

基于 Rogowski 线圈的数字积分器的研究与设计

王晓明,周有庆,彭红海,张云飞,胡海波

(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要: 积分器是影响基于 Rogowski 线圈电流互感器精度的关键环节。对模拟积分器的温度特性进行了分析,理论分析和实验结果表明其受温度的影响较大。和模拟积分器相比,数字积分器具有更高的精度和稳定性。利用梯形公式进行数字积分,分析与仿真了梯形积分算法对稳态和暂态电流的响应,提出了解决积分中漂移、初值问题的措施。设计了基于 STM32F103 的数字积分器,并利用新型 PCB 平面 Rogowski 线圈电流互感器进行了实验。实验结果验证了设计方法的有效性。

关键词: 电子式电流互感器; Rogowski 线圈; PCB 型电流互感器; 模拟积分; 数字积分

中图分类号: TM 452

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.028

0 引言

电子式互感器是实现智能变电站运行实时信息数字化的主要设备,在电网动态观测、提高继电保护可靠性等方面具有重要的作用。近年来,采用 Rogowski 线圈的电子式电流互感器成为了国内外研究的热点,并且已经进入了实用化阶段。与传统的互感器相比,Rogowski 线圈具有低功率输出、动态范围大、不存在磁饱和问题、测量频带宽、经济性好等优点^[1-5]。

1 新型 PCB 平面 Rogowski 线圈

文献[6]提出了一种新型 PCB 平面 Rogowski 线圈结构,该新型 PCB 平面线圈可以制作成单层或多层来调节所需要的互感系数等参数。以双层板为例,其结构原理图可参见图 1。

收稿日期:2011-09-29;修回日期:2012-11-02

发明专利:直导线 PCB 平面螺旋线圈一次电流传感器(200810-143245.4)

基金项目:湖南省科技重大专项(2009FJ1014)

Project supported by the Science and Technology Major Project of Hunan Province(2009FJ1014)

图 1(a)为二次线圈上层示意图,图 1(b)为二次线圈下层示意图。双层 PCB 板上、下 2 层均有 4 个相同的均匀对称分布的平面螺旋线圈,上、下 2 层螺旋线圈绕向相反,每层相邻的线圈顺次串联,上、下 2 层之间对应的螺旋线圈通过“过孔”顺次串联,首末两端作为输出端,构成二次输出端。

根据法拉第定律和安培环路定律可知,线圈的二次输出电压 $e(t)$ 和被测电流 $i(t)$ 之间的关系为:

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

其中, M 为互感系数,计算方法可参见文献[6]。

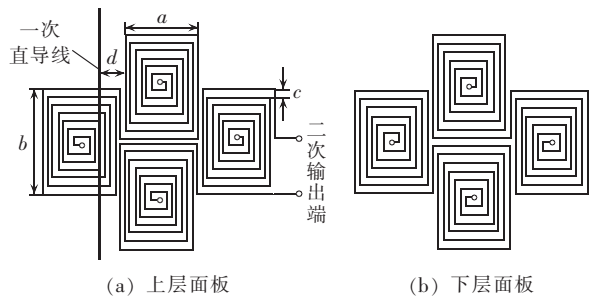


图 1 新型 PCB 平面 Rogowski 线圈结构
Fig.1 Structure of new-style PCB planar Rogowski coil

One-key test system for relay protection equipment of intelligent substation

LIU Wei¹, ZHAO Yong², SHI Guang²

(1. Henan Electric Power Economic Research Institute of Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

2. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: A concept of one-key test for intelligent substation relay protections is proposed based on their characteristics and test requirements. The one-key test system may import the CID file of the protection to be tested or the SCD file of overall substation configuration to obtain the parameters, channel configuration and indicators of the protection to be tested, obtain the setting values via MMS network and enable/disable the soft platen by sending and receiving GOOSE information to realize the protection configuration. With the one-key test system, the test of protection is carried out automatically and the test report is automatically generated, realizing the automatic and intelligent test of substation protections.

