

基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的积分器技术

谢彬, 尹项根, 张哲, 李伟

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 积分器是基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器中的关键环节之一。分别论述了三种积分器的设计与实现, 并对其性能进行了比较: 用模拟电路实现的积分器不但在测量稳态电流上有很高的精度, 还能较真实地反映故障电流的暂态过程, 能稳定可靠地应用于测量、保护等实际工程领域。用数值算法实现的积分器由于其精度与算法实现问题, 还需进一步研究与完善。采用集成芯片构成的数字积分器适用于计量系统, 但在保护系统中使用具有一定的局限性。

关键词: Rogowski 线圈; 电子式电流互感器; 积分器; 暂态性能

Technology in designing integrator of electronic current transducer based on Rogowski coil

XIE Bin, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, LI Wei

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

Abstract: Integrator is a key element in an electronic current transducer based on Rogowski coil. This paper designs three types of integrators and compares their performances. The integrator designed by analog circuit could measure steady AC current accurately, and also it has a good performance in describing the transient process of fault current. So it can be used in the engineering field credibly for measuring and protecting system. Digital integrator designed by numerical formula needs the further research because of its deficiency in accuracy and numerical formula. Another digital integrator designed by chips could be applied in the measuring system, but it is limited in protecting system.

Key words: Rogowski coil; electronic current transducer; integrator; transient performance

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)03-0045-06

0 引言

传统电磁式电流互感器(CT)随着电力传输容量需求的迅速增长和电网电压等级的不断提高, 已逐渐暴露出体积大、造价高、磁饱和、绝缘结构日趋复杂等缺点。随着电力系统计量与保护数字化、微机化和自动化等发展趋势, 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器凭借其原理上的优势, 成为新一代电流互感器研究的新方向, 受到国内外研究人员的广泛关注^[1]。

积分器作为基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器的关键环节之一, 影响着互感器的测量性能。近年来, 不少研究人员对其做了大量的研究工作, 并取得了丰硕的成果。研究表明, 配合适当的积分器, 基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器具有测量精度高, 频带响应范围宽等优点^[2-4]。需要指出, 作为刻画电力系统一次电流的设备, 电子式电流互

感器不仅需要在测量交流稳态电流上具有较高的精度。为了满足控制、保护等需要, 它还需能比较真实地反映故障电流的暂态过程。本文在研究积分器能高精度还原稳态电流的基础上, 重点对三种积分器的暂态反映性能进行了研究, 并做了比较。

为了更好地说明积分器性能的重要性, 我们先介绍下 Rogowski 线圈的结构与基本原理。Rogowski 线圈是新一代电子式电流互感器中最常用到的传感单元。图 1 为具有圆形骨架的 Rogowski 线圈原理结构图。其输出电压 e 正比于被测电流的变化率

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

式中: M 为感应出的电压与被测电流间的比例系数; i 为被测电流。通过对 Rogowski 输出电压的积分可以还原被测信号。

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

通过实验证明, Rogowski 线圈具备良好的线性度和准确度, 因此为了保证基于 Rogowski 线圈的电子式电流互感器能够良好的应用于保护与测量, 需要精心设计高精度的积分器来还原被测电流。下面将分别论述三种积分器的设计与实现, 先分析积分器的频率特性, 再通过仿真实验考察其对故障电流响应性能。

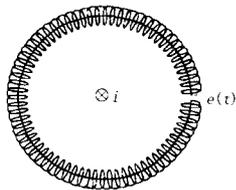


图 1 具有圆形骨架的 Rogowski 线圈原理结构图

Fig.1 Theory of round Rogowski coil

1 用模拟电路方式实现的积分器

传统上用高性能运算放大器构建模拟积分器, 图 2 为理想模拟积分器的结构。电压信号经模拟积分器后被还原为正比于电流的信号 e_1 , 即

$$e_1 = -\frac{1}{RC} \int e(t) dt = R_S i \quad (3)$$

式中: $R_S = M / RC$ 是传感器的灵敏度, R 为积分器电阻; C 为积分器电容。

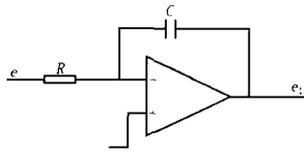


图 2 理想模拟积分器结构

Fig.2 Structure of ideal analog integrator

通过 Matlab 仿真, 可以得到其频率响应特性图, 如图 3 所示。从图中可以看出, 理想积分器的幅、相频曲线分别具有 -20dB/dec 的衰减和 -90° 的相移。

