

Research on High-Precision Technique of Rogowski Coil Current Transformer

Tao Song, Zehu Feng

College of Electronic and Electrical Engineering, Zibo Vocational Institute, Zibo Shandong
Email: st222999@126.com

Received: Oct. 29th, 2019; accepted: Nov. 15th, 2019; published: Nov. 22nd, 2019

Abstract

According to the fact that analog devices of electronic transformer based on Rogowski coil were easily affected by temperature and other environmental factors, zero-drift and temperature-drift problems were induced. A new style of electronic transformer based on Rogowski coil was researched in this paper. The insulation structure of the new transformer was insulated by SF₆. The anti interference ability and stability was effectively improved by the double shielding of high pressure shell and grounding metallic shield cover. The Rogowski coil was applied to measure current and as protection sensing elements. The approved Al-Alaoui digital integrator based on principle of DC negative feedback was proposed, where the DC part in the input signal could be greatly inhibited. Frequency response of the improved integration algorithm was closer to that of ideal integrator, with high accuracy and good transient performance. The experimental results show that the studied Electronic Current Transformer based on Rogowski coil meets the requirement of the 0.2S level.

Keywords

Rogowski Coil, Electronic Current Transformer, Analog Integrator, Digital Integrator, DC Negative Feedback, Frequency Response

高精度Rogowski线圈电流互感器技术研究

宋 涛, 冯泽虎

淄博职业学院电子电气工程学院, 山东 淄博
Email: st222999@126.com

收稿日期: 2019年10月29日; 录用日期: 2019年11月15日; 发布日期: 2019年11月22日

摘 要

针对Rogowski线圈的电子式互感器其模拟器件易受温度、环境等因素影响, 存在零漂、温漂的问题, 本

文研究了一种新型Rogowski线圈的电子式互感器, 采用SF₆绝缘技术, 利用高压壳体与接地金属屏蔽罩的双重屏蔽作用来有效提高抗电磁干扰能力和稳定性, 采用Rogowski线圈作为被测电流的计量、保护传感元件, 提出了基于直流负反馈原理的改进Al-Alaoui数字积分器, 能较好的抑制输入信号中直流分量的影响, 改进的数字积分算法频率特性接近于理想积分器的频率特性, 具有准确度高、暂态特性好的优点。试验结果显示, 研制的Rogowski线圈电子式电流互感器准确度达到了0.2S级要求。

关键词

Rogowski线圈, 电子式电流互感器, 模拟积分, 数字积分, 直流负反馈, 频率特性

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

基于 Rogowski 线圈的电子式互感器广泛应用于电力系统测量领域[1] [2] [3] [4] [5], 本文研究了一种新型的 Rogowski 线圈电流互感器, 不需采用光供电系统, 它利用高压壳体与接地金属屏蔽罩的双重屏蔽作用来有效提高抗电磁干扰能力和稳定性[6], 通过采用直流负反馈原理, 结合 PID 控制算法, 将数字积分器输出中的直流分量反馈至输入端, 进而消除直流分量的影响[7], 并改进 Al-Alaoui 数字积分算法, 其频率特性更接近理想积分器, Rogowski 线圈电子式互感器获得更高的准确度和可靠性。

2. 结构及原理

Rogowski 线圈电流互感器采用倒立式 SF₆ 绝缘技术, 其工艺结构主要由绝缘套管、高压壳体及接地系统三部分组成。Rogowski 线圈位于一个与一次导杆同轴的金属屏蔽罩内, 作为被测电流的计量、保护传感元件, 将调制的电信号经导线通过金属管接至低压侧二次接线盒进行解调, 从而得到被测电流。金属屏蔽罩通过金属管与接地螺杆相连处于低电位侧, 测量单元位于地电位侧, 高压壳体与一次导杆处于高电位侧, 高、低压侧之间通过 SF₆ 气体绝缘, 并将地电位引到高压侧, 取消光供电系统, 传感单元消耗的电能可直接从变电站或其它处于安全电位供电设备提供[6]。本设计具有体积小, 重量轻, 价格低, 抗电磁干扰性能好, 稳定性好, 使用寿命长的特点。

Rogowski 线圈电流互感器原理图如图 1 所示, Rogowski 线圈其骨架采用非磁性材料, $i(t)$ 为穿过 Rogowski 线圈的电流, 当被测电流发生变化时, 线圈两端感应出电压 e 可用下式表示[6]:

