

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191423

# ECT采集单元积分回路的暂态特性改进及其检测系统研发

王宇<sup>1</sup>, 孟令雯<sup>1</sup>, 汤汉松<sup>2</sup>, 辛明勇<sup>1</sup>, 徐长宝<sup>1</sup>, 陈光华<sup>3</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009; 3. 珠海开普检测技术有限公司, 广东 珠海 591000)

**摘要:** 电子式电流互感器采集单元的暂态误差及拖尾现象影响继电保护设备在故障发生时正确动作。通过仿真验证了过零点暂态误差是拖尾现象产生的根本原因, 且这种误差是由罗氏线圈的电路积分环节造成的, 从原理上无法完全消除。因此, 提出提高硬件积分回路的衰减时间常数以及动态启用软件积分的积分衰减算法分别改进对应类型采集单元的暂态传变特性。为了对改进后的采集单元的暂态特性进行测试, 提出采用连续时域微分技术来模拟罗氏线圈信号的输出, 通过故障相位补偿同步技术实现暂态误差的测试。所提方法为基于罗氏线圈原理的电子式电流互感器的工程应用及采集单元更换提供了一套完整的检测手段。

**关键词:** 罗氏线圈; 电子式电流互感器; 采集单元; 积分回路; 暂态特性; 拖尾现象; 检测系统

## Improvement of transient characteristics and development of a testing system of an integration circuit in ECT acquisition unit

WANG Yu<sup>1</sup>, MENG Lingwen<sup>1</sup>, TANG Hansong<sup>2</sup>, XIN Mingyong<sup>1</sup>, XU Changbao<sup>1</sup>, CHEN Guanghua<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. Jiangsu LingChuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China; 3. Zhuhai Ketop Testing Technology Co., Ltd., Zhuhai 591000, China)

**Abstract:** Transient error and tailing of an ECT acquisition unit affects the correct operation of relay protection when the fault occurs. This paper simulates and verifies that the zero crossing transient error is the root cause of the tailing phenomenon, and this error is caused by the circuit integral part of the Rogowski coil. In principle this cannot be completely eliminated. Therefore, we propose improving the transient transmission characteristics of this kind of acquisition unit by increasing the attenuation time constant of the hardware integration circuit and enabling the integration attenuation algorithm of the software integration dynamically. In order to test the transient characteristics of the improved acquisition unit, we propose a continuous time-domain differential technology to simulate the output signal of the Rogowski coil, and realize the measurement of transient error by the synchronous technology of the compensating fault phase. When undertaking an engineering application of ECT based on the Rogowski coil or replacing the acquisition unit, it can provide a complete set of test means.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51477044).

**Key words:** Rogowski coil; ECT; acquisition unit; integral circuit; transient characteristics; tailing phenomenon; testing system

## 0 引言

保护与测量是对智能电网复杂系统进行安全控制的基础, 互感器的传变特性是保护与测量设备正确运行的关键因素<sup>[1-2]</sup>。基于罗氏线圈原理的电子式电流互感器由于成本不高, 可以有效地抗电磁饱和,

在电力系统中已经大量投入运行<sup>[3-4]</sup>。在该类型互感器中, 电力线路的电流信号通过罗氏线圈和采集单元<sup>[5]</sup>的数据采集处理再通过合并单元的信号传递光缆输送到二次侧<sup>[6]</sup>。其中数据采集部分中的积分环节是整个采集过程的核心, 信号积分处理的好坏将直接影响整个系统的精度<sup>[7-8]</sup>。特别是基于瞬时采样点的快速保护算法更是要求互感器能够将故障发生初期的暂态过渡过程进行高保真的真实传变<sup>[9-12]</sup>。但

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477044)

是根据这些年的现场运行情况反馈, 该类型互感器采集单元的积分回路一直存在暂态过程电流误差较大以及故障切除后的电流拖尾现象, 这种现象导致保护设备不正确动作行为也时有发生<sup>[13]</sup>, 这已成为制约罗氏线圈电子式互感器大规模应用的重要原因之一。

