

新型电子式电流互感器测量精度分析

郭柳艳, 游大海

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 通过对新型电子式电流互感器的基本测量原理进行介绍和分析可知: 采用 Rogowski 线圈为传感头的电子式电流互感器, 就必须再加入积分环节, 从而使电子式电流互感器的精度受积分器精度的影响较大。从集成运放输入失调电压、偏置电流及其漂移、集成运放增益和带宽、温度变化对积分电路的影响 3 个方面分析了传统的模拟积分器对测量精度的影响, 并总结出了误差公式。最后, 提出了数字式积分器的必要性和可行性, 给出了数字式积分器的实现方案。

关键词: 电子式电流互感器; Rogowski 线圈; 模拟积分器; 数字式积分器

中图分类号: TM 452

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)08-0027-03

1 Rogowski 线圈测量原理

电子式电流互感器与电磁式电流互感器相比, 具有绝缘可靠、体积小、重量轻、动态范围大、线性度好、精度高、频带响应宽; 数字输出, 能实现发电厂、变电站全数字化、微机化和智能化^[1-2]等优点。电子式电流互感器采用 Rogowski 线圈作传感头。Rogowski 线圈不含铁芯, 不存在磁饱和, 且测量范围大。

Rogowski 线圈是将粗细均匀的导线均匀密绕在环形等截面的非磁性骨架上而形成空心线圈, 其线圈原理图如图 1 所示。

当被测电流通过位于 Rogowski 线圈中间的一次导体时, 由于电磁感应, 一次导体中电流的时间变化率 di/dt 产生的磁场会在线圈内感应出电势, $e(t) = -M(di/dt)$,

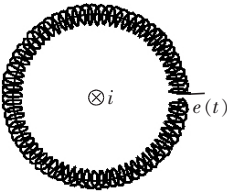


图 1 Rogowski 线圈原理
Fig.1 Theory of Rogowski coil

M 为导体和线圈之间的互感系数。为得到所需电流信号, 对 $e(t)$ 进行积分, 即 $i(t) = i(0) - \int_0^t e(t) dt$ 。由于 Rogowski 线圈的输出正比于输入电流对时间的导数, 需要积分环节还原成原始电流信号。大量实验表明: Rogowski 线圈具有良好的线性度和准确度^[3-5], 因此积分器的性能就直接影响了电子式电流互感器的精度。

2 模拟积分器的误差分析

模拟积分器的结构形式多样, 为了分析方便以理想模拟积分器为例。其结构如图 2 所示。

当集成运放的开环增益无限大, 输入失调电压、输入偏置电流及其漂移为零时, 其输出为

$$e_o = -\frac{1}{RC} \int e_i dt \quad (1)$$

当集成运放的开环增益为无限大时, 由于负反馈的作用, 输出电压 e_o 应为积分电容器上的电压。

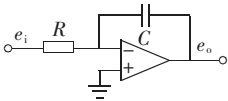


图 2 理想模拟积分器
Fig.2 Ideal analog integrator

2.1 集成运放输入变量对积分电路的影响

图 3 为考虑了集成运放的输入失调电压、输入偏置电流以及其漂移影响的积分电路, 它的输出电压为^[6]

$$e_o = -\frac{1}{RC} \int e_i dt + \frac{1}{RC} \int U_i dt + \frac{1}{C} \int I_p dt + U_i \quad (2)$$

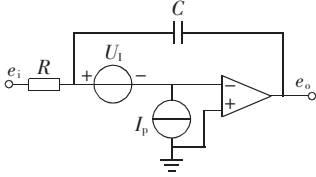


图 3 考虑失调电压、偏置电流的积分电路
Fig.3 The integral circuit considering maladjusted voltage and bias current

由式(2)可知: 积分电压的误差是由 U_i 、 I_p 以及漂移所引起的。当 $e_i = 0$ 时, 积分器的输出电压不为零。输入失调电压的积分将产生电压, 其大小与 U_i 的大小成比例, 极性取决于 U_i 的极性。输入的偏置电流 I_p 对积分电容器充电也要产生电压。这 2 个电压随着积分时间的推移而线性增大, 直到集成运放饱和为止。