Key words: electric substations; testing; relay protection; IEC61850; GOOSE; digital signal processors; Field Programmable Gate Arrays(FPGA); communication

通过对二次输出电压积分可还原被测信号:

$$i(t) = i(0) - \frac{1}{M} \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

实验表明,该新型 Rogowski 线圈具有良好的线性度和准确度;式(2)表明高精度的积分环节是确保新型电流互感器精度的关键^[7-8]。

2 模拟积分器

常用的模拟积分电路如图 2 所示,图中 R_f 能够抑制积分器的直流漂移,为减小其对积分效果的影响, R_f 一般取值较大。

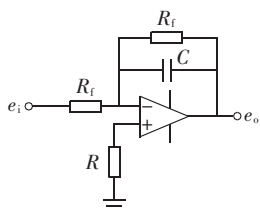


图 2 模拟积分电路

Fig.2 Circuit diagram of analog integrator

图 2 所示电路的传递函数为:

$$H(s) = -\frac{R_f}{R} \frac{1}{R_f C s + 1} \approx -\frac{1}{R C s} \quad (3)$$

其中, $R = 51 \text{ k}\Omega$, $C = 0.047 \text{ }\mu\text{F}$, $R_f = 1 \text{ M}\Omega$ 。

通过实验发现,使用该积分器的互感器测试结果误差较大,主要是因为温度对电路中模拟器件的影响^[9],由式(3)可得输出电压的值为:

$$e_o(t) = -\frac{1}{jRC\omega} e_i(t) \quad (4)$$

则由温度引起的输出电压误差以及相对误差为:

$$\Delta e_o(t) = -\frac{1}{jR(1+\alpha\Delta T)C(1+\beta\Delta T)\omega} + \frac{1}{jRC\omega}$$

$$\xi = \frac{\Delta e_o(t)}{e_o(t)} \times 100\% = \frac{1}{(1+\alpha\Delta T)(1+\beta\Delta T)} - 1 \quad (5)$$

其中, α 、 β 分别为电阻和电容的温度系数, ΔT 为温度变化量。

取 $\alpha = 1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $\beta = 3 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 作相对误差曲线如图 3 所示。

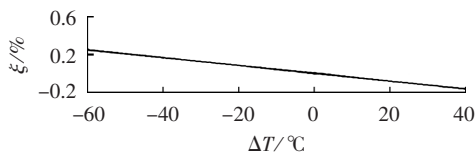


图 3 相对误差曲线

Fig.3 Curve of relative error

从图 3 中可以看出,当温度变化较大时,相对误差较大,不满足 IEC60044-8 标准 0.2 级的精度要求。

3 数字积分器的设计

3.1 数字积分算法的研究

同模拟积分相比,数字积分具有很多显著的优点。

a. 性能稳定。模拟积分器中的模拟器件受温漂和时漂影响,参数会发生变化,导致性能不稳定;数字积分器中的模数转换器和运放驱动电路等模拟电路结构简单稳定,受温漂和时漂影响小,实现其积分器功能的算法完全不受环境因素的影响。

b. 相位特性优良。模拟积分器中的模拟器件参数不同,会引入轻微的相位变动,需要进行相位校准;数字积分的相位响应主要由算法决定,具有一致性。

c. 数字积分器结构灵活,调节方便^[10]。

数字积分器最常用的一种方法是采用模数转换器(ADC)和微处理器芯片(MCU),再设计相应的积分算法来实现。数字积分器框图如图 4 所示,为了消除直流偏置的影响,在 ADC 输出与积分器间接入一个数字高通滤波器(HPF)。

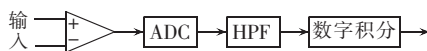


图 4 数字积分器框图

Fig.4 Block diagram of digital integrator

因此选择合适的积分算法成为数字积分器设计的关键问题之一。常用算法有复化的矩形公式、梯形公式和 Simpson 公式。由文献[11]可知,在相同的精度要求下,矩形公式要求每个周期内的采样点数较多,梯形公式次之,Simpson 公式最少,但从算法结构上看矩形公式最简单,梯形公式次之,Simpson 公式最为复杂。因此,综合考虑 3 种算法的优劣,本文设计的积分器采用复化梯形积分算法。

