

基于高精度数字积分方法的组合型电子式互感器

李振华, 陶 渊, 张思球, 李振兴
(三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:针对传统的互感器存在的易饱和、动态测量范围小、测量频带窄等缺点,提出了一种新型的组合型电子式互感器,其绝缘结构采用倒立式 SF₆ 互感器绝缘结构,传感器采用 Rogowski 线圈和圆柱形同轴电容器,积分环节采用改进的数字积分方法,有效提高了互感器的可靠性和准确性。仿真结果及测试结果表明,该新型组合型电子式互感器测量准确度高,满足 0.2S 级及 0.2 级测量要求;与单一功能互感器相比,仅需一个绝缘本体即可实现电压电流的同时测量,具有占地面积小、成本低等优点。

关键词:组合型电子式互感器;数字积分器;圆柱形同轴电容器;Rogowski 线圈;性能测试

中图分类号: TM 45

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.022

0 引言

互感器是电力系统中的关键测量设备之一。随着智能电网的发展,电力系统对互感器的要求越来越高,在现有电子式互感器的基础上,一批组合型电子式互感器的出现在一定程度上满足了智能电网的发展需求。组合型电子式互感器可同时测量电流和电压,因此比单一互感器成本低、占用面积小。但是,组合型电子式互感器因同时含有电流传感单元和电压传感单元,其设计相较于单一的电流或电压互感器较为复杂,因此,如何保证其绝缘性能和测量准确度是需要重点研究的问题^[1-4]。近年来,对于组合式电子互感器的设计研究鲜有报道。文献[5]提出了一种用于智能型断路器的电子式电流电压组合互感器,对其基本原理、结构进行了阐述,但对传感器、数字积分算法等关键部分并未进行详细研究,也并未给出其性能测试效果。文献[6]介绍了一种应用于 Rogowski 线圈电子式电流互感器信号采集系统的压频变换器模数混合积分器方法,其能够满足 0.2S 级准确度要求。文献[7]建立了电容分压型电子式电压互感器电容分压器的数学模型,经过参数优化设计,可达到 0.2 级精度,并能有效降低制造成本。然而,以上研究主要实现单一功能的电压、电流测量。

本文设计了一种绝缘性能好、稳定性高且测量准确度高组合型电子式互感器,其传感部分采用 Rogowski 线圈和圆柱形同轴电容器,绝缘部分采用 SF₆ 气体,积分环节采用一种改进的数字积分方法,仿真结果和现场测试数据都表明这一组合型电子式互感器结合了电子式电流互感器和电子式电压互感器的优点,准确度分别满足 IEC 0.2S 级和 0.2 级标准要求。

收稿日期: 2017-12-21;修回日期: 2018-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51507091)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51507091)

