

用于电流型电子式电压互感器的积分电路

邵 霞¹, 彭红海¹, 周有庆¹, 戴瑜兴^{1,2}, 王 娜¹

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 温州大学物理与电子信息工程学院, 浙江温州 325035)

摘 要: 积分电路是电流型电子式电压互感器(EVT)中实现信号还原的关键环节,其性能直接影响互感器的稳态和暂态特性.提出了一种应用于电流型 EVT 的带隔直控制的积分电路,可以有效隔离输入信号中的直流成分,改善互感器的暂态性能;而且其带宽可满足 40 次以下谐波电压测量的要求.并提出利用热敏电阻对积分电路进行温度补偿的方法,提高了电流型 EVT 的工作稳定性.基于本文设计的积分电路研制了电流型 EVT 样机,并进行了试验.仿真和试验结果验证了该积分电路的实用性和有效性.

关键词: 电子式电压互感器; 积分电路; 信号还原; 温度补偿; 暂态性能

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)02-0405-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.02.029

An Integral Circuit for Current-Based Electronic Voltage Transformer

SHAO Xia¹, PENG Hong-hai¹, ZHOU You-qing¹, DAI Yu-xing^{1,2}, WANG Na¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. College of Physics and Electronic Information Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)

Abstract: Integral circuit is the key element to restore the signal in the current-based electronic voltage transformer(EVT), and its performance directly affects the steady and the transient characteristics of the EVT. An integral circuit with DC-isolating control used in the current-based EVT was proposed. It can effectively block the DC component of the input signal, resulting in the improvement of the transient performance of the EVT. And its frequency width can assure below 40th harmonic voltage measurement. The method of using the thermal resistor to compensate the temperature characteristic of the integral circuit was also proposed, which can improve the stability of the EVT. An EVT prototype based on the designed integral circuit was developed and then tested. The analysis and then experimental results demonstrated the practicability and the validity of the proposed integral circuit.

Key words: electronic voltage transformer; integral circuit; signal restore; temperature compensation; transient performance

1 引言

电子式互感器由于体积范围小、无磁饱和、绝缘结构简单、抗干扰性能好、频率响应宽、具有数字接口等优点,适应电力设备小型化、电能计量及保护数字化和电力系统智能化的发展方向,因而受到国内外研究人员的广泛关注^[1~4].

在以电容器作为电压传感元件的电子式电压互感器(Electronic Voltage Transformer, EVT)和以 Rogowski 线圈作为电流传感元件的电子式电流互感器(Electronic Current Transformer, ECT)中,积分电路是实现信号还原的重要环节^[5,6],其性能决定了信号的频谱范围和响应时间,直接影响着互感器的稳态及暂态性能.目前在电子

式互感器的实用化设计中,有很多关于积分器的性能分析和研究^[7~9],大多数是针对应用于 ECT 中的积分器^[10,11],这些研究在改善互感器的性能方面取得了一定的效果.但由于 EVT 和 ECT 需要反映的暂态现象不同,互感器的标准^[12,13]和性能要求也有较大区别,适用于 ECT 的积分器不一定能够满足 EVT 的要求.关于 EVT 用的积分器的现有研究主要针对积分器自身的频率特性^[14,15],未分析积分器和传感头构成的整体系统的综合频率特性,而且忽略了对电力系统暂态过程的响应特性.因此有必要对应用于 EVT 中的积分器展开进一步研究.

本文针对一种通过直接检测电容电流实现电压测量的电流型 EVT,对适用于该 EVT 的积分电路进行研

究.在总结 EVT 对积分器要求的基础上,提出了带隔直控制的积分电路,对其应用于电流型 EVT 时系统的频率响应特性和暂态性能进行了分析与仿真;研究了有损积分器的温度稳定性,并设计了基于热敏电阻的温度补偿方案.仿真和试验结果表明,本文设计的积分电路和温度补偿方案应用于电流型 EVT 在频率特性、暂态性能、温度稳定性等方面均满足 IEC 标准 0.2 级测量和 3P 级保护的要求,并可用于 40 次以下的谐波电压检测,具有很好的实用价值.

2 电流型 EVT 组成原理及对积分电路的要求

直测电容电流型 EVT 由高压电容器、信号处理单元及其保护电路组成,如图 1 所示.