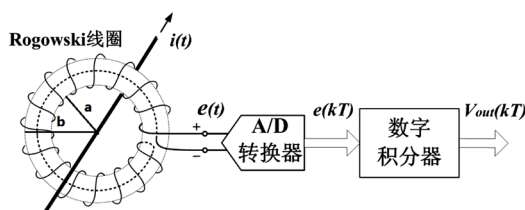


Figure 1. Rogowski coil current transformer schematic based on digital integral
图 1. 基于数字积分的 Rogowski 线圈电流互感器原理图

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu_0 h N}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \frac{di(t)}{dt} = -M \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

$$M = \frac{\mu_0 h N}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (2)$$

从上式通过计算, 将测得的感应电势进行积分处理可得到被测电流的大小。式中 $e(t)$ 为线圈的输出电压, M 为 Rogowski 线圈的互感系数, 其值与 Rogowski 线圈的形状、尺寸等有关, a 和 b 为骨架的内半径和外半径, N 为绕线匝数, h 为空心线圈厚度, μ_0 为真空磁导率。

如图 2 所示, Rogowski 线圈输出的微分信号需要积分器还原, 否则其输出会受信号中频率波动的影响[8] [9]。采用模拟积分器易受电磁干扰、环境温度变化等因素的影响, 并且积分电路中含有的抑制直流增益的电阻会导致积分器产生较大的相位差, 因此导致互感器长期运行的稳定性和可靠性降低。

数字积分器采用软件算法实现, 有矩形积分、Simpson 积分等, 其频率特性与理想积分之间存在偏差[10] [11] [12]。Al-Alaoui 将矩形积分和梯形积分取加权求和的积分算法, 也存在信号中的直流分量会使得积分算法溢出与理想积分之间存在偏差。

针对这些问题, 本文提出了改进 Al-Alaoui 数字积分算法。通过采用直流负反馈与 PID 控制算法结合, 将数字积分器输出中的直流分量反馈至输入端, 进而消除直流分量的影响, 并通过对 Al-Alaoui 数字积分算法进行改进, 使其频率特性更接近理想积分器[7]。

式(1)中 Rogowski 线圈的输出电压 $e(t)$ 与其电流成微分关系, 需要通过积分器将其还原成正比于一次电流的量。常用的模拟积分器分为无源积分和有源积分两种, 模拟积分器由于其中模拟器件存在的分散性、温漂、零漂等问题, 长期运行时性能不稳定。为了克服模拟积分器存在的问题, 因此采用如图 2 所示的数字积分技术。首先 A/D 转换器将 Rogowski 线圈输出的信号进行模数转换, 然后通过数值积分的方式还原被测信号, 得到正比于被测电流的量。图中, $e(kT)$ 为 A/D 转换器的数字量输出, $V_{out}(kT)$ 为数字积分器的输出, T 为采样时间间隔。

改进的数字积分算法可以在现场可编程门阵列(FPGA)中实现。数字积分算法利用数字信号处理技术, 可获得较高的稳定性、灵活性及兼容性, 并利用高分辨率的 A/D 转换器可实现高准确度的信号测量[7]。

3. 空心线圈设计及其性能分析

3.1. 空心线圈的数学模型

图 2 是空心线圈的等效电路的集中参数模型。其中 M 为一次电流/电压与线圈之间的互感系数, L_0 为线圈的自感, R_0 为线圈的内阻, C_0 为线圈的杂散电容, $e(t)$ 为线圈感应的电势, $u(t)$ 为线圈的输出电势。

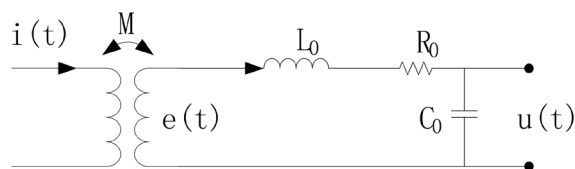


Figure 2. Concentrated parameter model of the equivalent circuit of an air-core coil
图 2. 空心线圈的等效电路的集中参数模型

以下省略推导过程, 直接给出计算公式:

3.1.1. 空心线圈的电阻

空心线圈电路可用近似方法计算:

$$R_0 = \frac{N}{2\pi r} \sqrt{f_0 \mu_r \mu_0 \pi \rho (x^2 + (2\pi r_1)^2)} \quad (3)$$

上式中: $x = \frac{2\pi R}{N}$ 为匝间距离, f_0 为一次电流频率, μ_r 为骨架相对磁导率, ρ 为导线电阻率, r 为导线的半径, r_1 为线圈截面的平均半径。