1 整体结构设计

本文设计的组合型电子式互感器使用的绝缘结构与倒立式 SF₆ 互感器绝缘结构相似,其结构示意图如图 1 所示。

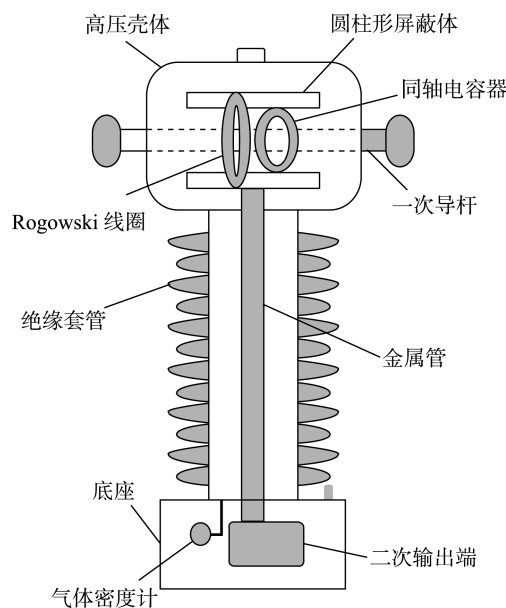


图1 组合型互感器整体结构图

Fig.1 Structure diagram of combined electronic instrument transformer

本文设计的组合型电子式互感器主要由高压壳体、圆柱形屏蔽体、一次传感单元、绝缘套管及二次输出端等部分构成。高压壳体处于高电位侧,圆柱形屏蔽体通过引线金属管与接地导杆相连位于低电位侧,高、低电位之间通过 SF₆ 气体绝缘。一次传感单元由电流传感单元和电压传感单元构成,其中电流传感单元采用 Rogowski 线圈,电压传感单元采用圆柱形同轴电容器。Rogowski 线圈安放在接地的圆柱形屏蔽体内并且通过压缩的 SF₆ 气体对高压侧形成绝缘。传统的电磁式互感器含有铁芯,存在磁饱和、重量重等不足^[8-10]。文献[8]经过分析后指出,

电磁式电流互感器暂态饱和时 2 次谐波含量会升高,和应涌流间断角也会减小,从而影响电力系统保护设备的动作。文献[9-10]中对传统 SF₆ 电流互感器故障进行了分析。由于 Rogowski 线圈和同轴电容器不含有铁芯等材料,不会出现传统电磁式电流/电压互感器所存在的磁饱和、质量大等不足^[11-13]。

2 传感器

2.1 Rogowski 线圈

Rogowski 线圈不含任何磁性材料,可以代替含有磁芯和绕组的传统电流传感器,且具有重量轻、测量范围广、动态性能好以及价格低廉等特点^[14-19]。文献[14]将钳形 Rogowski 线圈运用到互感器在线校验系统中,并设计了相应的补偿线匝。文献[15-19]利用 Rogowski 线圈良好的线性度和准确度,将其运用到电子式电流互感器中。然而以上研究都是独立的电子式电流互感器,只能测量电流,且对影响准确度的积分环节和高精度数字积分算法没有详细的研究。

Rogowski 线圈的感应电压和被测电流的变化率成正比。感应电压和被测电流的关系如式(1)所示。

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

其中, $e(t)$ 为感应电压; $i(t)$ 为被测电流; M 为 Rogowski 线圈互感系数。

相较于绕制而成的 Rogowski 线圈,PCB 技术制成的 Rogowski 线圈工艺较为简单,线匝分布更为均匀。通过理论分析得知,平面型 Rogowski 线圈和组合型 Rogowski 线圈都具有理想的对称分布的绕组。相关测试表明平面型 Rogowski 线圈能够满足电子式电流互感器测量准确度和温度稳定性达到 0.2S 的需求。

平面型 Rogowski 线圈包含 4 对 PCB 板和 1 个连接板,如附录中的图 A1 所示。图中,PCB₁ 和 PCB₂ 连接在一起形成 1 对 PCB 板,这对 PCB 板通过焊盘焊接在连接板上,焊盘同时起到将 PCB 板输出传递至连接板上的作用。每个 PCB 板的厚度为 3 mm,由大约 1 000 匝线宽为 0.25 mm 的绕线缠绕成绕组。平面型 Rogowski 线圈安放在接地的圆柱形屏蔽体内。根据组合型互感器的安装环境及尺寸,设计平面型 Rogowski 线圈的径向厚度为 25 mm、外直径为 340 mm。

2.2 圆柱形同轴电容器

基于同轴电容的新型电压传感器设计方法如下:在靠近圆柱形屏蔽体处插入 1 个中间电极,则形成 2 个圆柱形同轴电容器 C_{hv} (电容位于一次导杆和中部电极之间) 和 C_{lv} (电容位于中间电极和圆柱形屏蔽体之间)。绝缘材料的柔性层能够确保中部电极和圆柱形屏蔽体之间的绝缘性。2 个圆柱形电容器的计算公式如下:

$$C_{hv} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln(D_{M1}/D_C)} \quad (2)$$

$$C_{lv} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln(D_C/D_{M2})} \quad (3)$$