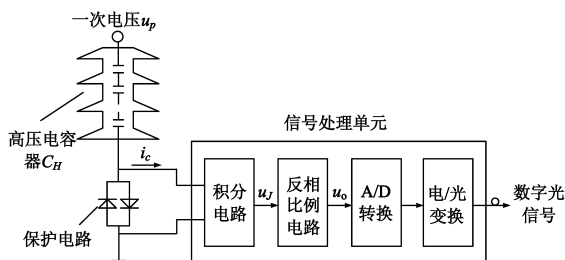


图1 电流型EVT结构示意图

高压电容器 C_H 将一次高电压信号 u_p 转变为电容电流 i_c 接入信号处理单元:

$$i_c(t) = C_H \frac{du_p(t)}{dt} \quad (1)$$

式(1)表明电容电流与一次电压的微分成正比,因此必需对其进行积分还原处理.实际中常采用反相积分电路,考虑理想积分器,则有:

$$u_j(t) = -\frac{1}{C_j} \int i_c(t) dt = -\frac{C_H}{C_j} u_p(t) \quad (2)$$

其中 C_j 为积分电容.

由于 u_j 与 u_p 相位相差 180° ,因此利用反相比例电路还原信号的相位,并进行幅值调整,从而产生反应一次高压的小电压信号 u_o .然后再通过 A/D(模/数)转换和电/光调制处理,形成数字光信号输出.

根据 IEC 标准^[12]的要求,电子式电压互感器应在要求的频率范围内具有一定的测量精度;为了满足继电保护的需要,EVT 还应具有良好的瞬态响应特性;并能在规定的温度范围内,保持良好的工作稳定性.由于积分电路对互感器的性能有直接影响,因此应用于 EVT 的积分电路应满足如下要求:

(1)“还原”一次信号

经积分电路处理后的信号应尽可能还原一次信号的相位,以保证互感器二次输出电压的相角误差满足要求.否则需要增加调相电路,不但影响互感器的温度

稳定性能,而且可能会滤除一次信号中的某些频率成分,无法忠实反映一次信号的特性.

(2)一定的带宽和良好的频率特性

积分电路和高压传感器构成的联合系统在 EVT 测量准确级的规定工频范围:49.5 ~ 50.5Hz 和保护准确级的规定工频范围:48 ~ 51Hz 内,测量精度应分别满足 0.2 级测量和 3P 级保护的准确度要求.另一方面,如果将互感器用于谐波电压测量,则应具有不小于测量 40 次谐波对应的频带宽度.

(3)暂态性能满足要求

由于本文设计的互感器传感元件为电容器,在互感器瞬态响应特性的诸多要求中,应重点考虑积分电路对高压侧出口短路和带滞留电荷重合闸引起的暂态现象具有良好的暂态响应性能.

(4)保持较好的温度稳定性

高压互感器一般安装于变电站户外,环境温度的变化范围较宽.积分电路应保证在标准规定的户外温度范围(如 $-40^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 范围内)保持要求的测量精度和良好的工作稳定性.

3 带隔直控制的积分电路

提出了一种适用于电流型 EVT 的带隔直控制的积分电路,其结构如图 2 所示.

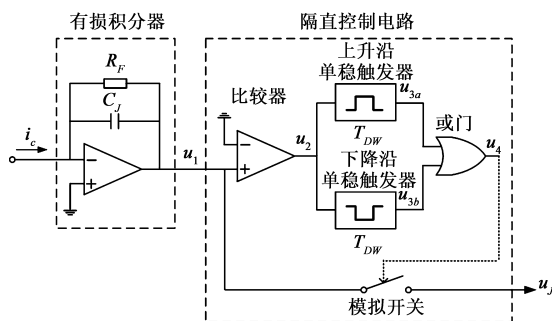


图2 带隔直控制的积分电路构成示意图

积分电路由两部分组成:有损积分器和隔直控制电路.由于电流型 EVT 接入积分电路的是电容电流信号,因此相比常见的有损积分器省去了积分电阻.隔直控制电路由比较器 LM211、双单稳触发器 CD4098、或门元件 74HC32 和模拟开关 MAX4516 组成,其构成原理如下:有损积分器的交流输出信号经过比较器转换成方波,并同时连接在双单稳触发器的上升沿和下降沿触发端,通过调节触发器电阻和电容的大小,使每组触发器的稳态高电平输出时间(T_{DW})均大于 10ms.两个单稳触发器的输出相“或”后,连接到模拟开关的控制端,控制其接通或断开有损积分器的输出电压.