随着电子式互感器技术的发展, 目前该类型互感器的积分回路已集成在采集单元内部, 因此在互感器采集单元的现场更换过程中, 原有的以电子式互感器作为整体来进行的暂态特性分析以及测试技术都已经不再适用<sup>[14-17]</sup>。

基于以上分析, 本文针对基于罗氏线圈原理的电子式电流互感器采集单元积分回路的暂态特性及现场测试技术展开研究。根据电子式电流互感器暂态超差以及故障切除后拖尾现象产生的机理, 建立相应的暂态仿真模型, 提出相应的硬件积分和软件积分改进措施。为了对改进后的采集单元暂态特性进行测试, 本文设计了一套新的检测系统, 提出采用连续时域微分技术来模拟罗氏线圈信号的输出, 通过故障相位补偿同步技术实现暂态误差测量的测试方法, 为基于罗氏线圈原理的电子式电流互感器的工程应用及采集单元现场更换提供了一套完整的检测手段。

## 1 基于罗氏线圈的电子式互感器的采集单元积分回路及算法

基于罗氏线圈原理的电子式互感器基本由互感器本体、采集单元以及合并单元三部分组成。

罗氏线圈是一个空心线圈, 载流导体从罗氏线圈中间穿过, 由法拉第电磁感应定律可得罗氏线圈获得的感应电势  $v(t)$  为

$$v(t) = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

式中: 比例系数  $M$  是罗氏线圈与载流导体之间的互感系数, 是仅与罗氏线圈的结构相关的常数;  $i(t)$  是被测电流。

由式(1)可见, 罗氏线圈获得的感应电势  $v(t)$  与被测电流的变化率  $\frac{di(t)}{dt}$  成正比, 故采集单元必须通过积分环节来实现电流信号的还原, 即对式(1)两边取定积分后可得

$$i(t) = \frac{1}{M} \times \int_0^t v(t) dt + i(0) \quad (2)$$

式中,  $i(0)$  为  $i(t)$  的初始值。

但是在电流过零点切除故障的瞬间, 基于罗氏

线圈的电子式电流互感器由于积分回路存在的累计误差, 不能够正确传变衰减的直流分量, 导致输出的电流信号存在一个较大的暂态误差。此时由于实际的故障信号已经消失, 互感器的输出信号只能依靠积分回路自身的直流衰减回路进行衰减, 从而产生了电流拖尾现象。

采集单元的积分功能实现方式有模拟积分和数字积分两类<sup>[18-20]</sup>, 实际工程中一般根据现场的干扰、功耗情况分别选择相应的积分方式<sup>[21-25]</sup>。

模拟积分又称硬件积分。为了消除理想积分器对于直流信号无限积分的影响, 一般都是采用有损积分器, 即在积分输出电容  $C$  上并联一个电阻  $R_2$  构成直流衰减回路, 如图 1 所示。因此硬件积分所需功耗高, 且精度受器件影响较大, 尤其是电容器精度不好把控。

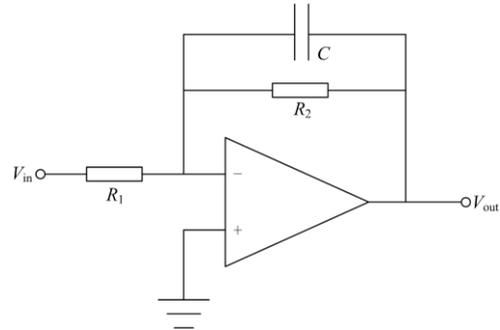


图 1 有损积分器

Fig. 1 Lossy integrator

数字积分又称软件积分, 是将定积分离散化后, 通过迭代运算获取积分值。

定积分离散化可采用梯形积分法, 即

$$I_n = \frac{1}{M} \times \sum_{n=0}^t \left[ \frac{1}{2} \times (V_{n-1} + V_n) \times T_s \right] + I_0 \quad (3)$$

式中:  $I_n$  为第  $n$  点的电流采样值;  $I_0$  为初始点的电流采样值;  $V_n$  为第  $n$  点的输出反向电压;  $T_s$  为采样周期。