2.2 集成运放增益和带宽对积分电路的影响

集成运放的开环频率特性为^[6]

$$K(s) = \frac{K\omega_0}{s + \omega_0} = \frac{K/\tau}{s + 1/\tau} \quad (3)$$

式中 K 为低频增益; τ 为集成运放的时间常数; s 为复频率, 即 $s = j\omega$ 。

由式(3)可知:集成运放的开环频率特性有一个位于 $1/\tau$ 的极点。当 $K \gg 1, KRC \gg \tau$ 时,积分电路的传输函数为

$$H(s) = -\frac{K}{[(\tau/K)s+1](KRCs+1)} \quad (4)$$

模拟积分电路在实轴上仅有一个位于原点的极点,而增益和带宽为有限值的积分电路在实轴上有 2 个极点。图 4 示出了理想模拟积分电路、实际积分电路的频率特性以及集成运放的开环增益特性(图中, K 为低频增益, ω 为角频率, 1 为集成运放开环特性, 2 为理想积分特性, 3 为实际积分特性)。由图可知:实际积分器在低频范围内,由于集成运放的开环增益有限值,在高频范围内,由于带宽是有限值,都呈现出不理想状态。

图 5 为积分电路对阶跃信号的瞬态响应特性。从图中可知:实际积分电路和理想积分电路的响应特性几乎是一致的。但是,由于带宽的限制,实际积分电路的瞬态响应滞后于理想电路的瞬态响应一个时间 t_2 ,如图 5(a)所示(图中 1 为理想积分响应, 2 为实际积分响应,下同)。当积分时间很长时,输出电压 $e_o(t)$ 近似于按指数规律变化,最后达到极限值,如图 5(b)所示。

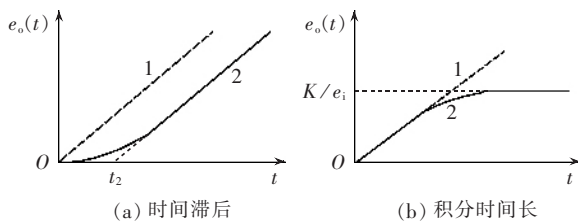


图 5 积分电路的瞬态响应特性

Fig.5 Transient response characteristic of integral circuit

2.3 温度变化对积分电路的影响

由式(1)可得图 2 所示积分器输出信号的幅值: $E_o = E_i / (\omega RC)$ (此处假设输入信号为正弦信号), 记 $K_1 = 1 / (\omega RC)$ 为积分器的积分系数。

K_1 的温度系数为

$$\frac{dK_1}{K_1 dT} = \omega RC \frac{d}{dT} (\omega RC)^{-1} = -\left(\frac{dR}{R dT} + \frac{dC}{C dT}\right)$$

可见 K_1 的温度系数是电阻 R 温度系数和电容 C 温度系数之和。假设电阻的温度系数为 $\pm 5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 电容的温度系数为 $\pm 10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 温度变化 100°C , 则 $(1/K_1)(dK_1/dT) = 0.15\%$, 积分器受温度变化的影响较大,不能满足 0.2 级的精度要求^[7]。另外,温度系数为 5×10^{-6} 的电阻价格昂贵,温度系数为 10×10^{-6} 的电容,不仅价格昂贵,而且体积也较大。

2.4 引入的误差

由式(1)可得: $e_o = -e_i / (j\omega RC)$ (假设输入为正弦交流,电阻和电容值为 25°C 时的值),考虑失调电

压和偏置电流的影响,表达式为

$$e'_o = U_1 + \frac{1}{j\omega C} I_p + \frac{1}{j\omega RC} U_1 - \frac{1}{j\omega RC} e_i$$