图 3 为带隔直控制的积分电路的输出特性,其中图 3(a)为有损积分器的输出,经图 3(b)比较器、图 3(c)

上升沿单稳触发器、图 3(d)下降沿单稳触发器、图 3(e)“或”门电路和模拟开关后,形成如图 3(f)所示的积分电路输出 u_j 。当互感器一次输入正常交流电压信号时,积分电路作为普通有损积分器正常工作, u_j 上输出反应一次电压的稳态交流信号;在电力系统的某些暂态过程中,有损积分器输出直流信号时,最长不超过 10ms,模拟开关断开, u_j 输出为零,实现了对直流信号的隔离,确保互感器的暂态性能满足要求。

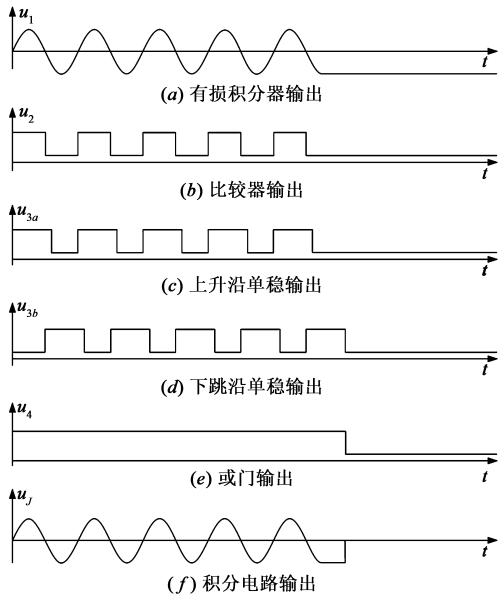


图3 带隔直控制的积分电路的输出特性

4 带隔直控制的积分电路应用于电流型 EVT 的性能分析

4.1 频率特性分析

在进行频率特性分析时,将积分电路和高压电容传感器作为一个整体考虑,建立如图 4 所示的联合系统模型。由于积分电路的隔直控制部分不影响互感器的频率特性,因此在联合系统模型中未包括该部分。图中 R 为高压电容器 C_H 的电阻、连接导线的电阻与积分器的输入电阻之和, R_F 为并联反馈电阻。

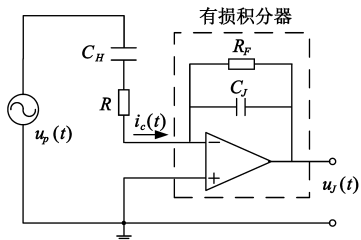


图4 高压电容与有损积分器组成的联合系统模型

根据联合系统模型,可得出系统的综合传递函数如下:

$$H(j\omega) = \frac{U_j(j\omega)}{U_p(j\omega)} = -\frac{j\omega R_F C_H}{(1 + j\omega R C_H)(1 + j\omega R_F C_J)} \quad (3)$$

对比式(2),可看出由于 R 和 R_F 的存在,造成 u_j 与 u_p 之间的相位差不为 180° ,实际相位差为:

$$\varphi(j\omega) = -90^\circ - \arctan RC_H - \arctan R_F C_J \quad (4)$$

由于 R 数值很小, $\omega RC_H \ll 1 \ll \omega R_F C_J$,因此 R 引起的相角偏差可以忽略。为了尽量减小互感器的相角偏移、不额外增加调相电路,在设计积分器参数时,在 C_J 一定的情况下,应将 R_F 的数值取的大一些。

根据实际研制的高压电容器相关参数, $C_H = 300\text{pF}$, $R = 20\Omega$ 。取 $C_J = 4.7\mu\text{F}$, $R_F = 10\text{M}\Omega$,运用 MATLAB 软件进行仿真,得出联合系统的幅频和相频特性,如图 5 所示。可见高压电容器与有损积分器组成的联合系统具有较理想的频率响应特性,一方面有效抑制了低频信号,同时在很宽的范围内保证了高频信号的响应效果,其相频特性在 $1 \sim 100\text{kHz}$ 范围内为 -180° 的水平段。系统频带宽度超过 10^5Hz ,远远超过 40 次谐波电压测量的要求。而且在 $48 \sim 51\text{Hz}$ 范围内,联合系统的输出电压幅值几乎没有变化,相角变化在 0.2° 内。