将式(3)修改为迭代运算模式, 即可得到数字积分的常规算法:

$$I_n = I_{n-1} + \frac{T_s}{M} \times \frac{V_{n-1} + V_n}{2} \quad (4)$$

为抑制理想积分的直流干扰, 工程一般采用衰减系数  $k$  将式(4)修改为

$$I_n = k \times I_{n-1} + \frac{T_s}{M} \times \frac{V_{n-1} + V_n}{2} \quad (5)$$

式中,  $k$  值由衰减时间常数根据采样周期  $T_s$  来决定。由于软件积分为基于离散采样值的定点积分, 采样速率过低时单个采样点的离散误差将会严重影响积

分效果，故采用软件积分时采样周期  $T_s$  不宜低于  $100 \mu\text{s}$ 。

软件积分由于受 A/D 采样回路零点漂移的影响会出现零漂直流发散而产生潜次谐波，为了尽可能地降低负载运行时潜次谐波的影响，衰减系数  $k$  的选取原则是零漂直流发散值达到 0.01 倍额定电流时，其电流衰减与 A/D 采样零漂的累加值一致。所以当采样周期  $T_s$  为  $25 \mu\text{s}$  时，衰减系数  $k$  的取值工程上一般设定在 0.999 7~0.999 8 之间。

## 2 采集单元积分回路的暂态特性仿真分析

### 2.1 短路过程积分回路暂态误差电流分析

以三相对称短路为例，当有限容量电源的电网发生短路故障时，暂态过程会带有一个直流衰减信号。空载情况下故障时的暂态电流为

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - I_m \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (6)$$

式中： $I_m$  为故障电流周期分量的幅值， $I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$ ； $\alpha$  为故障电压相位； $\varphi$  为阻抗角， $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ ； $T_a$  为短路回路的时间常数， $T_a = L/R$ ， $L$  与  $R$  分别为短路回路电感和电阻。

对于基波分量而言，由于有损积分器的衰减回路一般都按照  $R_2 \gg 1/\omega C$  来设计，所以在微分到积分的过程中，积分回路衰减时间常数对基波分量的影响基本可以忽略不计，所以可得罗氏线圈电子式互感器输出的暂态电流为

$$i_e(t) \approx I_m \sin(\omega t + a - \varphi) - I_m \sin(a - \varphi) e^{-\frac{t}{T_a}} e^{-\frac{t}{T_b}} \quad (7)$$

式中， $T_b$  为积分回路的衰减时间常数。

在高压网络中，通常故障回路的电感值比电阻值大很多，可近似认为  $\varphi \approx 90^\circ$ ，比较式(6)和式(7)，得出暂态误差电流：

$$I_\delta(t) \approx I_m \cos(a) e^{-\frac{t}{T_a}} (1 - e^{-\frac{t}{T_b}}) \quad (8)$$

由式(8)可知，暂态误差电流是一个与故障电流幅值  $I_m$ 、故障电压起始相位  $\alpha$ 、故障回路衰减时间常数  $T_a$  以及积分回路衰减时间常数  $T_b$  有关的量。而故障电流幅值  $I_m$  与故障电压起始相位  $\alpha$  是与系统相关的参数，只有当  $T_b \gg T_a$  的时候，积分回路造成的暂态误差才可以被忽略。