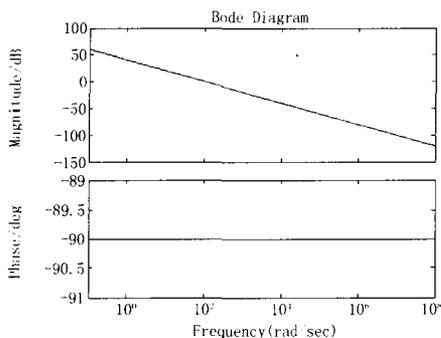


图 3 理想积分器的频率响应特性

Fig.3 Frequency response of ideal integrator

采用理想的模拟积分器与 Rogowski 线圈构成联合系统进行研究。图 4 为 Rogowski 线圈与理想模拟积分器组成的联合系统的等值电路。

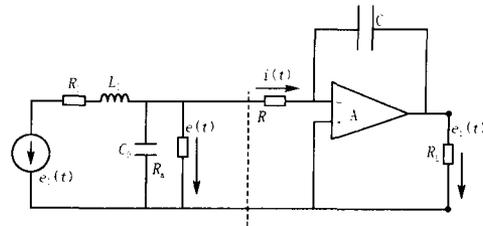


图 4 Rogowski 线圈配合理想积分器的模型

Fig.4 Model of Rogowski coil with ideal integrator

图 4 中, R_0 是 Rogowski 线圈绕组自身的电阻, L_0 为线圈的自感, C_0 是线圈的等效杂散电容, R_a 为取样电阻。电阻 R 、理想电容 C 以及运算放大器 A 构成理想积分器, R_L 是积分器的负载电阻。

$e_1(t)$ 是积分器的输出, $e(t)$ 是 Rogowski 线圈的输出。 $e_0(t)$ 是理想 Rogowski 线圈的输出电压。

根据图 4, 写出系统的传递函数如下:

$$H(s) = \frac{E_1(s)}{I(s)} = \frac{E_1(s)}{E(s)} \cdot \frac{E(s)}{E_0(s)} \cdot \frac{E_0(s)}{I(s)} = \frac{1}{RCS} \cdot \frac{M \cdot S}{L_0 C_0 S^2 + (\frac{L_0}{R_0} + R_0 C_0) S + (\frac{R_0}{R_a} + 1)} \quad (4)$$

根据实际制作的 Rogowski 线圈的相关参数, $R_0 = 270 \Omega$, $L_0 = 21.56 \text{ mH}$, $C_0 = 0.12 \text{ nF}$, $R_a = 10 \text{ k}\Omega$ 。由于式(4)中的 M 、 R 和 C 的值只关系到幅频响应的衰减倍数, 不会影响相频响应特性, 故令式(4)中的 $M / RC = 1$, 然后用 Matlab 仿真, 就可以得到 Rogowski 线圈联合理想积分器的频率响应特性, 如图 5 所示。

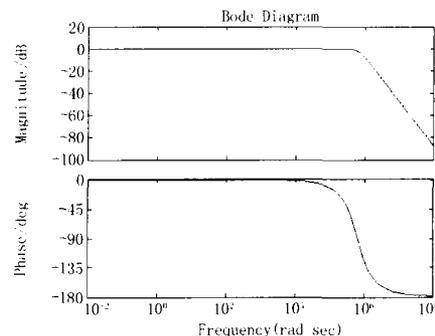


图 5 Rogowski 线圈配合理想积分器的频率响应特性
Fig.5 Frequency response of Rogowski coil with ideal active integrator

从图 5 可以看出, 采用理想积分器时, 联合系

统的工作频率范围从 0.01 rad/sec 到 10 rad/sec(即 200 次谐波), 此频带宽度已大大超过《IEC61850: 变电站通信网络和系统》标准所要求能测量的最高 40 次谐波。在此频率范围内, 理想积分器输出信号的幅值和相位不受频率的影响。由此可知, 理想积分器的输出将能良好地反映被测电流。

电力系统发生故障时, 通常故障电流包括含有稳态电流、衰减交流以及衰减直流分量。为了重点研究突发故障时直流或交流衰减过程, 故假设式(5)表示故障电流。

$$i(t) = I_m \cos \omega t - A \cdot I_m e^{-t/T_1} \sin(2\omega t) - I_m e^{-t/T_2} \quad (5)$$