其中, ϵ_0 为真空介电常数,且 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m; ϵ 为 SF₆ 气体的相对介电常数; l 为中部电极的长度; D_C 为一次导杆直径; D_{M1} 为中间电极内径; D_{M2} 为中间电极外径; D_C 为圆柱形屏蔽体内径。

电压传感器单元结构图如图 2 所示。图中,一次导杆直径为 80 mm;中间电极的厚度为 3 mm、长为 25 mm、平均直径为 295 mm,安装位置为接地侧圆柱形屏蔽体的内表面。根据式(2)、(3)可计算得到 C_{hv} 和 C_{lv} 的大小分别约为 1 pF 和 60 pF。

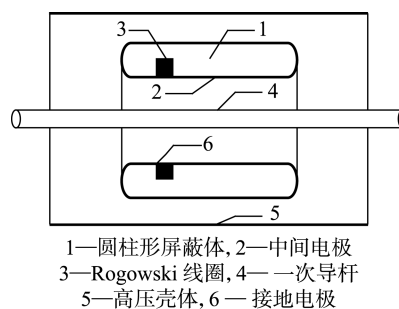


图 2 电压传感器单元结构图

Fig.2 Structure diagram of voltage sensor unit

电压测量原理如图 3 所示。图中, $R_1 = 500 \Omega$, 由于 C_{hv} 和 C_{lv} 的容抗值远大于 R_1 的阻抗值,根据电路分析,流过 C_{hv} 的电流 i 全部流入 R_1 中,此时电路的输出 V_s 可由式(4)进行计算。

$$V_s = -R_2 C_{lv} \frac{dU}{dt} \quad (4)$$

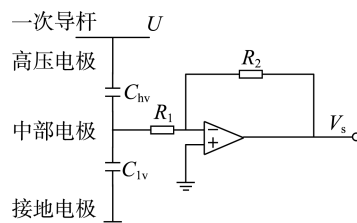


图 3 电压传感器基本简化电路

Fig.3 Basic simplified circuit of voltage sensor

式(4)表明,输出电压 V_s 为被测电压 U 的微分信号,因此也需要对其进行积分还原。

从式(4)可知,高压侧圆柱形电容器 C_{hv} 的性能会影响最终的计算结果。 C_{hv} 的大小主要受电极热膨胀及气体密度等因素的影响。对于电极热膨胀的影响,根据式(2),选择一次导杆和中间电极为相同的材料,此时它们的热膨胀系数基本一致,则可以消除温度变化对电容器电容值的影响。而对于气体密度的影响,主要取决于漏气率。气体绝缘互感器的漏气率一般非常低,且有气体密度计监测,一旦漏气较大,则会对其及时补气。因此,由气体密度变化引起的影响通常可以忽略不计。

3 信号处理单元设计

3.1 基本结构

在电子式互感器的实际应用中,需将高压侧输出的模拟信号转换成数字信号。根据互感器输出信号的特点和输出要求,可以将高压侧数据采集系统分为信号采样及调整电路和逻辑控制电路2个部分,主要功能为:逻辑控制电路在正确接收到低压侧合并单元发送的同步采样命令后,启动信号采样及调整模块对 Rogowski 线圈输出的二次电压信号和同轴电容器输出的电压信号进行高速采样,并将采样值组帧编码,通过电光转换(E/O)将光信号向低压侧的合并单元传输。数据处理单元结构如图5所示。图中,一次电流和电压传感单元的输出通过屏蔽电缆传输至低压侧的信号采样及调整电路,然后通过光纤将数据传输给位于中控室中的合并单元中,并接收来自合并单元的同步信号。