恒定温度下的误差为

$$\Delta e = e'_o - e_o = U_1 + \frac{1}{j\omega C} I_p + \frac{1}{j\omega RC} U_1$$

考虑温度变化的影响,电阻值为 $R' = R(1+\alpha)$, 电容值为 $C' = C(1+\beta)$,其中 α, β 为电阻、电容的温度系数。

积分器的输出电压为

$$e''_o = U_1 + \frac{1}{j\omega C'} I_p + \frac{1}{j\omega R' C'} U_1 - \frac{1}{j\omega R' C'} e_i = U_1 + \frac{1}{j\omega C(1+\beta)} I_p + \frac{1}{j\omega R(1+\alpha)C(1+\beta)} U_1 - \frac{1}{j\omega R(1+\alpha)C(1+\beta)} e_i$$

其输出误差为

$$\Delta e' = e'_o - e''_o = \frac{I_p}{j\omega C} \frac{\beta}{1+\beta} + \frac{U_1}{j\omega RC} \times \frac{\alpha+\beta+\alpha\beta}{(1+\alpha)(1+\beta)} + \frac{e_i}{j\omega RC} \frac{\alpha+\beta+\alpha\beta}{(1+\alpha)(1+\beta)}$$

由上述表达式可知:失调电压、偏置电流对模拟积分器的输出造成误差,温度对电阻和电容的影响,也使得模拟积分器输出有误差。此外,积分电容产生的泄漏电流引起电容器电压泄放,集成运放的转换速率,引线的泄漏电阻和引线电感都会引起积分器的误差。另外,模拟积分器的反馈和补偿的设计不够灵活。对于电子式电流互感器中的积分器,要求其长时间稳定的工作,完全克服这些问题是十分困难的^[8]。以上这些原因也限制了使用模拟积分器的电子式电流互感器在电力系统中的应用。

3 数字积分器

为了克服上述模拟积分器对电子式互感器的影响,提高测量的精度,需采用高精度的数字式积分器。数字积分器与模拟积分器相比具有 3 个特点。

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/数转化器和集成运放等模拟电路结构简单稳定,受外界影响小,实现其积分器功能的算法则完全不受环境的影响,并可以针对模拟电路的偏移进行有效的补偿。

b. 相位特性好。模拟积分器的模拟器件参数不同,会轻微引起相位响应变动,需要校准;数字式积分器的相位响应由算法决定,具有一致性。

c. 数字积分器结构灵活,调节方便^[9]。

数字积分器的硬件框图如图 6 所示^[3,10]。

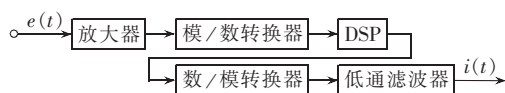


图 6 数字积分器结构框图

Fig.6 Structure of digital integrator

Rogowski 线圈输出的电压信号适当放大后,经 AD 转换在 DSP 中进行积分运算,积分后经 DA 转换,低通滤波得到所需的电流信号。

数字积分器的软件编程可采用矩形积分、梯形积分等积分思想,综合考虑运算的采样点数和积分结构形式,选用梯形积分公式可以满足实际的需要。另外,软件中还应实现消除放大器和 ADC 引入的直流偏移的带通滤波器环节,为了减小误差,用软件实现在 Rogowski 线圈输出的电压信号正向过零处启动积分功能等。