3.1.2. 空心线圈的自感

对于圆形截面的空心线圈, 其自感:

$$L_0 = \frac{\mu_r \mu_0 N^2}{2} \frac{d^2}{L + d + \sqrt{L^2 + 2L * d}} \quad (4)$$

对于矩形截面的空心线圈, 其自感:

$$L_0 = \mu_r \mu_0 N^2 \frac{h}{2\pi} \ln \frac{L+d}{L-d} \quad (5)$$

3.1.3. 空心线圈的等效电容

空心线圈的杂散电容较难测量, 目前一般采用谐振法测量。可以得出分布电容为:

$$C_0 = \frac{L_0}{R_0^2 + \omega_0^2 L_0^2} \quad (6)$$

3.1.4. 空心线圈的互感系数计算

通过对圆形骨架圆形截面空心线圈的互感系数和圆形骨架矩形截面空心线圈的互感系数的推导计算, 得到其互感系数为:

$$M = \mu_r \mu_0 N \frac{h}{2\pi} \ln \frac{L+d}{L-d} \quad (7)$$

3.2. 空心线圈的温度影响性能分析

空心线圈的互感系数 M 外界环境不变时为一固定值, 输出电压与之成正比, 当温度发生变化时, 空心线圈的截面积、输出电阻等都会发生变化, 导致其互感系数发生变化, 从而引起输出电压的变动。骨架材料一般采用FR-4玻璃纤维, 热膨胀系数为13~15 PPM/°C, 铜箔的热膨胀系数一般为17 PPM/°C左右, 可以以印制板的热膨胀系数来计算[13]。以110 kv组合型电子式互感器用空心线圈为例, 常温25°C下, $h = 3 \text{ mm}$, $R_1 = 93 \text{ mm}$, $R_2 = 120 \text{ mm}$, 则此时线圈的互感系数为[6]:

$$M = 7.647 \times 10^{-8}$$

与常温相比, 温度变化 t °C 时的互感系数为

$$M + \Delta M = \mu_0 N \frac{h(1+x*t)}{2\pi} \ln \frac{R_2(1+x*t)}{R_1(1+x*t)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{M + \Delta M}{M} &= \frac{\mu_0 N \frac{h(1+x*t)}{2\pi} \ln \frac{R_2(1+x*t)}{R_1(1+x*t)} - \mu_0 N \frac{h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}}{\mu_0 N \frac{h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}} \\ &= \frac{(1+x*t) \ln \frac{R_2(1+x*t)}{R_1(1+x*t)} - \ln \frac{R_2}{R_1}}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \end{aligned} \quad (9)$$

该电子式互感器要求在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 之间满足 0.2 S 级测量精度要求,空心线圈也应该达到这个精度,此时 $(t-25)^{\circ}\text{C}$ 的变化范围为 $-65^{\circ}\text{C}\sim25^{\circ}\text{C}$,在 matlab 中进行仿真结果可以得到,温度在 $-40^{\circ}\text{C}\sim+50^{\circ}\text{C}$ 范围内,空心线圈的互感系数变化不超过 0.05%,满足 0.2 S 级电流互感器应用要求。

4. 数字积分器设计

由于模拟积分器和常用数字积分算法相对存在不足,因此提出了两种 Al-Alaoui 数字积分算法可有效克服输入信号中直流分量产生的影响,具有较高的准确度。

4.1. 改进的 Al-Alaoui 数字积分器 I

数字积分器有矩形积分、梯形积分等多种,它们的高频响应特性与理想积分的频率响应特性存在一定差距,为了改善数字积分器的高频性能,Al-Alaoui 数字积分算法通过将矩形积分和梯形积分的传递函数按 1:3 的权重重新组合,并加入延时因子,将采样频率增加 10 倍,考虑实现非整数的采样延迟,得到的 Al-Alaoui 数字积分算法表达式如下[14] [15]:

$$H_A(z) = \frac{5}{8} \times \frac{7z^{-2} + 8z^{-7} + z^{-12}}{1 - z^{-10}} \quad (8)$$

实际应用中,由于数字积分器输入的信号 $e(kT)$ 中含有较小的直流分量,导致 Al-Alaoui 数字积分输出信号的直流分量累加,并导致积分器饱和而产生误差。Al-Alaoui 积分器的输出随输入信号中的直流分量变化,因此在 Al-Alaoui 数字积分器中引入一个反馈控制结构来解决直流分量的影响问题,如图 3 所示,改进 Al-Alaoui 数字积分器的输出直流分量可通过无限脉冲响应(IIR)数字低通滤波器和直流分量分析单元获取,然后将 $e_2(kT)$ 中的直流分量通过 PID 控制器之后反馈至输入信号 $e_1(kT)$ 中,形成一个闭环反馈控制系统。