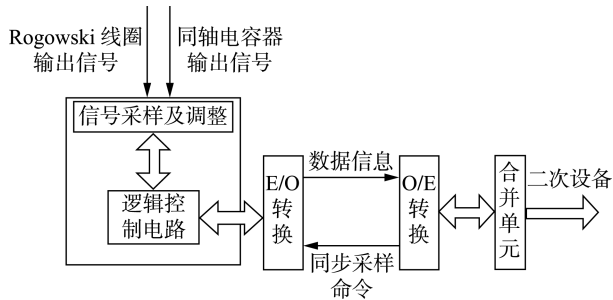


图5 数据处理单元结构

Fig.5 Structure diagram of data processing unit

3.2 数字积分

由于电流传感单元和电压传感单元的输出均为微分信号,易受频率波动等因素影响,因此需要对其进行积分还原。积分器设计的优劣对测量准确度有直接影响。传统模拟积分器存在温漂、时漂等问题,严重影响了测量准确度,因此本文的组合型电子式互感器采用数字积分。理想数字积分公式为:

$$H_I(j\omega) = \frac{1}{j\omega} \quad (5)$$

常用的数字积分算法有矩形算法、梯形算法和 Simpson 算法,它们的传递函数如式(6)所示。

$$\begin{cases} H_R(z) = T \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} \\ H_{TR}(z) = \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} \\ H_S(z) = \frac{T}{3} \frac{1+4z^{-1}+z^{-2}}{1-z^{-1}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $H_R(z)$ 为矩形传递函数; $H_{TR}(z)$ 为梯形传递函数; $H_S(z)$ 为 Simpson 传递函数; T 为采样间隔。这3

种积分算法的幅频特性在低频段与理想积分非常接近,在高频段与理想积分的差距逐渐变大。矩形算法的相频特性呈线性变化,只在低频段才比较接近理想情况,而梯形积分算法和 Simpson 积分算法则与理想情况基本一致。

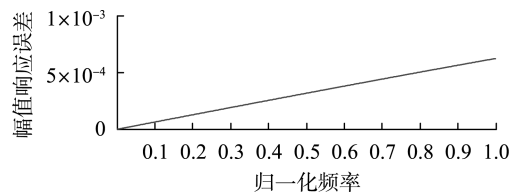
Al-Alaoui 积分将梯形积分和矩形积分进行了结合,从而得到了传统的 Al-Alaoui 数字积分器,其传递函数为:

$$H_{Al}(z) = 7 \frac{T}{8} \frac{1+(1/7)z^{-1}}{1-z^{-1}} \quad (7)$$

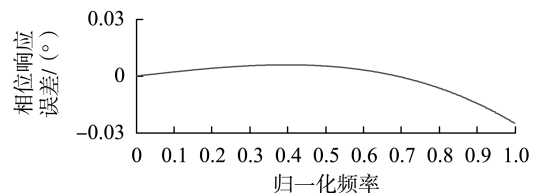
Al-Alaoui 积分的幅值响应误差仍然较大,且相位在 $-90^\circ \sim 0^\circ$ 之间线性变化。为改善积分算法的性能,本文在 Al-Alaoui 积分的基础上提出了一种改进的积分算法,通过改变采样频率,将采样周期由 T 变为 $T/8$ 来改善 Al-Alaoui 积分的幅值响应,并通过加入一个延时因子 0.047 来改善 Al-Alaoui 积分的相位响应,这一改进的数字积分传递函数为:

$$H_N(z) = \frac{T}{64} z^{-0.047} \frac{7+8z^{-1/8}+z^{-1/4}}{1-z^{-1/4}} \quad (8)$$

这一积分与理想积分之间的幅值响应误差和相位响应误差如图6所示。



(a) 幅值响应误差



(b) 相位响应误差

图6 改进数字积分与理想积分之间的幅值响应误差和相位响应误差

Fig.6 Amplitude response error and phase response error between improved digital integration and ideal integration

从图6可以看出:改进的数字积分和理想积分之间的幅值误差非常小,误差精度达到了 10^{-4} ,充分说明改进的数字积分的幅值响应非常接近理想积分;改进的数字积分和理想积分之间的相位响应误差精度达到了 10^{-2} ,充分说明改进的数字积分的相位响应十分优异。

然而在实际应用中并不能直接得到这一分数延时,无法编辑相应的程序并下载到芯片中实现,因此需要将其转换为整数延时的级数和的形式,并采用 IIR 滤波法得到近似的延时。