当取 $I_m = 1$, $A = 0.5$, $T_1 = 0.1$ s, $T_2 = 0.05$ s 时, 用 Matlab 对上述模型进行仿真, 将式(5)确定的电流作为被测电流作用于联合系统的传递函数, 即可得到仿真输出波形, 如图 6 所示。

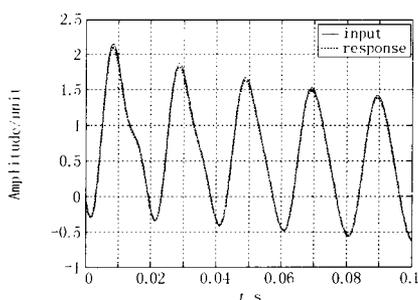


图 6 采用理想积分器时, 对故障电流的响应
Fig.5 Response to fault current with ideal integrator

从仿真结果可以看出, Rogowski 线圈配合理想积分器时, 对故障电流的暂态特性具有良好的还原性, 能够很好地反映被测电流, 不会产生波形畸变。

实际应用中, 为了解决积分漂移的问题, 使积分器长期稳定工作, 一般在积分电容 C 两端并联一个 MΩ 级的负反馈电阻 R_f 。图 7 虚线右边即为实际积分器简单电路的一种。

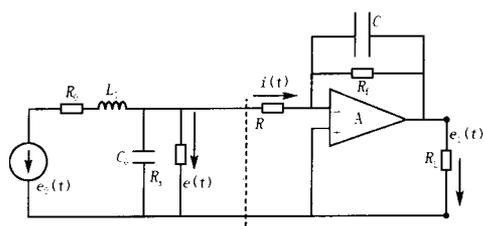


图 7 Rogowski 线圈配合实际积分器的模型

Fig.7 Model of Rogowski coil with non-ideal integrator

根据实际情况, 设计反馈电阻 R_f 为 1 MΩ, 积分电容为 0.1 μF。可以得到上图中模拟积分器的

频率响应特性, 如图 8 所示。

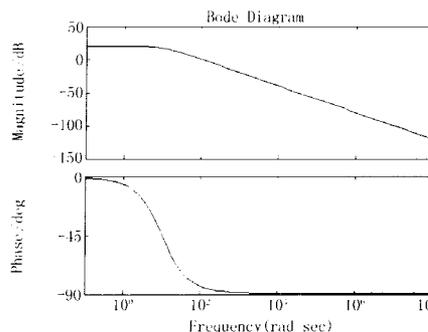


图 8 积分电容为 0.1 μF 时, 模拟积分器的频率响应特性
Fig.8 Frequency response of analog integrator while $C=0.1 \mu F$

可以看出, 非理想积分器的幅、相频曲线只有在 1000 rad/sec 以后才有 -20 dB/dec 的衰减和 -90° 的相移, 在低频段不再具备理想积分器的频率特性, 不能真实的还原低频范围内的被测电流。但当被测电流是单一频率的正弦稳态交流电流时, 积分器的输出仍然具有良好的精度与稳定性。

为了研究上述积分器的对故障暂态电流的反映性能, 根据图 7, 可以写出新的联合系统的传递函数:

$$H(s) = \frac{E_1(s)}{I(s)} = \frac{E_1(s)}{E(s)} \cdot \frac{E(s)}{E_0(s)} \cdot \frac{E_0(s)}{I(s)} = \frac{R_f}{R(1+R_fCS)} \cdot \frac{M \cdot S}{L_0 C_0 S^2 + (\frac{L_0}{R_a} + R_0 C_0)S + (\frac{R_0}{R_a} + 1)} \quad (6)$$

仍然采用式(4)中的各项 Rogowski 线圈的自身参数, 将式(5)确定的故障电流作为被测电流, 对式(6)表达的系统进行仿真分析。图 9 为运用 Matlab 仿真得到的输入输出波形对比图。从图中可以看出, 与输入电流相比较, 积分器的输出严重失真, 输出波形衰减速度明显快于被测电流。