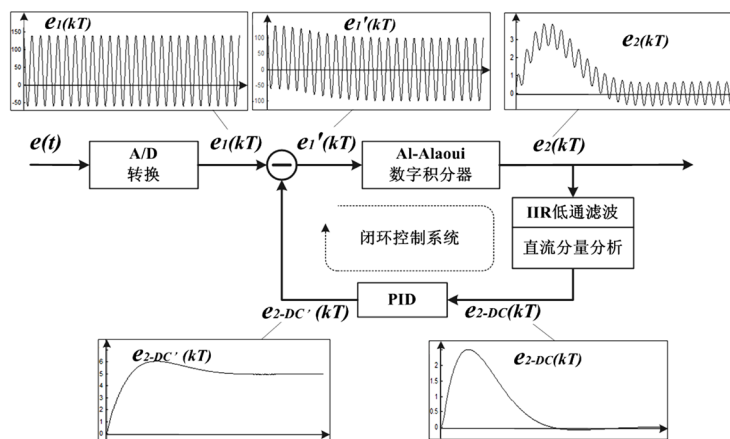


Figure 3. The first improved Al-Alaoui digital integrator
图 3. 第一种改进的 Al-Alaoui 数字积分器

在该系统中, $e_2(kT)$ 中的直流分量通过 IIR 低通滤波器和直流分析单元,经 PID 控制器调整后的反馈值 $e'_{2-DC}(kT)$ 受到输入信号中直流分量的影响,消除 $e'_1(kT)$ 和 $e_2(kT)$ 中的直流分量,并且 IIR 低通滤波器和直流分量分析单元只允许稳态直流分量通过,反馈控制系统不会影响信号中的交流分量。

4.2. 改进的 Al-Alaoui 数字积分器 II

在改进 Al-Alaoui 数字积分器 I 的基础上,通过设置衰减系数 K 得到第二种改进的 Al-Alaoui 数字积分器,其表达式为:

$$H_A(z) = \frac{5(7z^{-2} + 8z^{-7} + z^{-12})}{8(1 - Kz^{-10})} \quad (9)$$

当它满足式(5)的条件时, 改进的 AI-Alaoui 数字积分器 II 将工作在稳定状态, $e_2(kT)$ 中的直流偏移量不会增大, 此时 $e_{2-DC}(kT)$ 可由式(6)给出:

$$e_{2-DC}(T) - Ke_{2-DC}(T-10) = 10e_{1-DC}(T) \quad (10)$$

$$e_{2-DC}(kT) = e_{1-DC}(kT)/(1-K) \quad (11)$$

式中 $e_{2-DC}(kT)$ 的大小与 $e_1(kT)$ 中的直流分量成正比。尽管衰减系数 K 限制了直流偏移的增大, $e_2(t)$ 中仍然含有恒定直流偏移量, 因此提出另一个信号通路, 表达式如下:

$$e_3(kT) = e_2(kT) - e_{2-DC}(kT) \quad (12)$$

其中 $e_{2-DC}(kT)$ 指的是 $e_2(kT)$ 中的直流分量, 可通过 IIR 低通滤波器和直流分析单元获取。通过这种方式, 输出信号 $e_3(kT)$ 中不再含有直流分量, 如图 4 中的波形所示。

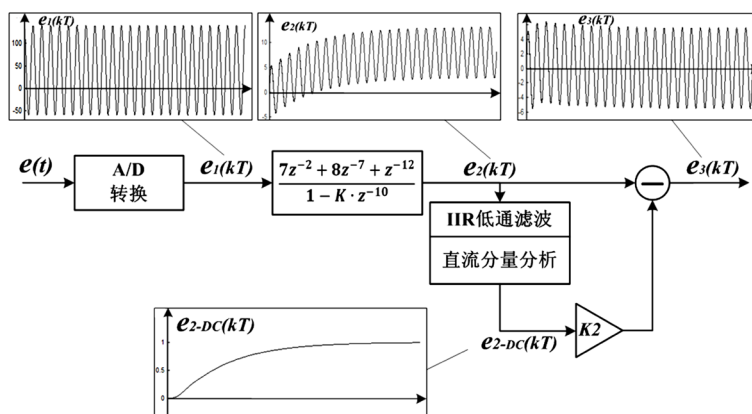


Figure 4. The second improved AI-Alaoui digital integrator
图 4. 第二种改进的 AI-Alaoui 数字积分器