采用 IIR 滤波法时,全延时 D 为:

$$\begin{cases} z^{-D} \cong \frac{a_N + a_{N-1}z^{-1} + \cdots + a_1z^{-(N-1)} + z^{-N}}{1 + a_1z^{-1} + \cdots + a_{N-1}z^{-(N-1)} + a_Nz^{-N}} \\ a_k = (-1)^k C_k^N \prod_{n=0}^N \frac{N-n-D}{N-k-n-D} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $C_k^N = N! / k! (N-k)!$; $D = N + d$ 。因为只能取延时的分数部分 d , 所以将传递函数中的 z^{-d} 用 z^{-N-d} 代替。利用式(9)中的滤波法来近似 z^{-N-d} , IIR 滤波法中的 $N=5, d=0.5$, 将式(8)所示的传递函数展开后得到式(10)。

$$H(z) = \frac{T}{64} \frac{a_5 + a_4z^{-1} + \cdots + a_1z^{-4} + z^{-5}}{1 + a_1z^{-1} + \cdots + a_4z^{-4} + a_5z^{-5}} \frac{7 + 8z^{-1/8} + z^{-1/4}}{1 - z^{-1/4}} \quad (10)$$

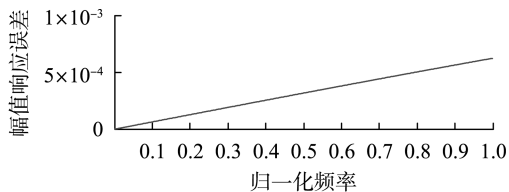
其中, 各系数对应的值如表 1 所示。

表 1 IIR 滤波法中各系数的值

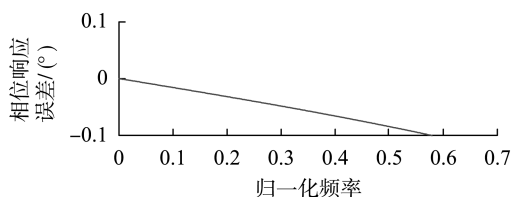
Table 1 Values of coefficients of IIR filtering method

系数	数值
a_1	-3.89×10^{-2}
a_2	1.15×10^{-2}
a_3	-2.94×10^{-3}
a_4	4.95×10^{-4}
a_5	-3.98×10^{-5}

仿真得到的幅值响应误差和相位响应误差见图 7。比较图 6(a) 和图 7(a) 可知, 采用 IIR 滤波法的数字积分的幅值响应误差和改进的延时数字积分的幅值响应误差几乎相同, 充分说明采用 IIR 滤波法后的数字积分的幅值响应与理想积分非常接近。比较图 6(b) 和图 7(b) 可知, 采用 IIR 滤波法的数字积分的相位响应误差要大于改进的延时积分的相位响应误差, 这是由于采用 IIR 滤波法后, 分数延时因子并非等于 0.047 而是近似为 0.047, 不过这一相位响



(a) 幅值响应误差



(b) 相位响应误差

图 7 采用 IIR 滤波法数字积分和理想积分之间的幅值响应误差和相位响应误差

Fig.7 Amplitude response error and phase response error between digital integration with IIR filtering method and ideal integration

应误差精度在 $10^{-2} \sim 10^{-1}$ 之间, 准确度满足要求。

4 性能测试及应用

根据 IEC60044-7 和 IEC60044-8 可知, 型式测试、常规测试和特殊测试都是专门估测互感器的各种性能的, 为此专门制作了样机并对其进行了基本准确度测试和复杂环境温度稳定性测试。

4.1 基本准确度测试

使用准确度为 0.01 级的传统电流互感器和准确度为 0.01 级的电压互感器作为参考, 并分别输出电流信号和电压信号, 将这 2 种信号在输入准确度测量系统前转变为额定值为 4 V 的低压信号。表 2、3 分别为电压测量单元和电流测量单元的误差特性。由表 2、3 可见: 电压通道的比差均小于 0.1%, 相位变化均在 5' 以内; 电流通道的比差均小于 0.05%, 相位变化均在 5' 以内, 说明准确度满足 0.2 级要求。