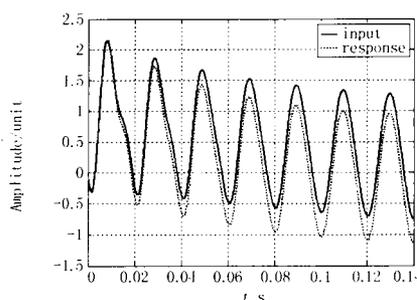


图 9 积分电容为 0.1 μF 时, 对故障电流响应的仿真图
Fig.9 Response to fault current with non-ideal integrator while $C=0.1 \mu F$

经研究发现，造成暂态特性严重恶化的原因是，在故障电流期间，反馈电阻和积分电容构成了一阶放电回路，导致积分器在低频 ($f < 1/(R_f C)$) 时输出波形比被测电流衰减快。为了改善积分器输出的暂态特性，可以提高反馈电阻或者积分电容的参数。

于是将积分电容增加到 $2\mu F$ ，反馈电阻保持不变，通过仿真，得到其频率响应特性如图 10 所示。

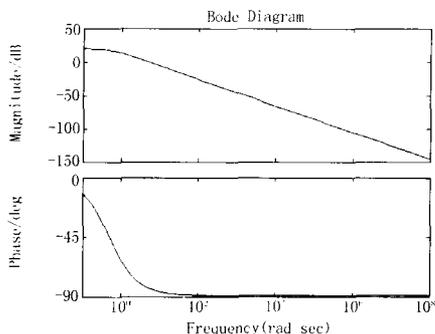


图 10 积分电容为 $2\mu F$ 时，模拟积分器的频率响应特性
Fig.10 Frequency response of analog integrator while $C=2\mu F$

从图中可以看出，相对于积分电容为 $0.1\mu F$ 时积分器的频率特性，其在低频段同样具有比较理想的幅、相频特性，趋近于理想化。因此对于低频内的电流，也能较真实的反映。同样，积分器的输出能很好地还原交流稳态电流。

继续采用式(5)确定的故障电流作为被测电流，通过仿真可以得到故障暂态电流的输入输出波形对比图，如图 11 所示。

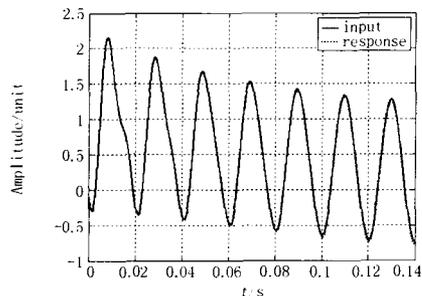


图 11 积分电容为 $2\mu F$ 时，对故障电流响应的仿真图
Fig.11 Response to fault current with non-ideal integrator while $C=2\mu F$

调整积分电容的参数，可以明显改善积分器的暂态响应性能。图 12 为某次动模实验中当被测电流为故障暂态电流时，分流计与积分器的输出波形对比图。

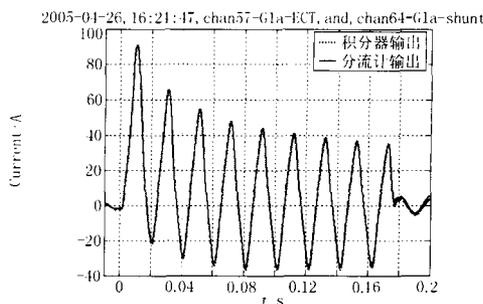


图 12 实验中分流计与积分器的输出波形对比图
Fig.12 Comparison between current sensor and shunt in experiment

从图中可以明显看出，Rogowski 线圈配合采用积分电容为 $2\mu F$ 的模拟积分器的输出，与从分流器获得的真实的原方电流波形非常吻合，它能良好地反映原方的故障暂态电流波形。

所以，模拟积分器的反馈参数决定着其本身的性能。当参数配置不当时，暂态输出波形将严重失真。适当提高积分器的反馈电阻或者积分电容的参数则可以改善其暂态响应性能。采用 Rogowski 线圈配合具有良好参数的模拟积分器，不但在测量稳态电流时具有较高的精度，而且能比较真实的反映故障电流的暂态过程。

2 用数值积分方法实现的积分器

随着高速数字信号处理技术的出现，根据采样定理，对于低频信号可以直接采样，然后利用数值方法进行数字积分来还原被测量。这就是数字积分器产生的基础和依据。

数字积分器设计灵活，受环境干扰性小，可靠性可重复性高。通常数字积分器的设计，可以采用 A/D 转换芯片 (ADC) 将 Rogowski 线圈所得的模拟信号转换成数字信号，输入至 DSP，再设计相应的数值积分算法，通过编程来实现^[5]。如图 13 所示。