在此结构中, K 的值越小, 改进 AI-Alaoui 数字积分与理想积分之间的比差和角差越大, 但是达到稳态的时间会越小。因此, 通过调整 K 的值, 可得到较小的误差和合适的调节时间, 达到较理想的积分效果。

4.3. 仿真

为了验证改进 AI-Alaoui 数字积分器 I 和 II 的性能。为了获得更快的响应时间, 改进 AI-Alaoui 数字积分器 I 中的 PID 模块的表达式为

$$H_{PID}(z) = \frac{1}{7200} + \frac{z}{4(z-1)} + \frac{z-1}{20z} \quad (13)$$

当 $K = 0.9988$ 时, 改进 AI-Alaoui 数字积分器 II 可以达到更好的低频响应, 其中的 IIR 低通滤波器和直流分析单元与 I 中是相同的, 可以通过 VHDL 程序实现。如图 5 为模拟积分器的电路图, 取典型参数, $R = 9.1 \text{ k}\Omega$, $C = 22 \text{ nF}$, $R_f = 1 \text{ M}\Omega$, $C_o = 2.2 \text{ }\mu\text{F}$, $R_o = 200 \text{ k}\Omega$ 。该模拟积分器的传递函数为:

$$H(s) = \frac{e_{out}(s)}{e(s)} = -\frac{2R_f}{R} \times \frac{\left(\frac{1}{2}R_f + R_o\right)C_0s + 1}{R_f(2R_o + R_f)C_0Cs^2 + (2R_fC + R_oC_0)s + 1} \quad (14)$$

4.3.1. 幅频特性

仿真结果如图 5 所示, Al-Alaoui 数字积分器的直流响应趋向于无穷大, 模拟积分器直流增益远大于 50 Hz 时的增益, 改进 Al-Alaoui 数字积分器 I 和 II 的直流响应趋向于 0, 较好的抑制了信号中直流分量。

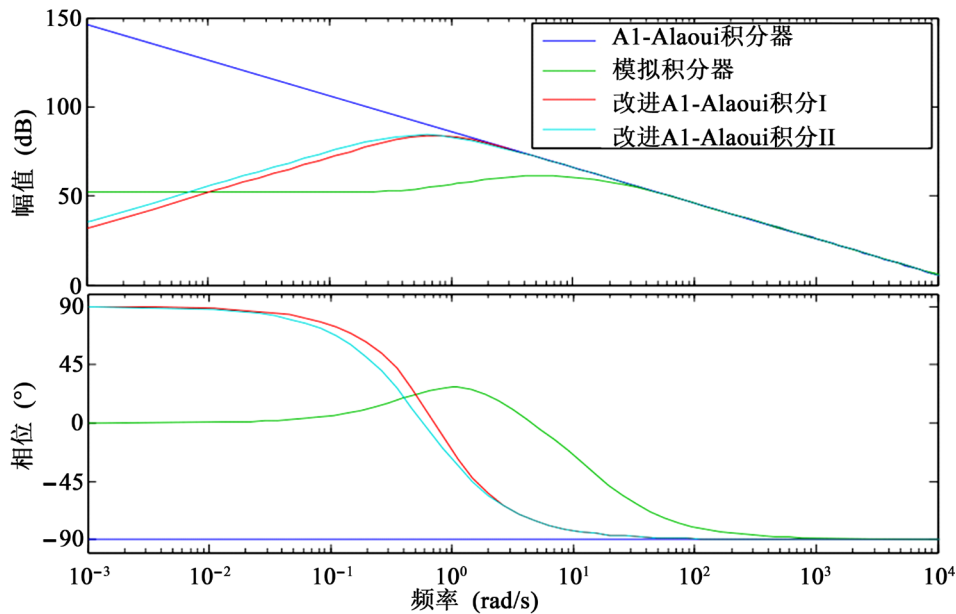


Figure 5. Amplitude and phase response of different integrators

图 5. 不同积分器的幅值和相位响应

4.3.2. 输入信号中直流分量的影响

如图 6 所示, Al-Alaoui 数字积分输出的直流分量迅速趋近于无穷大, 模拟积分器的输出中也含有直流分量, 而改进的 Al-Alaoui 数字积分在经过一个周期后直流分量趋近于零。