### 2.2 传统积分回路暂态仿真分析

基于以上分析，搭建系统故障及罗氏线圈电子式互感器仿真模型，如图 2 所示。按照图 1 搭建硬件积分回路模型，按照式(5)搭建软件积分模型。

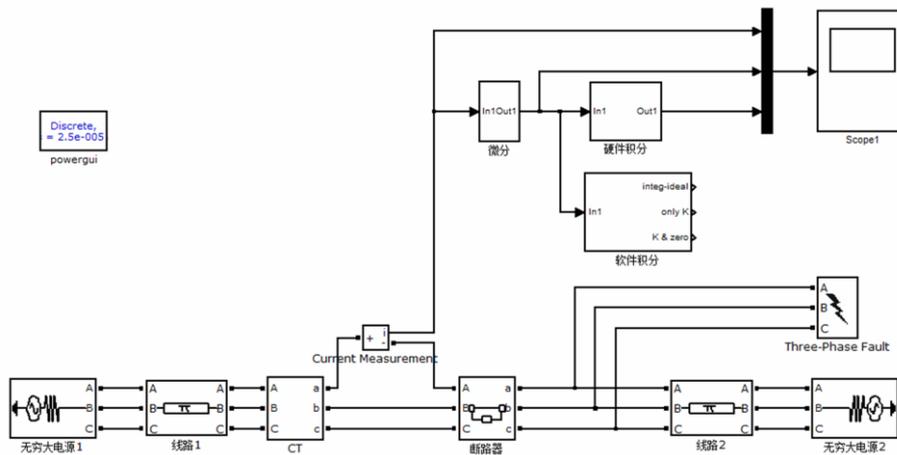


图 2 暂态仿真模型

Fig. 2 Transient simulation model

试验按照实际设备采集单元的积分参数进行设计，硬件积分衰减时间常数设置为 0.5 s；软件积分采样周期  $T_s$  为  $25 \mu\text{s}$ ，衰减系数  $k$  先设定为 0.999 74。图 3 为仿真结果，出现了明显的拖尾误差，其中硬件积分下的暂态瞬时值最大误差为 14.13%，软件积分下的暂态瞬时值最大误差为 43.48%，远超过互感器标准规定的上限值 10%。

### 2.3 积分回路暂态特性改进措施及其仿真分析

基于仿真试验，根据暂态误差电流产生机理分析，为提高采集单元的暂态传变特性，本文提出对硬件积分和软件积分分别采取如下的改进措施：

(1) 根据理论分析，当  $T_b \gg T_a$  时，积分回路将不会产生能够影响系统安全的暂态误差。因此对于硬件积分回路，可通过提高硬件积分回路的衰减时间

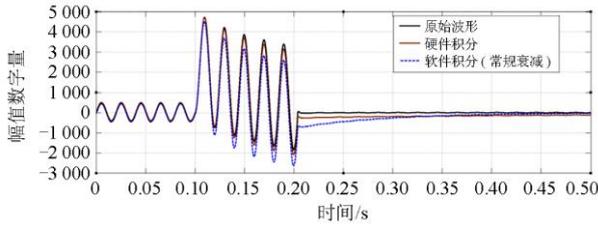


图3 传统积分仿真

Fig. 3 General integration simulation

常数来降低其暂态误差和拖尾现象。短路回路的衰减系数一般在 120 ms, 所以当积分回路的衰减时间常数设置为衰减系数的 8~10 倍时, 其对硬件积分暂态误差的影响应可被忽略。

(2) 由于受 A/D 采样回路零点漂移的影响, 软件积分回路无法自行提高其积分回路的衰减时间常数。因此对于软件积分回路, 可以动态调整软件积分衰减系数  $k$ 。因此当系统发生故障时, 软件积分利用突变量判据检测故障启动时刻, 屏蔽积分衰减算法(即将  $k$  值调整为 1 变为理想积分模型), 消除积分衰减产生的暂态传变误差; 在故障结束后, 再实时启用积分衰减算法, 恢复软件积分对于干扰直流分量的抑制能力。其中突变量计算采用积分后数据进行突变量判断, 如式(9)。

$$S_{\Delta} = S_n + S_{n-2T} - 2 \times S_{n-T} \quad (9)$$

式中:  $S_{\Delta}$  为采样积分突变量;  $S_n$  为当前积分值;  $S_{n-2T}$  为二周波前积分值;  $S_{n-T}$  为一周波前积分值。

为了验证所提改进措施的有效性, 本文选取硬件积分回路的衰减时间常数为 1 000 ms, 另外设置软件积分回路的衰减系数  $k$  为 0.999 74, 分别对两种积分回路进行仿真, 它们的暂态响应波形如图 4 所示。