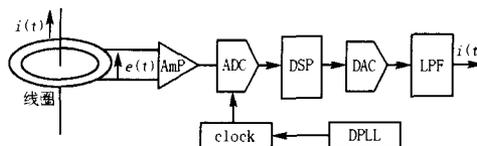


图 13 基于 ADC、DSP 的数字积分器框图
Fig.13 Integrator diagram based on ADC and DSP

若要达到较高的测量准确度，ADC 的转换位数要足够高，这样 ADC 芯片的价格自然昂贵；或者只要样点数足够高，采用低分辨率的 ADC 也可以达到精度要求，但这样会加重 CPU 的负担，不利

于互感器其它功能的实现。因此选择合适的积分算法成为数字积分器实现的关键问题之一。根据数值积分的原理, 就是对采样值相加求和的算法, 最简单的是矩形求和, 如图 14 所示。假设采样频率为 f , 则时间间隔为 $\Delta t = 1/f$, 则式(2)可转化为

$$I(q) = -\frac{1}{M} \sum_{q=1}^{q=Q} E(q) \times \Delta t \quad (7)$$

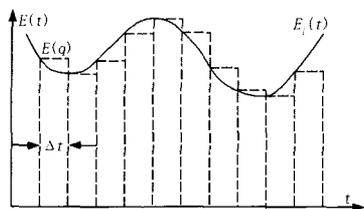


图 14 数字积分器采样波形计算图

Fig.14 Computing diagram of digital integrator sampling

实际应用中, 为了提高数字积分的精度, 通常采用复化的梯形求积公式。式(8)为一般的梯形公式。

$$\int_0^t E(t)dt = \frac{t}{2} [E(0) + E(t)] \quad (8)$$

把 $[0, t]$ 分成 n 个小区间 $[t_i, t_{i+1}]$, 其中

$$t_i = 0 + ih, h = t/n,$$

$$\int_0^t E(t)dt = \sum_{i=0}^{n-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} E(t)dt = \frac{h}{2} \sum_{i=0}^{n-1} [E(t_i) + E(t_{i+1})] = \frac{h}{2} [E(0) + 2 \sum_{i=0}^{n-1} E(t_i) + E(t)] \quad (9)$$

式(9)为实际计算中通常采用的复合梯形求积公式。它的 z 传递函数为

$$H(z) = \frac{T(z+1)}{2(z-1)} \quad (10)$$

式中 T 为采样间隔。由 $z = e^{j\omega}$, 得,

$$H(\omega) = \frac{T(e^{j\omega} + 1)}{2(e^{j\omega} - 1)} \quad (11)$$

采样间隔设为 0.000 01 s, 经过仿真得到复化梯形求积公式的频率特性, 如图 15 所示。

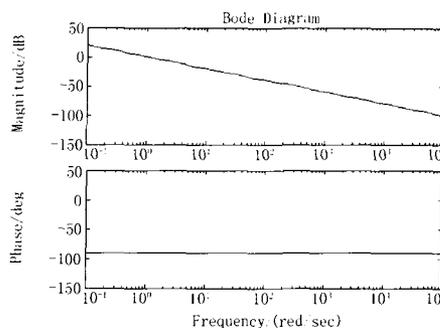


图 15 梯形积分的频率响应图

Fig.15 Frequency response of trapezoidal integrator

从图中可以看出, 算法的采样率为 10 k/s, 其幅频响应具有 -20 dB/dec 的衰减, 相频响应具有 -90° 的相移, 非常理想化。

为了验证算法对故障暂态电流响应的可靠性, 再将式(5)表示故障电流, 其微分形式为

$$i(t) = -\omega I_m \sin \alpha t + \frac{A}{T_1} \cdot I_m e^{-t/T_1} \sin(2\alpha t) - 2A \cdot I_m e^{-t/T_1} \cos(2\alpha t) + \frac{I_m}{T_2} e^{-t/T_2} \quad (12)$$