根据数值积分的原理,一般梯形公式为:

$$\int_0^t e(t) dt = \frac{t}{2} [e(0) + e(t)] \quad (6)$$

为了提高积分精度,将积分区间 $[0, t]$ n 等分,步长 $h = t/n$,则可得复化梯形积分公式为:

$$\int_0^t e(t) dt = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{h}{2} [e(t_i) + e(t_{i+1})] = \frac{h}{2} \left[e(0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} e(t_i) + e(t) \right] \quad (7)$$

式(7)的 z 传递函数为:

$$H(z) = T(z+1)/[2(z-1)] \quad (8)$$

其中, T 为采样间隔。

因为 $z = e^{j\omega}$, 可得:

$$H(\omega) = T(e^{j\omega} + 1)/[2(e^{j\omega} - 1)] \quad (9)$$

其中, $\omega = 2\pi f/f_s$ 为数字角频率, f_s 为采样频率。

取 $f_s = 4 \text{ kHz}$, 经过仿真可得到如图 5 所示的频率特性,由图可见,其幅频响应具有 $-20 \text{ dB}/(^{\circ})$ 的衰减,相频响应具有 -90° 的相移,与理想积分一致。

3.2 梯形算法对稳态和暂态特性的响应仿真分析

3.2.1 稳态性能分析

电力系统在正常运行时,IEC60044-8 标准规定

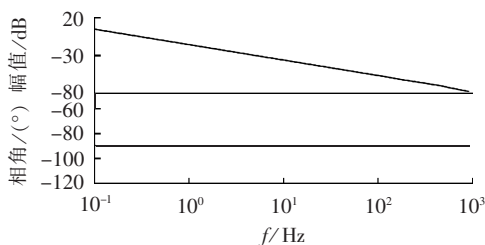


图 5 梯形积分的幅频响应

Fig.5 Amplitude-frequency response of trapezoidal integrator

其稳态一次电流为:

$$i(t) = \sqrt{2} I_p \sin(2\pi ft + \varphi_p) + i_{\text{pres}}(t) \quad (10)$$

其中, I_p 为一次电流基波的方均根值; f 为基波频率; φ_p 为一次相位移; $i_{\text{pres}}(t)$ 为一次剩余电流, 包括谐波和分数谐波分量。

取 $I_p = 0.707$, $\varphi_p = 0$, $i_{\text{pres}}(t) = 0.1 \sin(4\pi ft)$, 由式(1)可得:

$$e(t) = -M[2\pi f \cos(2\pi ft) + 0.4\pi f \cos(4\pi ft)] \quad (11)$$

由式(7)可得满足梯形公式的离散方程为:

$$y(n) = y(n-1) + \frac{1}{2}[x(n) + x(n-1)]T \quad (12)$$

用 MATLAB 对式(11)进行 4 kHz 的采样, 实际中互感系数 M 数值较小, 为方便比较, 仿真时令 $M = 1$ 。利用式(12)进行积分运算, 可以得到一次输入电流和二次输出电压(已经过数字积分, 后同)的图形如图 6 所示, 从图中可以看出, 用梯形积分算法可以很好地还原稳态电流。

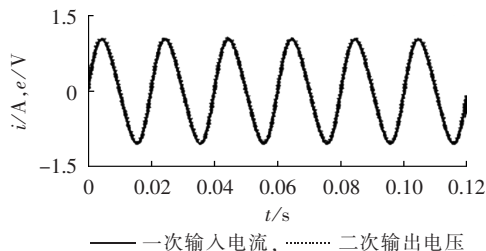


图 6 梯形积分对稳态电流的响应图

Fig.6 Response of trapezoidal integrator to steady current

3.2.2 暂态性能分析

电力系统发生故障时, 一次故障电流通常包含基频分量、直流分量及高频分量, 对暂态电流的响应可视为对各部分分量响应的叠加, IEC60044-8 标准规定暂态电流用下式来表示:

$$i(t) = \sqrt{2} I_{\text{psc}} [\sin(2\pi ft + \varphi_p) - \sin \varphi_p e^{-t/\tau_p}] + i_{\text{pres}}(t) \quad (13)$$

其中, I_{psc} 为一次电流对称分量方均根值; f 为频率; τ_p 为暂态一次时间常数; $i_{\text{pres}}(t)$ 为一次剩余电流, 包括谐波和分数谐波分量。