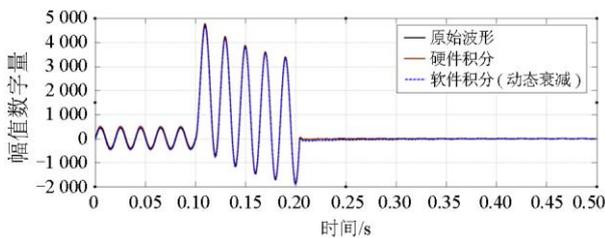


图4 改进积分仿真

Fig. 4 Improved integral simulation

比较图 3 和图 4, 可以发现两种积分模式的暂态误差都有显著降低, 故障切除后的拖尾现象也随之消失。由仿真结果可知: 改进后硬件积分的暂态瞬时值最大误差降为 0.54%, 软件积分的暂态瞬时值最大误差降为 3.26%, 均可满足实际工程需求。

### 3 采集单元暂态检测系统

#### 3.1 暂态检测系统的设计

由于原有的以电子式互感器作为整体来进行的暂态特性分析以及测试技术已经不再适用目前的采集单元的现场更换过程。基于以上关于采集单元的原理分析, 本文设计了一套新的检测系统, 对改进后的采集单元暂态特性进行测试, 也可以实现对电子式互感器采集单元的单独立试验, 从而实现采集单元的现场调试和现场更换。

本文设计的检测系统为采集单元的离线暂态测试系统, 如图 5 所示。检测系统由一次故障电流仿真模块、微分标准源信号模块、试品模块、时钟模块以及暂态测试系统模块组成。

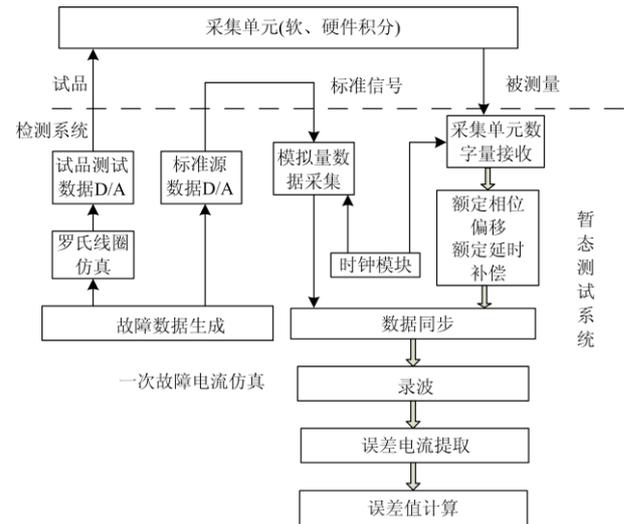


图5 采集单元暂态检测系统

Fig. 5 Transient test system of acquisition unit

#### 3.2 暂态标准信号获取

一次故障电流仿真模块和微分标准源信号模块模拟生成标准源信号, 从而提供标准的暂态测试信号。其功能主要包括:

1) 对式(6)进行微分处理。

$$i'(t) = di/dt = \omega I_m \cos(\omega t + a - \varphi) + \frac{1}{T_a} I_m \sin(a - \varphi) e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (10)$$

2) 对微分连续信号进行离散化处理, 从而获得测试所需要的微分电流标准源信号。

$$i'(n) = i'(nT_s) = \omega I_m \cos(\omega nT_s + a - \varphi) + \frac{1}{T_a} I_m \sin(a - \varphi) e^{-\frac{nT_s}{T_a}} \quad (11)$$

其中,  $T_s$  为离散化的采样间隔时间, 由 D/A 芯片的

配置参数来决定，为软件内部的固化参数；时间常数  $T_a$  与阻抗角  $\varphi$  均由短路回路电感  $L$  与电阻  $R$  来决定；故障电压相位  $\alpha$  是随机参数。

在采集单元暂态测试过程中，积分回路对于各种不同系统故障参数以及故障时刻电压相位变化的波形响应特性都不一样。为了提高采集单元暂态响应的测试能力，暂态标准波形生成时由测试人员对故障电流周期分量的幅值  $I_m$ 、短路回路电感  $L$ 、短路回路电阻  $R$  以及故障电压相位  $\alpha$  进行配置，其中衰减时间常数  $T_a = L/R$ ，阻抗角  $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ 。