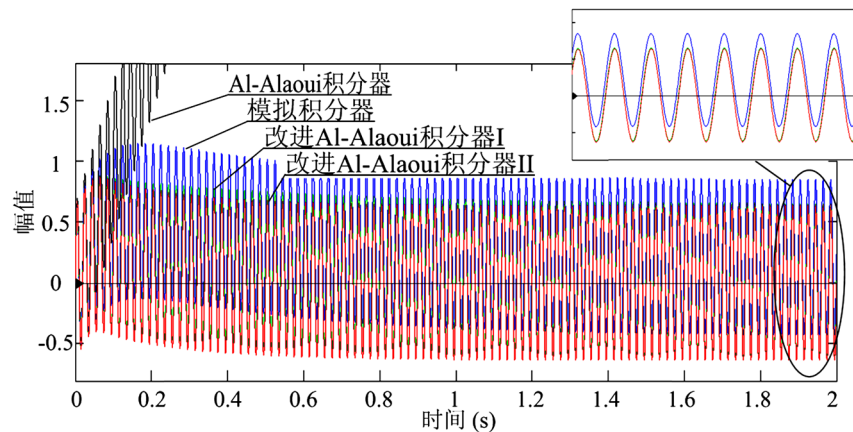


Figure 6. DC response of different integrators

图 6. 不同积分器的直流响应

4.3.3. 初始积分条件不确定的影响

图 7 中可以看出, 设计的积分器在测量工频信号(50 Hz)时相位差较小, 一个周期后基本可消除信号中直流分量的影响。

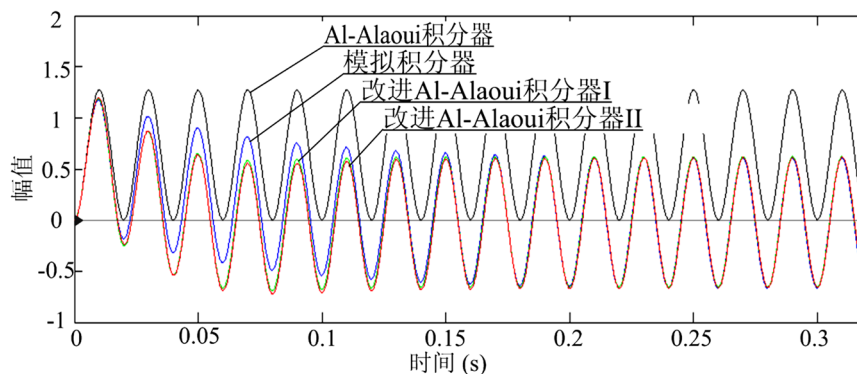


Figure 7. Response when the initial integration condition is uncertain
图 7. 初始积分条件不确定时的响应

5. 验证和结果分析

如图 10 所示测试电路进行性能测试, Rogowski 线圈的额定电流为 600 A, 三台 Rogowski 线圈电流互感器只是积分器不同。

5.1. 稳态时的基本准确度测试

如图 8 所示, 标准互感器采用准确度等级为 0.02 级的传统电磁式电流互感器, 标准互感器的二次电流信号通过标准信号转换装置转换成额定值为 4 V 的小电压信号, 然后经 24 位 PCI 4474 采集卡采集后转换成数字信号。PCI 4474 采集卡的动态范围可达 110 dB。为了保证每个互感器之间的同步, 以 PCI 4474 采集卡的板载晶振为源, 利用 RTSI 总线路由出的采样时钟分频得到同步脉冲, 来触发不同互感器之间的同步采样。测试结果如表 1 所示。

