

Rogowski 线圈中积分环节的研究

朱超¹, 蒋煜², 梅军¹, 郑建勇¹

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 苏州供电局, 江苏 苏州 215000)

摘要: 主要分析了电子式互感器中模拟积分器与数字积分器的积分原理, 并针对传统数字积分算法对低频干扰抑制的不足, 提出了基于低频增益平坦模拟积分器的数字积分算法, 有效克服了零漂的影响, 降低了直流误差, 解决了积分中的初值整定问题, 大幅提高了测量精度。针对电力系统故障时的暂态特性, 采用该积分算法进行了建模研究, 验证了该积分算法的有效性与可靠性, 其测量精度可以达到国家 0.2 级标准。

关键词: Rogowski 线圈; 模拟积分器; 数字积分器; 双线性变换; 电子式电流互感器

中图分类号: TM 452.93

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.012

0 引言

随着电力工业的发展, 电力传输系统容量不断增加, 运行等级也越来越高, 传统的电磁式互感器已难以满足需求。而以 Rogowski 线圈为传感头的电子式互感器, 其测量线性度好, 无饱和, 测量频率范围宽, 反应速度快, 不存在磁饱和的问题, 适用于测量变化速度快的大电流, 可用于电力系统高压侧电流的检测、保护和控制, 已成为电力系统的发展趋势^[1-3]。

但由于 Rogowski 线圈的输出电压正比于被测电流对时间的微分, 因此需要对输出电压进行积分, 以还原出被测电流信号, 所以积分环节对于电子式互感器是相当重要的。目前现场使用的多以惯性环节构成的模拟积分器为主。由于实际器件不是理想器件, 运放的漂移、电容的泄漏与损耗等使得模拟积分器在长期运行时很可能出现随时间和外界环境温度进行的漂移现象。为了克服模拟积分器的缺陷, 可以使用数字积分的方法^[4-6]。数字积分器设计灵活, 受环境干扰小, 可靠性和可重复性高, 避免了传统模拟积分器温漂、时漂的问题。

1 Rogowski 线圈的传感原理

Rogowski 线圈的等效电路图如图 1 所示, 其中, R_0 为 Rogowski 线圈的内阻, L_0 为 Rogowski 线圈的自感系数, R_L 为负载电阻, C_0 为 Rogowski 线圈的匝间电容, $e(t)$ 为 Rogowski 线圈的感应电势。

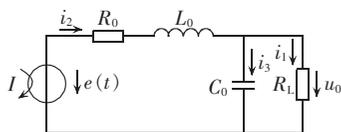


图 1 Rogowski 线圈等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit of Rogowski coil

进行基本电路分析, 并作拉普拉斯变换可得:

$$\frac{U_0(s)}{e(s)} = \frac{R_L}{L_0 R_L C_0 s^2 + (L_0 + R_L C_0)s + (R_L + R_0)} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-12-26; 修回日期: 2013-06-13

根据设计不同的参数, Rogowski 线圈可分为内积分式和外积分式 2 种。当 $L\omega \gg R_L + R_0$ 并且 $1/(C\omega) \gg R_L$ 时, 负载电阻上的电压 U_0 与被测电流的大小成正比关系, 为内积分式空心线圈电流互感器; 当 $R_L \gg L\omega + R_0$ 且 $1/(C\omega) \gg R_0 + L\omega$ 时, 负载电阻上的电压 U_0 与被测电流对时间的微分成正比关系, 为外积分式空心线圈电流互感器, 需要积分电路来还原被测电流。外积分式空心线圈电流互感器在电力系统中使用广泛, 适用于中低频段。外积分电路分为有源型和无源型 2 种, 应用较广的是信噪比较高、增益灵活可调的有源积分方式^[7-8]。有源积分方式可用模拟积分和数字积分 2 种方式实现。

2 模拟积分器的原理

基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器, 在传感环节, 测得电压 $e(t) = -M \frac{di_1(t)}{dt}$, 根据电磁感应原理, 测得电压相位理论上超前被测电流 90° , 在积分环节可以将相位还原, 配合理想模拟积分器, 则被测电流的相位不会产生畸变^[9-10]。模拟积分器中使用的运算放大器只有在线性工作区内可以正常工作, 存在饱和问题。为了抑制积分器的饱和, 实际使用中在非理想积分器的积分电容 C 两端并联反馈电阻 R_f , 如图 2 所示。