配置完成后测试软件根据式(6)与式(10)生成测试所需的标准源与试品测试波形，从而实现采集单元在各种故障波形下的暂态测试。

### 3.3 数据同步方法

为了比较同样故障时间下试品的输出信号和标准信号间的误差，必须计算出试品中的数据传输和处理所需要的时间，即试品信号的暂态传输延时  $T_d$ 。

记录标准源信号突变时刻  $t_1$ ，经过 Hanning 窗傅氏滤波，获取信号  $t_1$  时刻的基波相位为

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{X_1}{X_R}\right) \quad (12)$$

式中： $X_R$  为电流  $i$  的实部； $X_1$  为电流  $i$  的虚部。分别通过如下方式获得。

$$X_R = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \cos\left(i \cdot \frac{2\pi}{N}\right) \quad (13)$$

$$X_1 = -\frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \sin\left(i \cdot \frac{2\pi}{N}\right) \quad (14)$$

式中： $N$  为时间窗内的样本总数； $x(i)$  为数据窗内电流  $i$  的离散采样值。

检测试品信号的突变时刻  $t_2$ ，并提取此时的基波相位  $\varphi_2$ ，由此获得两种信号的时间补偿量为

$$\Delta t = (\varphi_2 - \varphi_1) / 2\pi f \quad (15)$$

则最终的暂态传输延时为

$$T_d = t_2 - t_1 - \Delta t \quad (16)$$

### 3.4 暂态检测系统试验

本文设计的检测系统分别对改进后的硬件积分和软件积分采集单元在开普实验室进行了稳态和暂态性能测试。其中电子式互感器额定电流为 600 A，故障电流幅值为 10 倍额定电流，故障相位角为 0°，故障回路衰减时间常数为 100 ms。

暂态测试系统录波界面如图 6、图 7 所示。

暂态试验共进行了 5 次测试，5 次结果基本一致，测试结果平均值见表 1。可以看出改进积分回路后的电子式电流互感器采集单元的整体暂态指标

均满足电子式互感器的暂态指标要求，故障切除后也未出现电流拖尾现象，验证了前述理论分析和软件仿真的正确性。

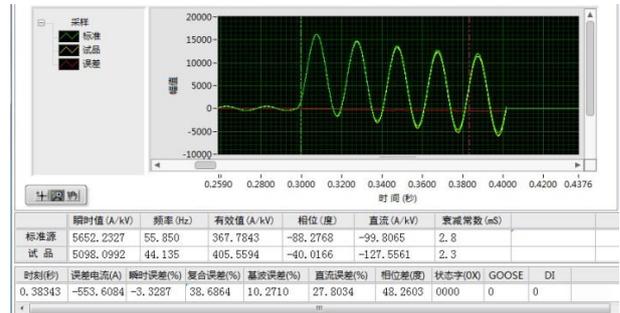


图 6 硬件积分暂态误差

Fig. 6 Transient error of hardware integrator

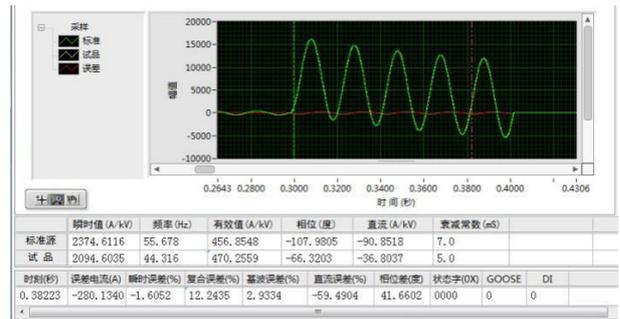


图 7 软件积分暂态误差

Fig. 7 Transient error of software integrator

表 1 采集单元暂态特性检测数据

Table 1 Test data of transient characteristics of acquisition unit

测试项目	暂态最大 误差 $\varepsilon$ /%	衰减时间 常数/ms	最大误差 时刻/ms	拖尾 现象
硬件积分	1.7	98	83	无
软件积分	3.2	97	82	无