其波形如图 16 所示。

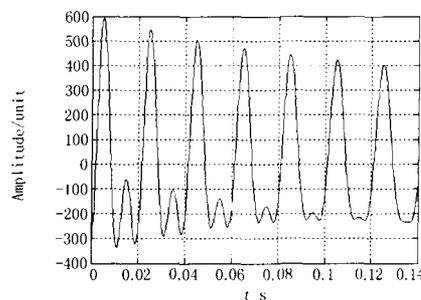


图 16 故障电流微分形式波形图

Fig.16 Diagram of differential fault current

采用复化梯形求积公式对其积分, 利用 Matlab 编写代码进行仿真, 结果如图 17 所示。可以发现, 利用梯形积分公式进行数值积分, 能很好地还原故障电流波形。

根据数值积分算法设计的数字积分器计算原信号的幅值及相位数据, 其结构简单稳定, 受温漂、时漂影响小, 抗干扰性强, 但准确度受 A/D 转换准确度、采样点数及计算准确度影响, 而且算法受到限制。有待于进一步的研究工作设计完善。

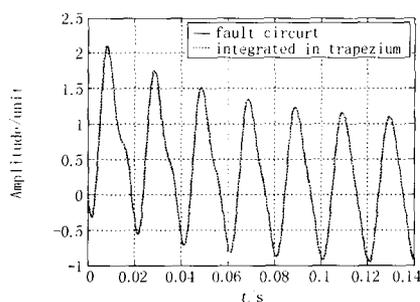


图 17 采用梯形积分对故障电流响应仿真图

Fig.17 Response to fault current with trapezoidal integrator

3 用集成电路实现的数字积分器

随着芯片技术的发展,目前已经有了集成电路完成数字积分器的任务,某公司为电能计量工作开发的一种芯片,其内部模拟通道 1 有一个数字积分器,特别适合于具有 di/dt 输出的电流互感器。

这种芯片内部精度优良的数字积分器,在利用片内的 ADC 实现数字化后可以进行数字积分并最终串行数字量输出。其幅频、相频响应曲线图如图 18、19 所示。

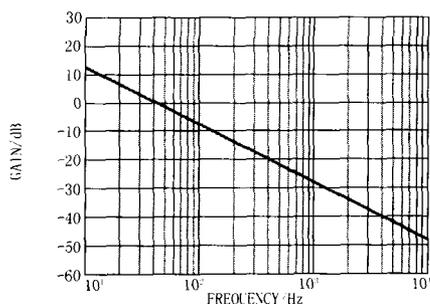


图 18 集成芯片的幅频响应曲线图

Fig.18 Magnitude response of the chip

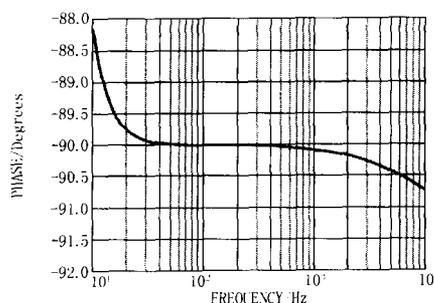


图 19 集成芯片的相频响应曲线图

Fig.19 Phase response of the chip

图 18、19 中可以看出数字积分器的相频响应和幅频响应接近于理想情况,在 50 Hz 到 500 Hz 的频率范围内具有 -20dB/dec 的衰减和 -90° 的相

移。由于这种芯片片内数字积分器提供直接接口到 Rogowski 线圈,从而省去了外部的模拟积分器,可以保证良好的长时间稳定性能。消除了传统的电流互感器的相位误差和大电流时过饱和的缺点,而且成本非常低廉。完全可以满足计量通道的需要。

但是将其应用于保护系统时,由于故障电流含有丰富的谐波分量和衰减的非周期分量,而该芯片的相频响应曲线表明其在低频段对信号不再具有 -90° 的相移。并且随着信号频率的继续减小,它对信号的相移差会越来越大。因此,采用这种芯片对故障电流进行积分后,输出的信号相对于原电流会产生畸变,导致不能真实的反映暂态过程,使其在保护系统中的使用存在一定局限性。

4 结束语

采用模拟电路设计的积分器不但在测量稳态电流上具有很高的精度,而且能比较真实的还原故障暂态电流,使其能稳定可靠的应用于电力系统保护、测量等实际工程领域。

数字积分使用积分算法计算原信号的幅值及相位数据,其温度稳定性好,抗干扰性强,但准确度受 A/D 转换准确度、采样点数及计算准确度影响。算法设计受到一定限制,还需一定的研究工作来完善。尚不能应用于实际的工程领域。