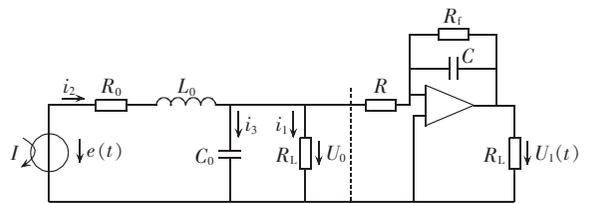


图 2 电子式电流互感器等效电路与积分环节

Fig.2 Equivalent circuit of electronic current transducer with integrator

这样由 Rogowski 线圈和带反馈通道的模拟积分器组成的系统联合系统传递函数为:

$$H(s) = \frac{U_1(s)}{I(s)} = \frac{U_1(s)}{U_0(s)} \frac{U_0(s)}{U(s)} \frac{U(s)}{I(s)} = \frac{-R_f}{R(1+sR_fC)} \times \frac{1}{L_0C_0s^2 + (L_0/R_L + R_0C_0)s + (R_0/R_L + 1)} \frac{-Ms}{1} \quad (2)$$

但是若积分器的反馈参数配置不当,其暂态输出波形将严重失真。适当地提高积分器的反馈电阻 R_f 值以及积分电容 C 可以改善其暂态传变特性。但在实际应用中,模拟积分器受到严重的稳定性困扰。实际物理器件存在失调电流、偏置电流和温度漂移等非理想因素的干扰,产生的直流量经过积分电容的累积,最终在输出端叠加在信号上输出。

完全理想的运算放大器在实际中是无法实现的,在实际中使用的运算放大器是指由 IC 构成的运算放大器,图 3 给出了其简化的等效电路。由图 3 可知,在考虑运算放大器的高频响应时,输入与输出波形的响应情况是不同的,对于阶跃响应,当输入振幅较小时,由于电容 C 和其他因素的影响会出现波浪形的滞后,输入振幅较大时,由于 SR 的影响会使输出产生直线状的滞后;对于正弦波的响应,在频率很高时,将会出现一定的相位滞后。

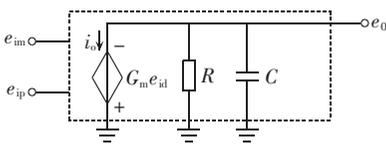


图 3 IC 运算放大器的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of IC amplifier

此外,当有大振幅输入时,由于 IC 内部不会瞬间发生大电流,所以输出的变化需要时间,这种变化的快慢用转换速率来表征。转换速率指运算放大器的输出电压在单位时间内能够变化的电压量。由于转换速率的存在,运放的响应是有滞后的,这样高频的输入电压将与理论值不相等而产生误差。

采用 IC 运算放大器实现的模拟积分电路,在输入信号经过其中进行运算积分的过程中,由温度变化、电磁干扰等产生的电压漂移、器件本身产生的噪声等,都是无用信号,作为误差计入,但由于模拟积分电路的放大效应,微小误差经过负反馈加入输入端信号中多次循环放大,最终对测量结果造成极大的干扰,甚至会淹没有用信号,对后期测量和保护动作造成极大不利,这也是电子式电流互感器应用中需要解决的一大问题^[11-12]。

3 数字积分器的原理

同模拟积分器相比,数字积分器具有较多优点,如结构简单,受温漂、时漂的影响较小,性能稳定,相位特性优良,结构灵活,调节方便等。利用软件和芯片编程即可简便地实现数字积分功能,便于调试和检测。

常见的数字积分算法主要有复化矩形算法、梯形算法、Simpson 算法等^[13-14]。设 T_s 为采样间隔,以上 3 种积分算法的 z 传递函数 H_R, H_T 和 H_S 分别为:

$$H_R(z) = \frac{T_s}{z-1} \quad (3)$$

$$H_T(z) = \frac{T_s(z+1)}{2(z-1)} \quad (4)$$

$$H_S(z) = \frac{T_s(z^2+4z+1)}{3(z^2-1)} \quad (5)$$

由 z 域传递函数可以看出存在极点 $z=1$,由于 $z=e^{j\omega}$,即 $\omega=0$ 时,出现极值,若存在直流分量,积分值将会不稳定,直流分量将会被无限放大。