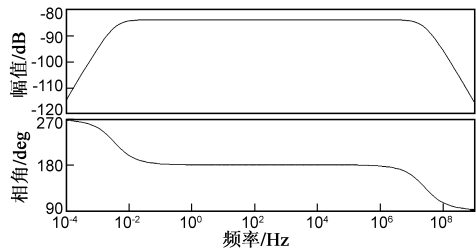


图5 高压电容与有损积分器组成联合系统模型的频率响应特性

4.2 暂态性能分析

建立了如图 6(a)和图 6(b)所示的模拟高压侧出口短路和带滞留电荷重合闸暂态过程的等效电路,其中 C_L 为线路电容。利用 OrCAD 软件对这两种暂态过程进行了仿真。

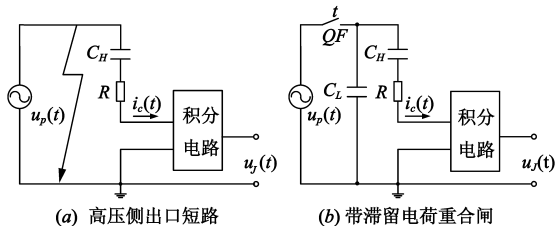


图6 分析两种暂态现象使用的等效电路

考虑两种最严重的情况:当一次电压 u_p 为正最大值时发生一次短路;在 u_p 处于正最大值时线路断开,并在 u_p 处于负最大值时重合闸,分别得出如图 7、图 8 所示的积分电路输出电压波形。仿真结果表明:当一次侧对地短路时,积分电路的输出电压几乎在瞬间衰减为

0,能够很好地反应一次短路;线路断开后,在不到1个周波内,积分电路的输出变为0;重合闸后,积分电路的输出能快速跟随一次电压的变化,在小于1个周波内互感器暂态误差小于1%,优于IEC60044-7标准的要求。

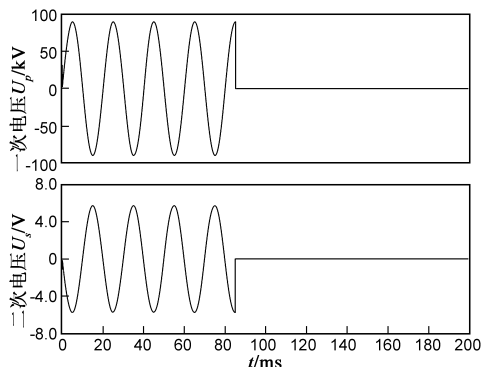


图7 一次侧短路时积分电路输出电压的仿真波形

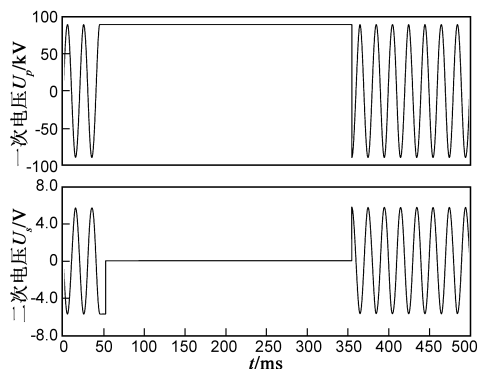


图8 线路重合闸时积分电路输出电压的仿真波形

4.3 温度稳定性分析与改进

影响积分器温度稳定性的主要因素有两个:运算放大器的失调温漂特性;以及积分器中电容和电阻等电子元件具有随温度而变化的特性.通过选用低温漂系数的运算放大器^[16]可有效改善积分器的温漂性能,因此重点考虑电阻和电容元件的参数值随温度的变化对积分器性能的影响。

当输入电流 i_c 为正弦信号时,有损积分器输出电压的有效值为:

$$|\dot{U}_1| = \frac{R_F}{\sqrt{1 + \omega^2 R_F^2 C_J^2}} |\dot{I}_c| = K_J |\dot{I}_c| \quad (5)$$

式中 K_J 是与 R_F 、 C_J 相关的系数。

可得出 K_J 的温度系数为:

$$\begin{aligned} \frac{dK_J}{K_J dT} &= \frac{1}{1 + \omega^2 R_F^2 C_J^2} \cdot \frac{dR_F}{R_F dT} - \frac{\omega^2 R_F^2 C_J^2}{1 + \omega^2 R_F^2 C_J^2} \cdot \frac{dC_J}{C_J dT} \\ &= \frac{1}{1 + \omega^2 R_F^2 C_J^2} \alpha_R - \frac{\omega^2 R_F^2 C_J^2}{1 + \omega^2 R_F^2 C_J^2} \alpha_C \end{aligned} \quad (6)$$