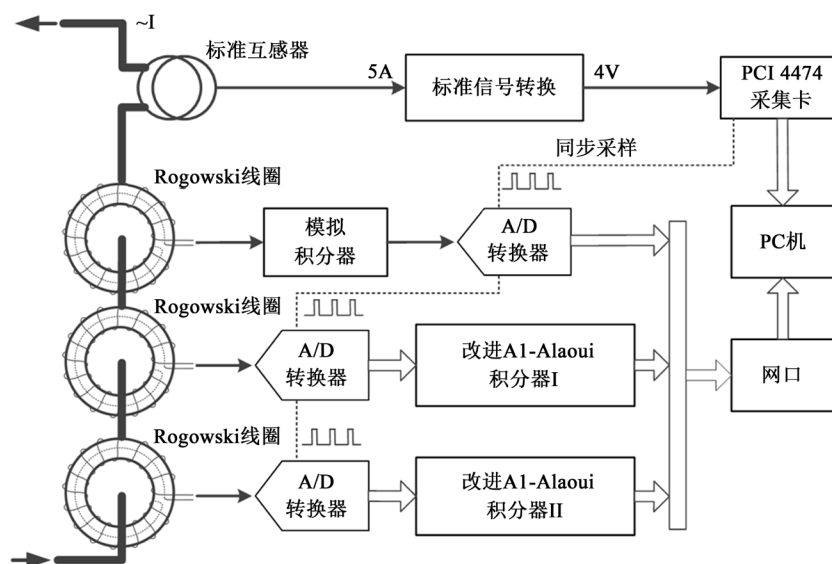


Figure 8. Integral error test schematic
图 8. 积分器的误差测试原理图

测试结果(如表 1)显示, 模拟积分器达到 0.1% 的准确度要求, 设计的数字积分器在额定电流的 5%~120% 范围内满足 0.05% 的准确度要求。

Table 1. Basic accuracy test results at steady state
表 1. 稳态时的基本准确度测试结果

一次电流百分比	采用模拟积分器		采用改进 AI-Alaoui 数字积分器 I		采用改进 AI-Alaoui 数字积分器 II	
	比差(%)	角差(°)	比差(%)	角差(°)	比差(%)	角差(°)
1%	-2.956	-1.271	-0.236	0.243	0.134	0.186
5%	-0.374	-0.429	-0.072	-0.020	0.006	0.027
20%	-0.099	-0.074	-0.012	0.006	0.026	0.004
50%	-0.044	0.108	0.003	-0.008	-0.002	0.017
80%	-0.022	0.114	0.019	0.010	-0.009	0.017
100%	-0.006	0.121	0.012	0.004	-0.005	0.019
120%	0.003	0.150	0.037	0.020	-0.008	0.013

5.2. 温度稳定性测试

如图 9 所示, 互感器放置在温控室内, 测量系统不停的记录三台互感器的比差和角差, 当温度变化时, Rogowski 线圈、A/D 转换器和模拟积分器的性能都随温度变化, 采用模拟积分器的互感器易受温度变化范围达到 0.3%, 而采用数字积分器的互感器变化小于 0.1%。

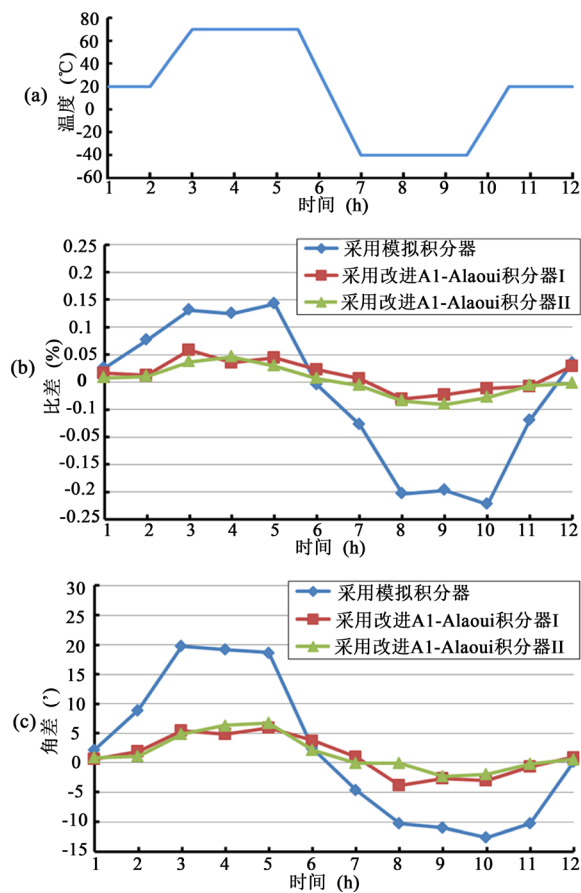


Figure 9. Temperature stability test. (a) Temperature versus time curve; (b) Ratio change; (c) Angular difference change
图 9. 温度稳定性测试。(a) 温度随时间的变化曲线; (b) 比差变化; (c) 角差变化

5.3. 暂态性能测试

Rogowski 线圈电流互感器在继电保护系统应用时, 其暂态性能非常重要[16]。为了验证电力系统故障时 Rogowski 线圈电流互感器能否准确的反映故障波形, 结果如图 10(a)所示, 试验采用额定变比为 2000 A: 75 mV 的分流器作为暂态电流的测量标准, 其信号转换成数字信号, 三台互感器分别接入回路中, 其输出由 PC 机记录和分析。

