method of electronic transformer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1316-1319.

- [17] 王 巍, 张志鑫, 杨仪松. 全光纤式光学电流互感器技术及工程应用[J]. 供用电, 2009, 26(1): 45-48.

WANG Wei, ZHANG Zhixin, YANG Yisong. The fiber optical current transformer(FOCT) technology and it's engineering application[J]. Distribution & Utilization, 2009, 26(1): 45-48.

- [18] 罗苏南, 田朝勃, 赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 108-113.

LUO Sunan, TIAN Chaobo, ZHAO Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(3): 108-113.

- [19] 余春雨, 叶国雄, 王晓琪, 等. 电子式互感器的校准方法与技术[J]. 高电压技术, 2004, 30(4): 20-22.

YU Chunyu, YE Guoxiong, WANG Xiaopi, et al. Calibration technique of electronic instrument transducers[J]. High

(下转第245页)

- [7] 李颖. GIS局部放电超声波检测技术的研究及应用[D]. 大连:大连理工大学, 2014.
LI Ying. GIS partial discharge of research and application of ultrasonic testing technology[J]. Dalian:Dalian University of Technology, 2014.
- [8] 司文荣, 李军浩, 袁鹏, 等. 气体绝缘组合电器多局部放电电源的检测与识别[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16):119-126.
SI Wenrong, LI Junhao, YUAN Peng, et al. Detection and identification techniques for multi-PD sources in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16):119-126.
- [9] 钱家骊, 沈力, 刘卫东, 等. GIS的壳体振动现象及其检测[J]. 高压电器, 1990, 69(1):3-9.
QIAN Jiali, SHEN Li, LIU Weidong, et al. Vibration detection of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 1990, 69(1):3-9.
- [10] 杜伟, 杨勇, 梅冰笑, 等. GIS带电检测中超声波干扰信号的多维度综合分析方法研究[J]. 浙江电力, 2016, 35(10):1-6.
DU Wei, YANG Yong, MEI Bingxiao, et al. Research on the multi-dimensional comprehensive analysis method of ultrasonic interference signal in live detection of GIS[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(10):1-6.
- [11] 凌卫家, 张浩, 管敏渊. 互感器振动对GIS超声波局部放电带电检测的影响[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(5):74-78.
LING Weijia, ZHANG Hao, GUAN Minyuan. Impact of instrument transformer vibration on GIS ultrasonic-based partial discharge detection[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(5):74-78.
- [12] 程林. 特高压GIS/HGIS设备振动诊断方法研究[J]. 电力建设, 2009, 30(7):17-19.
CHENG Lin. Research on UHV GIS/HGIS vibration detection and diagnosis method[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(7):17-19.
- [13] 杨瑞棠. GIS振动的分析[J]. 华通技术, 2001(2):11-14.
YANG Ruitang. Analysis on the vibration of GIS[J]. Hua-Tong Technology, 2001(2):11-14.
- [14] 李成榕, 王浩, 郑书生. GIS局部放电的超声波检测频带试验研究[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1):41-45.
LI Chengrong, WANG Hao, ZHENG Shusheng. Experiment Research on ultrasonic band selection of GIS partial discharge detection[J]. Southern Power System Technology, 2007, 1(1):41-45.
- [15] 常广, 王毅, 王玮. 采用振动信号零相位滤波时频熵的高压断路器机械故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3):155-162.
CHANG Guang, WANG Yi, WANG Wei. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers utilizing zero-phase filter time-frequency entropy of vibration signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3):155-162.
- [16] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations Part I:Theoretical foundation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1):157-163.
- [17] GARCIA B, BURGOS J C, ALONSO A M. Transformer tank vibration modeling as a method of detecting winding deformations Part II:Experimental verification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1):164-169.
- [18] 齐波, 李成榕, 骆立实, 等. GIS中局部放电与气体分解产物关系的试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(4):957-963.
QI Bo, LI Chengrong, LUO Lishi, et al. Experiment on the correlation between partial discharge and gas decomposition products in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4):957-963.
- [19] 冯新岩, 孟庆承, 李凯, 等. GIS特高频局部放电检测定位方法[J]. 山东电力技术, 2016, 43(10):72-74.
FENG Xinyan, MENG Qingcheng, LI Kai, et al. Discussion on fault location in the partial discharge detection of GIS with UHF method[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(10):72-74.

冯新岩(1980—),男,本科,工程师,主要研究方向为电力设备绝缘及故障诊断技术。

(上接第240页)

- Voltage Engineering, 2004, 30(4): 20-22.
- [20] 葛震, 任稳柱, 钱刚. 智能型电子式互感器校验仪的研制[C]//第二届全国虚拟仪器学术交流会. 北京:中国仪器仪表学会, 2007:181-184.
GE Zhen, REN Wenzhu, QIAN Gang. Design of Intelligent electronic transformer calibrator[C]//The second of nation virtual instrument academic research. Beijing: China Instrument and Control Society, 2007:181-184.
- [21] 林国营, 周尚礼. 电子式互感器校验系统的误差分析方法[J]. 电测与仪表, 2010, 47(6):28-31.
LIN Guoying, ZHOU Shangli. Evaluation of measurement

error for the calibration system of electronic current transformer[J]. Electronic Measurement & Instrumentation, 2010, 47(6): 28-31.

杨忠州(1986—),男,工程师,主要研究方向为高压电器、互感器型式试验、电磁兼容试验。

冯建华(1967—),男,高级工程师,主要从事高压大电流试验技术研究。

谢婷婷(1986—),女,工程师,主要研究方向为互感器型式试验、电磁兼容试验。