考虑最严重情况, 假定暂态电流为全偏移, 则式(13)变为:

$$i(t) = \sqrt{2} I_{\text{psc}} [-\cos(2\pi ft) + e^{-t/\tau_p}] + i_{\text{pres}}(t) \quad (14)$$

取 $I_p = 0.707$, $i_{\text{pres}}(t) = 0.1 \sin(4\pi ft)$, 由式(1)可得:

$$e(t) = -M[2\pi f \sin(2\pi ft) - \frac{1}{\tau_p} e^{-t/\tau_p} + 0.4\pi f \cos(2\pi ft)] \quad (15)$$

同理, 利用 MATLAB 进行仿真, 可得到一次输入电流与二次输出电压的图形如图 7 所示, 从图中可以看出, 暂态一次时间常数取不同值时, 梯形积分都能很好地还原故障电流。

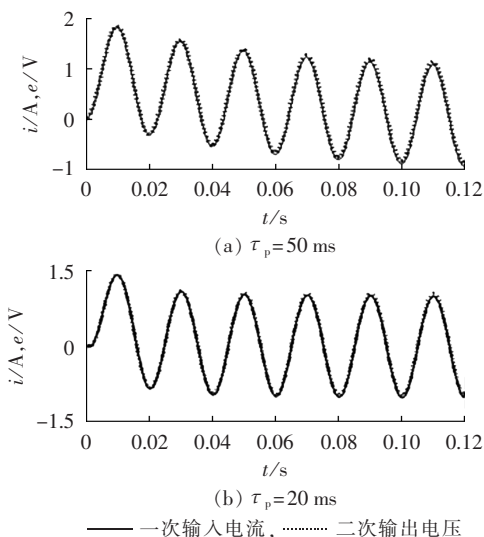


图 7 梯形积分对暂态电流的响应图

Fig.7 Response of trapezoidal integrator to transient current

由以上分析可知, 采用梯形积分算法能够很好地还原一次电流。

3.3 系统框图

本文设计的新型 PCB 平面 Rogowski 线圈结合数字积分的系统框图如图 8 所示。

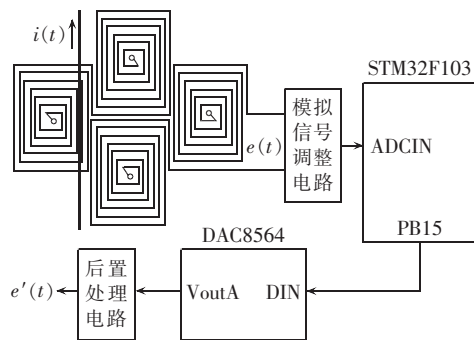


图 8 系统框图

Fig.8 Block diagram of system

该系统采用 STM32F103 作为核心处理器, 该处理器具有运算速度快、工作范围宽、可靠性高、集成 AD 转换、多个通信接口等特点。如图 8 所示, PCB 平面 Rogowski 线圈输出的电压信号 $e(t)$ 先经模拟信号调整电路, 其作用主要是滤除信号中的高频干扰信号, 并对信号进行差分放大; 然后将信号输入到核

心处理器中,进行 AD 转换,运用复化梯形积分算法进行积分运算;再将数字信号传到数模转换器 DAC8564 中,变为模拟信号,经过后置处理电路的平滑输出 $e'(t)$,将 PCB 平面 Rogowski 线圈电流互感器输出的电压信号还原成一次电流信号。

3.4 关键问题的设计

a. 对于 ADC 自身或其前置调整电路引起的直流漂移,本文主要通过 ADC 输出与数字积分之间接高通滤波器 (HPF) 来消除直流偏置的影响。

b. 积分初值问题。要完全还原被测电流信号,必须确定积分的初值,而 ADC 采样的初值难以从 0 开始,这样就会使积分输出产生直流分量。取初相角为 30° ,利用式 (10)、(11)、(12) 进行仿真,一次输入电流与二次输出电压如图 9 所示,从图中可以看出,积分输出会产生直流分量。