表 2 电压通道误差

Table 2 Error of voltage channel

电压/kV	比差/%	角差/(')
22	0.077	2.8
44	-0.042	0
88	-0.014	-2.1
132	-0.065	-4.1
176	-0.053	-2.0
220	-0.022	-2.1
264	-0.054	-2.2

表 3 电流通道误差

Table 3 Error of current channel

电流/kA	比差/%	角差/(')
0.02	-0.105	-4.0
0.1	-0.051	-3.2
0.2	-0.046	-0.9
0.4	-0.032	0
0.8	0.048	-1.9
1.2	0.013	0
1.6	0.025	2.1
2	0.012	3.1
2.4	0.023	0

4.2 温度稳定性测试

首先将样机放置在一个能任意改变温度的温控房里, 将温度控制在常温 20 ℃, 持续 1 h, 然后再将温度升高到 50 ℃, 持续 2 h, 再将温度下降到 -40 ℃, 持续 2 h。进行 2 次温度循环试验以达到温度稳定性测试的目的, 测量系统连续不断地记录下比差和角差。温度稳定性测试结果如表 4—6 所示。由表可见: 不同温度下, 电压通道的比差变化小于 0.1%, 相位变化均在 4' 以内; 电流通道比差变化小于 0.1%, 相位变化均在 5' 以内, 说明在复杂环境温度下准确度满足 0.2 级要求。

表4 温度实时变化

Table 4 Real-time variation of temperature

时间/h	温度
0→1.5	20℃
1.5→2.5	20℃上升到50℃(线性增加)
2.5→4.5	50℃
4.5→6.5	50℃下降到-40℃(线性下降)
6.5→8.5	-40℃
8.5→9.5	-40℃上升到20℃(线性下降)
9.5→10	20℃

表5 不同时间的温度对应的电压通道误差

Table 5 Voltage channel error corresponding to temperature at different time

时间/h	温度/℃	比差/%	角差/(′)
0	20	-0.025	-3.1
1.5	20	-0.021	-3.0
2.5	50	-0.035	-1.8
4.5	50	-0.055	-0.6
6.5	-40	0	1.1
8.5	-40	0.037	-0.9
9.5	20	0.012	-1.0
10	20	0	-2.0

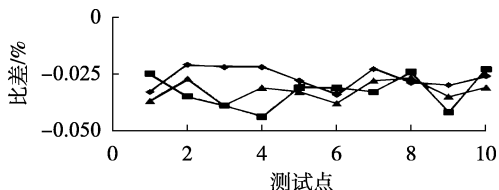
表6 不同时间的温度对应的电流通道误差

Table 6 Current channel error corresponding to temperature at different time

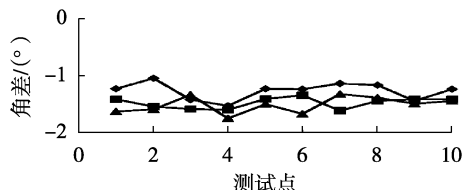
时间/h	温度/℃	比差/%	角差/(′)
0	20	0.012	0
1.5	20	0.043	0.6
2.5	50	0.055	1.6
4.5	50	0.066	4.1
6.5	-40	0.014	2.3
8.5	-40	-0.021	-1.9
9.5	20	0.003	-1.5
10	20	0.007	-1.0

4.3 现场应用

设计的样机在湖南省电力公司下属的220 kV变电站进行了现场应用,现场应用图见附录中的图A2。在现场运行中对该互感器进行了现场准确度测试,以电压通道为例,其现场准确度的3次测试结果如图8所示。测试结果表明,该互感器满足0.2



(a) 比差



(b) 角差

◆第一次, ■第二次, ▲第三次

图8 电压通道现场测试结果

Fig.8 Field test results of voltage channel

级准确度要求。

5 结论

本文在传统互感器的基础上,将电压互感器和电流互感器进行结合,提出了一种新型的组合型电子式互感器,其绝缘结构与倒立式SF₆电流互感器的相似,采用Rogowski线圈和圆柱形电容器作为传感器单元,并设计了一种改进的积分算法应用于积分环节。