## 4 结论

本文基于罗氏线圈原理的电子式电流互感器采集单元积分回路的工作原理，从理论上分析了其微分到积分的传变过程和暂态误差的产生机理，得出其暂态特性的影响因素，从而提出相应的改进措施，有效地解决了基于罗氏线圈原理的电子式电流互感器采集单元存在的暂态误差及拖尾现象。

本文设计了一套完整的采集单元检测系统平台，对实际研发的改进的硬件积分和软件积分采集单元样品进行了实测试验，验证了改进方法的有效性和检测系统的实用性，为后期电子式互感器采集单元特性验证、现场更换提供了有力保证。

## 参考文献

- [1] 戴魏, 郑玉平, 白亮亮, 等. 保护用电流互感器传变特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 46-54.  
DAI Wei, ZHENG Yuping, BAI Liangliang, et al. Analysis of protective current transformer transient response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 46-54.
- [2] 王育学, 潘远林, 刘玮, 等. 电流互感器暂态特性对涌流传变的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 80-86.  
WANG Yuxue, PAN Yuanlin, LIU Wei, et al. Effect of CT transient characteristics on transfer of inrush[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 80-86.
- [3] 张弛, 康小宁, 郑永康, 等. 罗氏线圈电流互感器的暂态传变特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 4105-4112.  
ZHANG Chi, KANG Xiaoning, ZHENG Yongkang, et al. Transient characteristics of Rogowski coil based current transformers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 4105-4112.
- [4] 周仕豪, 王红星, 张健, 等. 柔性直流电子式电流互感器分流器建模方法与传变特性[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 107-112.  
ZHOU Shihao, WANG Hongxing, ZHANG Jian, et al. Modeling method and transmission characteristic of VSC-HVDC electronic current transformer shunt[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 107-112.
- [5] 闫志辉, 宋一丁, 郭震, 等. 电子式互感器采集单元可靠性分析及设计[J]. 自动化仪表, 2019, 40(9): 8-13.  
YAN Zhihui, SONG Yiding, GUO Zhen, et al. Reliability analysis and design of electronic transformer acquisition unit[J]. Process Automation Instrumentation, 2019, 40(9): 8-13.
- [6] 李澄, 袁宇波, 罗强. 基于电子式互感器的数字保护接口技术研究[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 84-87.  
LI Cheng, YUAN Yubo, LUO Qiang. Research on interfacing technology for digital protection based on ECT/EVT[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 84-87.
- [7] 宋涛. Rogowski 线圈电流互感器中的高精度数字积分器技术研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 237-244.  
SONG Tao. Technical research of accurate digital integrators for Rogowski coil current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 237-244.
- [8] 丁津津, 程志友, 张倩, 等. 新一代智能变电站电子式电压互感器异常分析[J]. 电测与仪表, 2017, 54(15): 34-40.  
DING Jinjin, CHENG Zhiyou, ZHANG Qian, et al. Anomalies analysis on electronic voltage transformer in new generation smart substation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(15): 34-40.
- [9] 金能, 邢家维, 林湘宁, 等. 一种抗电流互感器饱和的工频变化量保护新方案[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊1): 217-224.  
JIN Neng, XING Jiawei, LIN Xiangning, et al. A new scheme of frequency variation protection resisting current transformer saturation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 217-224.
- [10] 杨忠州, 冯建华, 谢婷婷, 等. 不同原理的保护用电流互感器暂态特性对比分析[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 240-246, 251.  
YANG Zhongzhou, FENG Jianhua, XIE Tingting, et al. Comparative analysis on transient characteristics of protective current transformers with different principles[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 240-246, 251.
- [11] 翁汉琨, 王胜, 林湘宁, 等. 基于波形相似度的抗电流互感器饱和变压器相位差动保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 190-204.  
WENG Hanli, WANG Sheng, LIN Xiangning, et al. waveform similarity based transformer phase differential protection against current transformer saturation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 190-204.
- [12] 徐长宝, 高吉普, 鲁彩江, 等. 适用电子式互感器的变压器保护磁通制动技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 80-86.  
XU Changbao, GAO Jipu, LU Caijiang, et al. Flux restraint technology of transformer protection for electronic transformer[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 80-86.
- [13] 丁国成, 陈庆涛, 刘翔, 等. 一起110 kV电子式电流互感器异常原因分析与处理[J]. 变压器, 2019, 56(2): 57-60.  
DING Guocheng, CHEN Qingtao, LIU Xiang, et al. Analysis and treatment of abnormal causes of a 110 kV electronic current transformer[J]. Transformer, 2019, 56(2): 57-60.
- [14] 姚俊, 张杰, 姚翔宇, 等. 电子式互感器暂态特性测试系统的研制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 140-144, 150.  
YAO Jun, ZHANG Jie, YAO Xiangyu, et al. Development of electronic transformer transient characteristic test system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 140-144, 150.
- [15] 王红星, 盛超, 汤汉松. 电子式互感器交直流一体化测试技术[J]. 广东电力, 2018, 31(3): 134-138.