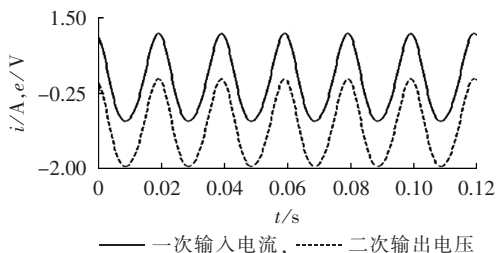


图 9 直流分量对积分器的影响

Fig.9 Influence of direct current on integrator

为了消除直流分量的影响,可对一定周期内的积分结果取平均值,此平均值则为其直流分量,由式 (12) 得出直流分量可用式 (16) 来计算:

$$I=\left(\sum_{i=1}^N y(i)\right) / N \tag{16}$$

其中, N 为采样点数。

然后对其积分结果进行补偿,即可消除其直流分量的影响。补偿后的结果如图 10 所示,从图中可以看出,经过补偿可以消除直流分量的影响,二次电压能够很好地还原一次电流。

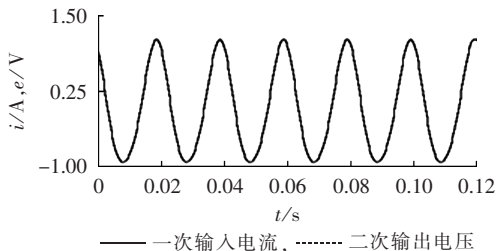


图 10 补偿后积分器的输出

Fig.10 Output of integrator after compensation

4 实验测试

利用图 8 所示的系统对其数字积分进行稳态特性测试,在实验室取额定电流为 300 A,用全功能互

感器校验仪进行比对,得到误差曲线如图 11 所示。一次与二次波形跟随如图 12 所示,其中,一次电流已转换成同相位的电压信号。从图 11 的误差曲线可以看出,采用本文设计的数字积分器的 PCB 平面 Rogowski 线圈电流互感器具有很好的线性度,比差和角差误差较小,能够满足电流互感器 0.2 级的精度要求。由图 12 的波形图可以看出,其具有很好的稳态特性。由于实验室条件所限,未能对其暂态特性进行实验验证。

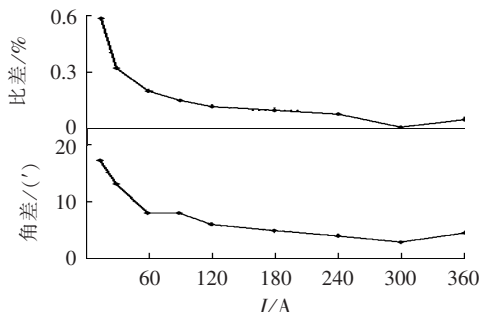


图 11 实验数据

Fig.11 Experimental data

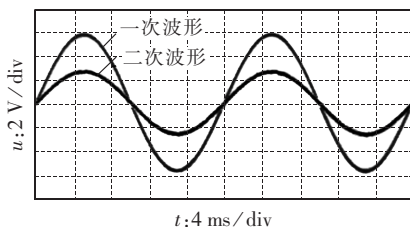


图 12 一次电流与二次电压波形图

Fig.12 Waveforms of primary current and secondary voltage

5 结论

本文对基于 Rogowski 线圈的电流互感器的积分技术进行了研究,针对模拟积分受环境影响大的不足,着重对数字积分进行研究并且设计了基于 STM32F103 和梯形积分算法的数字积分器,实验测试取得令人满意的结果。

参考文献:

[1] 段雄英,邹积岩,张可畏. 电压/电流组合型电子式互感器的研究[J]. 电工技术杂志,2002,21(5):9-12.
DUAN Xiongying,ZOU Jiyan,ZHANG Kewei. Research on combined electronic current and voltage transducers[J]. Electrotechnical Journal,2002,21(5):9-12.
[2] YU D C,CUMMINS J C,WANG Z D,et al. Correction of current transformer distorted secondary currents due to saturation using artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2001,16(2):189-194.
[3] 陈庆,李红斌,张明明,等. 3 种 Rogowski 线圈的设计及其性能分析[J]. 仪表技术及传感器,2005(7):54-55,58.
CHEN Qing,LI Hongbin,ZHANG Mingming,et al. Design and performance analysis of three Rogowski[J]. Instrument Technique