和传统互感器相比,本文所设计的组合型电子式互感器具有以下优点。

a. 将电压互感器和电流互感器相结合,1台互感器可同时测量电压和电流,减小了互感器的体积、质量等,降低了成本。

b. 设计的改进数字积分算法在传统的Al-Alaoui积分的基础上提高了其采样频率,并加入了新的延时因子;相比常用的矩形算法和梯形算法等,设计的改进数字积分算法的精度更高,从而提高了互感器的测量准确度。

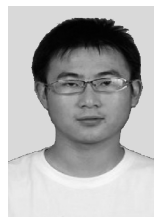
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱超,蒋煜,梅军,等. Rogowski线圈中积分环节的研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(9):64-67.
ZHU Chao,JIANG Yu,MEI Jun,et al. Research on the integration of the Rogowski coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(9):64-67.
- [2] 王小明,周有庆,彭洪海,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.
- [3] 陈应林,黄德祥. 数字式电能计量系统及检定装置设计[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):114-117.
CHEN Yinglin,HUANG Dexiang. Digital Watt-hour metering system and verification equipment[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):114-117.
- [4] 蒋汉儒,易灿江,刘华,等. 新型电子式组合互感器研究[J]. 高压电器,2013,49(1):77-80.
JIANG Hanru,YI Canjiang,Liu Hua,et al. Research on new electronic combined transformer[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(1):77-80.
- [5] 任稳柱,冯建华,何红,等. 用于智能型断路器的电子式电流电压组合互感器[J]. 高压电器,2011,47(5):1-4.
REN Wenzhu,FENG Jianhua,HE Hong,et al. Electronic current and voltage combined transformer for intelligent circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(5):1-4.
- [6] 刘志恒,段雄英,廖敏夫,等. 罗氏线圈电子式电流互感器积分特性研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):191-196.
LIU Zhiheng,DUAN Xiongying,LIAO Minfu,et al. Research on integral characteristic of ECT with Rogowski coil[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(3):191-196.
- [7] 王红星,张国庆,蔡兴国,等. 电容分压型电子式电压互感器研究与设计[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):83-87.

- WANG Hongxing, ZHANG Guoqing, CAI Xingguo, et al. Research and design of electronic capacitive voltage transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 83-87.
- [8] 孙向飞, 束洪春, 周建萍, 等. 电磁型与电子式电流互感器传变和应涌流比较[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 154-159.
- SUN Xiangfei, SHU Hongchun, ZHOU Jianping, et al. Comparison of sympathetic inrush transfer characteristics between electromagnetic and electronic current transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 154-159.
- [9] 周海滨, 陈国华. 500 kV SF₆ 电流互感器事故分析及预防措施[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 99-102.
- ZHOU Haibin, CHEN Guohua. Accident analysis and prevention measures of 500 kV SF₆ current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 99-102.
- [10] 金辉, 吴浩, 李志勇, 等. 环境温度变化对 SF₆ 电流互感器运行性能的影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(12): 65-69.
- JIN Hui, WU Hao, LI Zhiyong, et al. Research on effects of environmental temperature variation on the performance of SF₆ current transformer[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(12): 65-69.
- [11] 李洪涛, 张巍, 刘忠战. 220 kV 组合电子式互感器原理结构及挂网试验[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 112-116.
- LI Hongtao, ZHANG Wei, LIU Zhongzhan. Construction principle and application test of 220 kV combined electronic transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 112-116.
- [12] 杨玲君, 周冬旭, 徐志超. 电容分压型电子电压互感器的特性研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 71-74.
- YANG Lingjun, ZHOU Dongxu, XU Zhichao. Characteristics of capacitance voltage divider electronic voltage transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 71-74.
- [13] 宋涛. 倒立式 SF₆ 同轴电容高压电子式电压互感器[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1917-1923.
- SONG Tao. Inverted SF₆ coaxial capacitance electronic voltage transformer for high voltage systems[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1917-1923.
- [14] 李振华, 闫苏红, 胡蔚中, 等. 一种基于改进数字积分的高精度电流互感器在线校验系统[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 978-984.
- LI Zhenhua, YAN Suhong, HU Weizhong, et al. A high accuracy online calibration system for current transformers based on improved digital integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 978-984.
- [15] 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): 76-89.
- 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): 76-89.
- [16] 李振华, 胡蔚中, 闫苏红, 等. 电子式电流互感器中的高精度数字积分器技术[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 42-49.
- LI Zhenhua, HU Weizhong, YAN Suhong, et al. High accuracy digital integrator technology for electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(2): 42-49.
- [17] AL-ALAOUI M A. Class of digital integrators and differentiators[J]. IET Signal Processing, 2011, 5(2): 251-260.
- [18] 张明明, 张艳, 李红斌, 等. Rogowski 电流互感器的积分器技术[J]. 高电压技术, 2004, 30(9): 13-16.
- ZHANG Mingming, ZHANG Yan, LI Hongbin, et al. Technology integrator in Rogowski current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 13-16.
- [19] TSENG C C. Digital integrator design using recursive romberg integration rule and fractional sample delay, circuits and systems[J]. IEEE International Symposium, 2007, 27(30): 2726-2729.