- WANG Hongxing, SHENG Chao, TANG Hansong. AC/DC integration test technology for electronic transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(3): 134-138.
- [16] 汪玉, 汤汉松, 高博, 等. 基于数字物理混合仿真的电子式电压互感器暂态特性及其测试技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 131-137.
- WANG Yu, TANG Hansong, GAO Bo, et al. Research on transient characteristics and test technology of electronic voltage transformer based on digital-physical hybrid simulation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 131-137.
- [17] 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.
- [18] LUO Pandian, LI Hongbin, LI Zhenhua. Two high accuracy digital integrators for Rogowski current transducers[J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(1): 1-7.
- [19] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(4): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [20] 坚葆林, 李许军, 姜毅龙. 电子式互感器积分环节的 FIR 滤波算法及其优化[J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(8): 640-644.
- JIAN Baolin, LI Xujun, JIANG Yilong. FIR filtering algorithm for integral element of electronic transformer and its optimization[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2019, 46(8): 640-644.
- [21] 李振华, 胡蔚中, 闫苏红, 等. 隔离开关开合下电子式互感器传导干扰分析及抗干扰方法[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 233-240.
- LI Zhenhua, HU Weizhong, YAN Suhong, et al. Conductive interference analysis and anti-interference methods of electronic transformers in disconnecter switching test[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 233-240.
- [22] 刘志恒, 段雄英, 廖敏夫, 等. 电子式电流互感器电磁抗干扰仿真与测试[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 994-999.
- LIU Zhiheng, DUAN Xiongying, LIAO Minfu, et al. Simulation and test of electromagnetic interference with electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 994-999.
- [23] 白世军, 曾林翠, 荣命哲, 等. GIS 隔离开关操作对电子式电流互感器的干扰分析及防护[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 54-62, 69.
- BAI Shijun, ZENG Lincui, RONG Mingzhe, et al. Interference analysis and protection of electronic current transformer caused by disconnect switch operation in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 54-62, 69.
- [24] 白世军, 郭乐, 曾林翠, 等. 变压器空载合闸对隔离断路器电子式 CT 干扰分析及防护[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 81-90.
- BAI Shijun, GUO Le, ZENG Lincui, et al. Interference analysis and protection of electronic current transformer in DCB during no-load closing of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 81-90.
- [25] 徐丽青, 陈新之, 余华武, 等. 智能变电站合智一体装置的抗电磁干扰分析及设计[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 57-62.
- XU Liqing, CHEN Xinzhi, YU Huawu, et al. Analysis and design of anti-electromagnetic interference property for integrated merging unit and intelligent terminal in smart substation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 57-62.

收稿日期: 2019-11-13; 修回日期: 2020-02-11

作者简介:

王 宇(1987—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事智能电网领域的研究工作; E-mail: wy\_hit@163.com

孟令雯(1988—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 从事智能电网领域的研究工作; E-mail: 512973606@qq.com

汤汉松(1974—), 男, 通信作者, 本科, 工程师, 从事智能电网技术研究和电子式互感器相关技术研究。E-mail: xsunson@163.com

(编辑 魏小丽)