而采用集成电路构成数字积分器,电路简单,响应速度快,成本低,适用于测量精度要求高的计量系统。但由于其频率响应特性,尚不能满足保护系统的要求。

参考文献

- [1] 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,2004,3(24):108-113. LUO Su-nan, TIAN Zhao-bo, ZHAO Xi-cai. Performance Analysis of Air-core Current Transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 3(24): 108-113.
- [2] Ray W F, Hewson C R. High Performance Rogowski Current Transducers[A]. In: IEEE Industry Application Conference[C]. Roma (Italy): 2000. 3083-3090.
- [3] Ray W F, Davis R M. Wide Bandwidth Rogowski Current Transducers, Part II: the Integrator[J]. EpE Journal, 1993, 3(2): 116-122.
- [4] 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.

(下转第 86 页 continued on page 86)

表 1 详细阻抗轨迹数据

Tab.1 Detailed data of the impedance locus

时间点	时刻	段号	电阻	电抗
阻抗轨迹进入 II 段				
161	50.32	3	12.05	36.66
162	50.63	3	10.34	35.38
163	50.94	2	9.521	34.09
164	51.25	2	8.914	32.71
由 II 段进入 I 段				
3049	952.8	2	3.631	22.31
3050	953.1	1	3.977	21.90
3051	953.4	1	4.087	21.72
3052	953.8	1	3.994	21.79
3053	954.1	1	3.826	21.82
3054	954.4	1	3.777	21.82
3055	954.7	1	3.714	21.98

4 结论

利用成本低廉、功能强大的继电器特性分析软件对电力系统继电保护的動作行为进行分析,可以比较方便地找到继电保护装置不正确動作或异常動作的原因。本文提出的利用故障录波器或保护装置本身记录下来的故障量,通过建立继电器特性库和定值库,计算出動作轨迹一次定量分析保护装置的動作行为,实现了保护動作过程的透明化和可视化,在实际运用中是非常有意义的。该系统已经成功集成到继电保护故障信息管理主站系统中,在实际应用中取得了满意的效果。

参考文献

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
WANG Mei-yi. Application of the Relay Protection in Electric Power Grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [2] 高翔, 张沛超, 章坚民. 电网故障信息系统应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

GAO Xiang, ZHANG Pei-chao, ZHANG Jian-min. Applied Technologies of Fault Information System in Electric Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.

- [3] 程刚, 张沛超. 基于 MATLAB 和 ATP 的微机距离保护动态仿真[J]. 继电器, 2006, 34(22): 5-8.
CHENG Gang, ZHANG Pei-chao. Dynamic Simulation of Microprocessor-based Distance Protection Based on MATLAB and ATP[J]. Relay, 2006, 34(22): 5-8.
- [4] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WANG Wei-jian. Principle and Application of Main Electrical Equipment Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [5] 韩晓萍, 李伯国, 王肃, 等. 继电保护即故障信息系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 16-19.
HAN Xiao-ping, LI Bo-guo, WANG Su, et al. Design and Realization of Relay Protection and Fault Information System[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 16-19.
- [6] 章坚民, 朱炳铨, 蒋月良. 继电保护故障信息处理主站系统设计的的核心问题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 72-74.
ZHANG Jian-min, ZHU Bing-quan, JIANG Yue-liang. Key Issues in the Design of Master Station of Relay Protection and Fault Information System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 72-74.
- [7] 许建安. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
XU Jian-an. Relay Protection in Electric Power System[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004.

收稿日期: 2006-10-12; 修回日期: 2006-11-27

作者简介:

骆敬年(1963-), 男, 高级工程师, 长期从事继电保护及故障信息管理系统的运行管理工作; E-mail: luo_jn@ec.sp.com.cn

张沛超(1970-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统自动化的教学与科研工作;

周丽(1978-), 女, 硕士, 主要研究方向为继电器特性仿真系统。

(上接第 50 页 continued from page 50)

- [5] D'Antona G, Lazzaroni M, Ottoboni R, et al. AC Current-to-voltage Transducer Based on Digital Processing of Rogowski coils signal[A]. In: Sensors for Industry Conference, ISA/IEEE[C]. Texas (USA): 2002. 72-77.

作者简介:

谢彬(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化和微机继电保护; E-mail: bingo815@163.com

尹项根(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统继电保护和综合自动化等方面的研究工作;

张哲(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机继电保护与自动控制。

收稿日期: 2006-09-04