因此若采用简单的数字积分算法进行积分,由于数据字长有限为 16 位,经过几个周期之后就很快溢出了。因为 AD 的前端电路对信号进行抗混叠滤波等信号处理时,将不可避免地引入直流分量^[15]。用传统的数字积分方法积分,积分值就会随着运行时间而不断偏移,最终超出寄存器所能表示的数值范围而溢出。

4 数字积分器的实现

4.1 数字积分器的设计

为了减小输入的低频分量带来的影响,可参考低频增益平坦模拟积分器进行数字积分器的设计,该积分器对于低频分量有很好的抑制作用,积分器的电路图如图 4 所示^[16]。

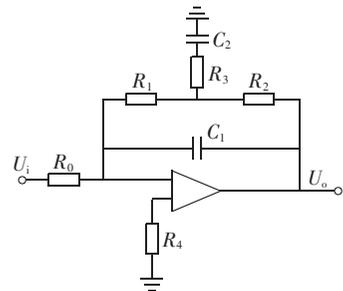


图 4 低频增益平坦模拟积分器电路图

Fig.4 Circuit of low-frequency gain-flattening analog integrator

该积分器的传递函数为:

$$H(s) = \frac{U_o(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{R_0} \frac{\alpha_1 s + R}{\alpha_1 C_1 s^2 + \alpha_2 s + 1} \quad (6)$$

其中, $\alpha_1 = (R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1) C_2$; $\alpha_2 = R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_3 C_2$; $R = R_1 + R_2$ 。

通过已知的模拟滤波器设计数字滤波器,其本质就是从 s 平面到 z 平面的映射变换,通常有脉冲响应不变法和双线性不变法。但由于脉冲响应不变法本身具有频谱周期延拓的特性,会产生频谱混叠效应,所以失真较大,适用范围较小,而双线性变换法克服了这一缺陷。

双线性变换的映射关系使 s 平面的虚轴映射为 z 平面的单位圆,使模拟域 $-\infty \sim \infty$ 的变化压缩为数字域频率 $-\pi \sim \pi$ 的变化。可以令 $s = \frac{2(1-z^{-1})}{T_s(1+z^{-1})}$,代入式(6)中有:

$$H(z) = \frac{az^{-2} + bz^{-1} + c}{dz^{-2} + ez^{-1} + f} \quad (7)$$

其中, $a = RT_s - 2\alpha_1$; $b = 2RT_s$; $c = RT_s + 2\alpha_1$; $d = R_0(4\alpha_1 C_1 - 2T_s\alpha_2 + T_s^2)$; $e = R_0(2T_s^2 - 8\alpha_1 C_1)$; $f = R_0(4\alpha_1 C_1 + 2T_s\alpha_2 + T_s^2)$ 。

由式(7)得到系统的幅频和相频特性曲线如图5所示。从幅频曲线图中可以看出,0 Hz 时的幅频响应为 -12 dB,即系统将直流量衰减至原来的 1/4,而将 50 Hz 的基波略微放大,可以有效降低直流误差的影响。但该积分器对低于 20 Hz 的低频干扰信号进行了幅值上的有效抑制,因此低频相移误差对测量结果影响很小,能满足电子式互感器 0.2 级精度的要求。

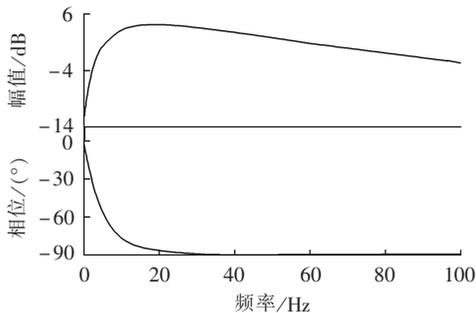


图5 低频增益平坦积分算法 Bode 图

Fig.5 Bode diagram of low-frequency gain-flattening integrating algorithm

根据式(7)推得积分器的递推公式为:

$$Y(n) = [aX(n-2) + bX(n-1) + cX(n) - dY(n-2) - eY(n-1)]/f \quad (8)$$

4.2 积分初值的整定

从递推公式可以看出,要通过递推求 $Y(n)$ 的值,必须要获得开始递推的时刻 $Y(0)$ 与 $Y(1)$ 的值,而 $X(n)$ 的值可以通过采集器采集获得。由于 $Y(n)$ 是 $X(n)$ 的积分值,因此可以根据 $X(n)$ 在取极大值时 $Y(n)$ 为 0 的特点,在 $X(n)$ 的极大值到来时进行积分。但由于 $X(n)$ 在取极大值时变化较慢,因此该方法误差较大^[8]。通常可以假定积分时 $Y(0)$ 与 $Y(1)$ 的初值为 0,则积分后输出的 $Y(n)$ 中就会叠加一个直流分量 \bar{Y} ,对 $Y(n)$ 进行一个周期即 200 点的积分得到 \bar{Y}' ,取均值 $\bar{Y} = \bar{Y}'/200$,再将输出的结果进行直流补偿即可。

5 电力系统暂态仿真研究

电力系统模型如图 6 所示,控制仿真变压器模型在 0.1 s 发生 AB 两相间 50% 短路故障,0.2 s 消除

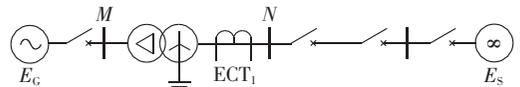


图 6 电力系统仿真模型

Fig.6 Simulation model of power system

故障,仿真总时长为 0.3 s。

互感器输出波形与原故障电流波形如图 7 所示。图中互感器与实际电流波形输出较吻合,正常运行情况下的误差较小;发生故障时,受故障暂态的影响,误差曲线保留了一定的暂态特性,如图 8 所示。

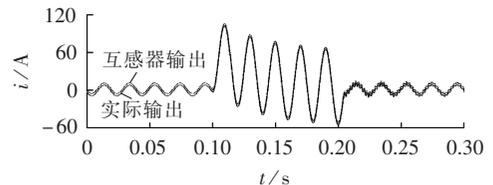


图 7 互感器输出波形与原故障电流波形

Fig.7 Output current waveform of transducer and original fault current waveform

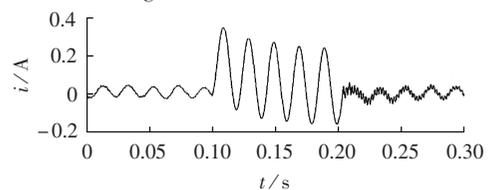


图 8 误差曲线图

Fig.8 Error curve

表 1 为数字积分的谐波相角误差与比值误差,可见采用双线性变换法得到的低频增益平坦积分算法的计算精度可以达到国家 0.2 级标准,额定电流下基波相角误差值小于 10',比值误差小于 0.2%。

表 1 数字积分的谐波相角误差与比值误差
Tab.1 Phase angle error and ratio error of digital integrator for different harmonics

谐波次数	相角/(°)	相角误差	比值误差/%
1(基波)	90.154	9'11"	0.05
2	90.093	5'24"	0.13
3	90.068	4'19"	0.28
4	90.046	2'42"	0.62
5	90.035	2'9"	0.77

6 结论

本文主要研究分析了模拟积分与数字积分算法在 Rogowski 线圈的实际应用中的原理特性,并指出了不足之处。针对数字积分器在处理低频干扰上的不足,设计出了基于低频增益平坦模拟积分器的数字积分算法,大幅降低了低频噪声干扰,有效提高了测量精度。

参考文献:

[1] 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.
- [2] AL-ALAOUI M A. Novel class of digital integrators and differentiators [C]//2008 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal,Canada:IEEE,2008:1-10.
- [3] 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.
- [4] 陈辉,陈卫,李伟. 基于Rogowski线圈的数字积分器仿真及研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(12):43-47.
- CHEN Hui,CHEN Wei,LI Wei. The simulation and research based on the digital integrator of the Rogowski coil[J]. Power System Protection and Control,2009,37(12):43-47.
- [5] 王晓明,周有庆,彭红海,等. 基于Rogowski线圈的数字积分器的研究与设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):155-159.
- WANG Xiaoming,ZHOU Youqing,PENG Honghai,et al. Research and design of digital integrator based on Rogowski coil [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(2):155-159.
- [6] 贾春荣,邸志刚,张庆凌,等. 电子式电流互感器相位补偿设计[J]. 电力系统自动化,2007,31(19):76-79.
- JIA Chunrong,DI Zhigang,ZHANG Qingling,et al. Phase compensation design of electronic current transducer[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(19):76-79.
- [7] 李岩松,张国庆,于文斌. 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. Adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(11):101-105.
- [8] 李伟,尹项根,陈德树,等. 基于Rogowski线圈的电子式电流互感器暂态特性研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):34-37.
- LI Wei,YIN Xianggen,CHEN Deshu,et al. Transient characteristics of Rogowski coil-based current sensor[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):34-37.
- [9] 刘艳峰,尚秋峰,周文昌. Rogowski线圈典型外积分电路暂态性能比较与仿真[J]. 电力自动化设备,2006,26(7):30-33.
- LIU Yanfeng,SHANG Qiufeng,ZHOU Wenchang. Comparison of Rogowski coil transient performance with typical outer integral circuits and its simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(7):30-33.
- [10] 张鑫,牟龙华. Rogowski线圈用新型积分电路设计[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):115-117.
- ZHANG Xin,MU Longhua. Design of integral circuit for Rogowski coil[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):115-117.
- [11] 纪哲,黄纯,周有庆,等. 基于PCB平面型Rogowski线圈的电流互感器误差分析及积分器设计[J]. 电力自动化设备,2011,31(2):76-78,89.
- JI Zhe,HUANG Chun,ZHOU Youqing,et al. Error analysis and integrator design for planar Rogowski coil current transformer based on PCB[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(2):76-78,89.
- [12] 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.
- [13] 马文玲. Rogowski线圈电流测量系统中数字式积分的设计[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,2009,43(1):59-62.
- MA Wenling. Design of digital integration in Rogowski coil current measurement system [J]. Journal of Huazhong Normal University:Natural Science,2009,43(1):59-62.
- [14] ZHANG Xin,MU Longhua. Design for digital integrator of Rogowski coil based on pipeline structure[C]//Power and Energy Engineering Conference. Chengdu,China:[s.n.],2010:1-4.
- [15] 尹明,田志国,周水斌. 基于Rogowski线圈的数字积分器实用化研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(16):99-102.
- YIN Ming,TIAN Zhiguo,ZHOU Shuibin. Research on practicability of digital integrator based on Rogowski coil[J]. Power System Protection and Control,2010,38(16):99-102.
- [16] WEI Binghu,KAI Chengli,JIANG Fengliu. Research on digital optics fiber current transformer[C]//42nd International Universities Power Engineering Conference. Brighton,England:[s.n.],2007:509-512.

作者简介:

朱超(1987-),男,江苏南京人,博士研究生,主要研究方向为变电站自动化与嵌入式系统设计(E-mail:xingchen4646@126.com);

蒋煜(1987-),男,江苏苏州人,助理工程师,研究方向为变电运行生产与管理;

梅军(1971-),男,江苏淮安人,副教授,博士,研究方向为电力电子与电力传动;

郑建勇(1966-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为变电站自动化与嵌入式系统设计。

Integrator of Rogowski coil

ZHU Chao¹,JIANG Yu²,MEI Jun¹,ZHENG Jianyong¹

(1. Electrical Engineering School,Southeast University,Nanjing 210096,China;

2. Suzhou Power Supply Bureau,Suzhou 215000,China)

Abstract: Aiming at the insufficiency of conventional digital integrator in low-frequency interference rejection,the principles of analog and digital integrators used in electronic current transducer are analyzed and an integrating algorithm based on the low-frequency gain-flattening analog integrator is proposed for the digital integrator,which gets rid of the influence of zero drift to effectively lower the DC error and sets the initial value of integrator to greatly increase the measurement accuracy. It is modeled and studied according to the transient characteristics of power system,and the test results show its measuring accuracy meets the national criterion of 0.2 level,proving its validity and practicability.

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