作者简介:



李振华

李振华 (1986—), 男, 安徽宿州人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电子式互感器及其状态监测、电磁兼容 (E-mail: lizhenhua1993@163.com);

陶 渊 (1992—), 男, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向为电子式互感器状态监测 (E-mail: 514312363@qq.com);

张思球 (1993—), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 研究方向为电子式互感器高精度数字积分技术 (E-mail: 1123066187@qq.com)。

Combined electronic transformer based on high accuracy digital integration method

LI Zhenhua, TAO Yuan, ZHANG Siqu, LI Zhenxing

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Aiming at shortcomings of traditional transformers, such as being easily saturated, small dynamic measurement range and narrow measuring band, a novel combined electronic transformer is proposed. The insulating structure of inverted SF₆ transformer is adopted, the Rogowski coil and cylindrical coaxial capacitor are used as the sensors and the improved digital integral method is adopted in the integral link, which effectively improve the reliability and accuracy of the proposed transformer. The simulative and test results show that the proposed transformer has high accuracy and meets the requirements of 0.2S and 0.2 accuracy level, and compared with the single-function transformers, it only needs one insulation body to achieve simultaneous measurement of voltage and current, so it has the advantages of small size and low cost.

Key words: combined electronic transformer; digital integration; cylindrical coaxial capacitor; Rogowski coil; performance test

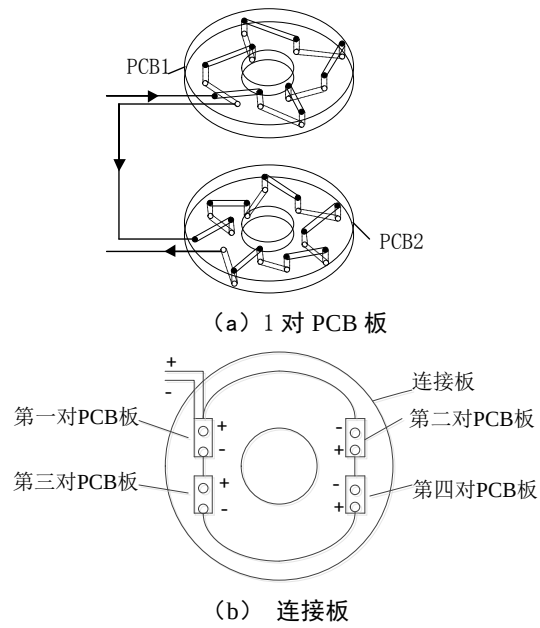


图 A1 平面型 Rogowski 线圈

Fig.A1 Planar Rogowski coil



图 A2 现场应用图

Fig.A2 Diagram of field application