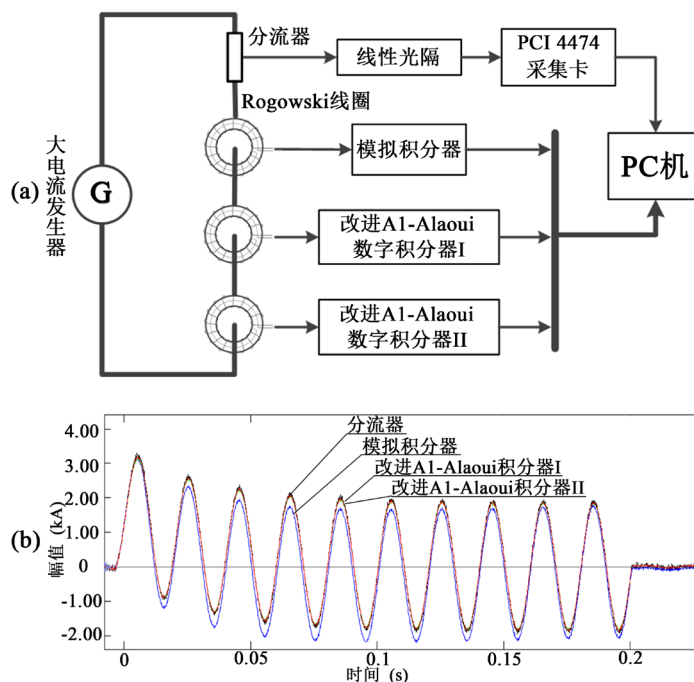


Figure 10. Transient performance test. (a) Transient performance test wiring diagram; (b) Waveform diagram of shunt and transformer

图 10. 暂态性能测试。(a) 暂态性能测试接线图; (b) 分流器和互感器的波形图

图 10(b)可以看出, 采用改进 A1-Alaoui 数字积分器的互感器暂态性能非常接近分流器的暂态性能, 比采用模拟积分器的互感器暂态性能要加理想, 其中 A1-Alaoui 数字积分器 I 的性能最好。试验结果显示设计的数字积分器具有良好的暂态性能, 可以在继电保护系统中发挥较好的作用。

6. 结论

本文研究的 Rogowski 线圈电流互感器采用倒立式 SF6 的绝缘技术, 设计了新型的测量单元和传感单元, 取消了光供电系统, 屏蔽效果好, 抗电磁干扰性能强, 提出了两种改进 A1-Alaoui 数字积分器, 采用 PID 反馈控制器和衰减系数来改进其直流响应, 进而达到理想的频率特性, 应用于 Rogowski 线圈电流互感器中使其达到更高的准确度和稳定性。根据 IEC60044-8 中对测量及保护用电子式电流互感器的准确度等级的要求, 进行准确度、工频耐压、局部放电、电磁兼容、动态稳定等实验, 设计的电子式电流互感器计量通道准确度等级为 0.2S 级, 保护通道准确度等级为 5P20, 满足 0.2S 级测量用互感器的精度要求。

基金项目

淄博市校城融合平台项目(2019ZBXC127)。

参考文献

- [1] 王黎明, 贺旭. 插板式 PCB Rogowski 线圈的计算与仿真[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1025-1033.
- [2] 陶涛, 赵治华, 潘启军, 等. 双面对称布线印制电路板型 Rogowski 线圈[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 601-608.
- [3] 陶涛, 赵治华, 潘启军, 等. 一种抗强干扰型双面对称布线 PCB 罗氏线圈[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 130-137.
- [4] 童悦, 张勤, 叶国雄, 等. 电子式互感器电磁兼容性能分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2829-2835.
- [5] 刘彬, 叶国雄, 郭克勤, 等. 电子式互感器性能检测及问题分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2972-2980.
- [6] 宋涛. 地电位供电型电子式电流互感器的设计[J]. 电测与仪表, 2012, 49(5): 80-84.
- [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.
- [8] 王宝诚, 王德玉, 邬伟扬. 罗氏线圈的频率特性分析与传感器的设计方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 21-27.
- [9] 颜楠楠, 傅正财, 李俊峰, 等. 载流体偏位对大尺寸 Rogowski 线圈雷电流测量结果的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1142-1148.
- [10] 韩小涛, 黄澜涛, 孙文文, 等. 基于 PCB 空心线圈和数字积分器的脉冲强磁场装置放电电流测量[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 13-19.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈庆, 李红斌, 张明明, 等. 采用主副印制电路板构造的 Rogowski 线圈性能分析及设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 79-82.
- [14] Verica, R. (2008) An Alternative Derivation of the Al-Alaoui Operator. *IEEE Signal Processing Letters*, **15**, 881-882.
- [15] Chafia, M. and Youcef, F. (2014) Using New Hybrid Integrators to Design IIR Fractional-Order Integrators via Impulse Invariance Method. *Circuits Systems and Signal Processing*, **33**, 643-653.
- [16] 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.