数字式积分器其硬件结构简单,软件部分主要是算法的实现,两者均较容易实现。数字式积分器设计灵活,受环境影响小,可靠性高。

4 结语

本文主要分析了集成运放对积分电路的影响,温度对积分电路的影响,并总结出误差公式。失调电压、偏置电流、温度变化对积分电路的影响,成为影响测量准确度的主要问题,也限制了使用模拟积分器的电子式电流互感器在电力系统中的应用。数字积分器与模拟积分器相比受环境温度影响小、精度高、调节灵活,将会广泛应用到电子式电流互感器中,有着很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 刘锋,林清泉,陈丽辉,等. 基于 Rogowski 线圈的电流测量装置的研制[J]. 机电技术,2005(1):88-90.
LIU Feng,LIN Qing-quan,CHEN Li-hui,et al. The development of current transducer based on the Rogowski coil[J]. Mechanical & Electrical Engineering,2005(1):88-90.
- [2] 翟小社,王颖,林莘. 基于 Rogowski 线圈电流传感器的研制[J]. 高压电器,2002,38(3):19-26.
ZHAI Xiao-she,WANG Ying,LIN Xin. The development of current transducer based on the Rogowski coil[J]. High Voltage Apparatus,2002,38(3):19-26.
- [3] 张可畏,王宁,段雄英,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 Ke-wei,WANG Ning,DUAN Xiong-ying,et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(12):104-107.

- [4] 乔峨,安作平,罗承沐. 应用在混合式光电电流互感器中的 Rogowski 线圈[J]. 变压器,2000,37(5):17-21.
QIAO E,AN Zuo-ping,LUO Cheng-mu. Rogowski coil used in optical current transformer[J]. Transformer,2000,37(5):17-21.
- [5] 乔卉,刘会金,王群峰,等. 基于 Rogowski 线圈传感器的光电电流互感器的研究[J]. 继电器,2002,30(7):40-43.
QIAO Hui,LIU Hui-jin,WANG Qun-feng,et al. The research of optical current transducer based on the Rogowski coils[J]. Relay,2002,30(7):40-43.
- [6] 孔有林. 集成运算放大器及其应用[M]. 修订本. 北京:人民邮电出版社,1988.
- [7] 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 Su-nan,TIAN Zhao-bo,ZHAO Xi-cai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):108-113.
- [8] ANTONA D G,LAZZARONI M,OTTOBNI R,et al. AC current-to-voltage transducer based on digital processing of Rogowski coils signal[C]//Sensors for Industry Conference,2002,2nd ISA/IEEE. Houston,USA:IEEE,2002:72-77.
- [9] NIEWCZAS P,CRUDEN A,MICHINE 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.
- [10] 张明明,张艳,李红斌,等. Rogowski 线圈电流互感器的积分器技术[J]. 高压技术,2004,30(9):13-16.
ZHANG Ming-ming,ZHANG Yan,LI Hong-bin,et al. Technology of designing integrator of Rogowski current transducer[J]. High Voltage Engineering,2004,30(9):13-16.
- [11] 袁伟群,栗保明. 外积分式 Rogowski 线圈电流畸变校正方法的研究[J]. 南京理工大学学报,2003,27(4):345-348.
YUAN Wei-qun,LI Bao-ming. Revision method for current distortion of external integration Rogowski coil[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology,2003,27(4):345-348.
- [12] 洪珠琴,金涌涛,刘会金,等. 一种实用的电子式电流互感器研制[J]. 电测与仪表,2005,42(471):13-16.
HONG Zhu-qin,JIN Yong-tao,LIU Hui-jin,et al. The development for a applied electronic current transducer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2005,42(471):13-16.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

郭郴艳(1982-),女,湖南郴州人,硕士研究生,从事微机继电保护的研究(E-mail:guochenyan_1982@yahoo.com.cn);
游大海(1957-),男,湖北武汉人,教授,博士研究生导师,现从事电力系统继电保护和电力系统综合自动化工作。

Analysis of measurement precision of electronic current transducer

GUO Chen-yan,YOU Da-hai

(Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: From the analysis of the basic measuring principle of the electronic current transducer, the current transducer with Rogowski coil as its sensor must apply the integrator,the precision of which influences greatly the precision of electronic current transducer. The influence of traditional analog integrator on measuring precision is analyzed from three aspects of integrated operational amplifier:the maladjusted input voltage,bias current and its drift,the gain and band width and the temperature change. The error formula is summarized. The necessity and feasibility of the digital integrator are presented,and its realization plan is provided.

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