- and Sensor, 2005(7):54-55, 58.
- [4] 申烛,王士敏,罗承沐. 一种电子式电流互感器的研制[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(18):41-44.
SHEN Zhu, WANG Shimin, LUO Chengmu. Development of an electronic current transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18):41-44.
- [5] 李红斌,陈庆,张明明,等. 一种基于印刷电路板的高准确度 Rogowski 线圈[J]. 高电压技术, 2004, 30(4):54-56.
LI Hongbin, CHEN Qing, ZHANG Mingming, et al. Rogowski coils with high accuracy based on printed circuit boards[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(4):54-56.
- [6] 彭春燕,周有庆,曹志辉,等. 新型 PCB 空心线圈电流互感器的设计与研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5):31-34.
PENG Chunyan, ZHOU Youqing, CAO Zhihui, et al. Design and research on new PCB air-core coil current transducer[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):31-34.
- [7] RAY W F, DAVIS R M. Wide bandwidth Rogowski current transducers; the integrator[J]. EpE Journal, 1993, 3(2):116-122.
- [8] 张卫东,崔翔. 光纤瞬态磁场传感器的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1):88-92.
ZHANG Weidong, CUI Xiang. Development of an optical fiber transient magnetic field sensor and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1):88-92.
- [9] 龚伟,周有庆,王嗣常,等. 一种测量小电流的 PCB 平面型 Rogowski 线圈[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22):79-82.
GONG Wei, ZHOU Youqing, WANG Sichang, et al. A planar Rogowski coil based on PCB for low current measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22):79-82.
- [10] NIEWCZAS P, CRUDEN A, MIEHIE W C, et al. Error analysis of an optical current transducer operating with a digital signal processing system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(6):1254-1259.
- [11] 张可畏,王宁,段雄鹰,等. 用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12):104-107.
ZHANG Kewei, WANG Ning, DUAN Xiongying, et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12):104-107.
- [12] 李岩松,张国庆,于文斌,等. 自适应光学电流互感器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11):101-105.
LI Yansong, ZHANG Guoqing, YU Wenbin, et al. Adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11):101-105.
- [13] AKIN E, KAYA M, KARAKOSE M. A robust integrator algorithm with genetic based fuzzy controller feedback for direct vector control[J]. Computers and Electrical Engineering, 2003, 29(5):379-394.
- [14] 郭志忠. 电子式互感器评述[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15):1-5.
GUO Zhizhong. Review of electronic instrument transformers[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15):1-5.
- [15] 李九虎,郑玉平,古世东,等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7):94-98.
LI Jiuhu, ZHENG Yuping, GU Shidong, et al. Application of electronic instrument transformer in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7):94-98.
- [16] 郭郴艳,游大海. 新型电子式电流互感器测量精度分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8):27-29.
GUO Chenyan, YOU Dahai. Analysis of measurement precision of electronic current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8):27-29.

作者简介:

王晓明(1985-),男,山西平遥人,硕士研究生,主要从事电子式互感器及电力系统微机保护与综合自动化方面的研究工作(E-mail:renzhe002@163.com);

周有庆(1944-),男,河北故城人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统微机保护与综合自动化方面的研究工作;

彭红海(1972-),男,湖南怀化人,讲师,博士研究生,主要从事电力系统微机保护与综合自动化方面的研究工作。

Research and design of digital integrator based on Rogowski coil

WANG Xiaoming, ZHOU Youqing, PENG Honghai, ZHANG Yunfei, HU Haibo

(Electricity and Information Engineering College, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Integrator is the key element of electronic current transducer based on Rogowski coil. The temperature characteristics of analog integrator are analyzed. Both theoretic analysis and experimental data indicate the temperature is its most influencing factor. Digital integrator has better accuracy and higher stability than analog integrator. Trapezoidal formula is applied in digital integral algorithm and its responses to steady and transient currents are analyzed and simulated. Measures to deal with the drift and initialization of digital integrator are proposed. A digital integrator based on STM32F103 is designed and tested with the new-style PCB planar Rogowski coil current transducer. Its validity is proved by experimental data.

Key words: electronic current transducer; Rogowski coil; PCB style electronic current transducer; analog integrator; digital integrator