式中 α_R 和 α_C 分别表示 R_F 和 C_J 的温度系数。

考虑精密金属膜电阻和聚丙烯电容的温度系数分

别为 10ppm/℃ 和 -200ppm/℃,则当温度变化 80℃ 时, dK_J/K_J 超过 1%,无法满足准确度要求。

根据式(6),由于 $\omega^2 R_F^2 C_J^2 \gg 1$,因此 R_F 的影响几乎可忽略.针对 C_J 的温度特性对积分电路的影响,本文提出一种利用热敏电阻^[17]实现温度补偿的方法,将热敏电阻应用于反相比例电路的反馈电阻中,如图9所示.其中 R_s 为具有负温度特性的热敏电阻,其温度系数为 β . R_1 和 R_2 均为精密金属膜电阻,受温度的影响很小,可认为其阻值不随温度变化。

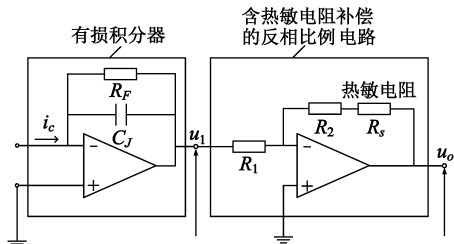


图9 热敏电阻补偿示意图

将有损积分电路和含热敏电阻补偿的反相比例电路作为一个整体环节考虑,则可得该环节输出与输入之间的近似关系:

$$\left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_c} \right| \approx \frac{R_2 + R_s}{R_1} \cdot \frac{1}{\omega C_J} \quad (7)$$

考虑热敏电阻 R_s 和积分电容 C_J 的温度特性,即: $R_s = R_{s,25}(1 + \beta \Delta T)$, $C_J = C_{J,25}(1 + \alpha_C \Delta T)$,其中 $R_{s,25}$ 和 $C_{J,25}$ 分别表示 R_s 和 C_J 在室温 25℃ 时的标称值.同时将 R_2 表示为 $\gamma R_{s,25}$,则式(7)变为:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_c} \right|_T &= \frac{1}{\omega R_1} \cdot \frac{\gamma R_{s,25} + R_{s,25}(1 + \beta \Delta T)}{C_{J,25}(1 + \alpha_C \Delta T)} \\ &= \frac{R_{s,25}(\gamma + 1)}{\omega R_1 C_{J,25}} \cdot \frac{(1 + \beta/(\gamma + 1) \cdot \Delta T)}{(1 + \alpha_C \Delta T)} \end{aligned} \quad (8)$$

因此, α_C 与 β 之间只要满足: $\alpha_C = \beta/(\gamma + 1)$ 关系式,就可以实现对积分电路的温度补偿。

5 系统实现及试验结果

基于本文提出的带隔直控制的积分电路和温度补偿方案,试制了 110kV 电流型电子式电压互感器样机.积分电路中的运算放大器选用失调电压和失调电流温漂非常小、工作性能稳定的集成运放器件 OPA2180;选用温度系数为 -200ppm/℃ 的聚丙烯电容作为积分电容 C_J ,采用温度系数为 -2000ppm/℃ 的热敏电阻 R_s 用于补偿积分电容的温度特性,且选取 R_2 的阻值为 R_s 的 9 倍,满足了对积分器温度全补偿的条件.对于高压电容器采取了正、负温度系数的多个电容器单元串联的温度补偿方法,保证互感器的每个构成部分都具有

良好的温度特性.

5.1 温度影响准确度试验结果

将高压电容器和信号处理单元放置于温控箱中,调节温度为-40℃、0℃和40℃,并在一次端施加(2%~190%)的额定电压,进行了温度影响准确度试验,得到互感器比值和相角误差的测试结果如表1所示.测试数据表明互感器在整个量程和-40℃~40℃工作温度范围内满足准确度要求,整体性能达到了0.2级测量和3P级保护的准确度指标.

表 1 温度影响准确度试验测试结果

电压百分比/%	-40℃		0℃		40℃	
	比差/%	角差/(′)	比差/%	角差/(′)	比差/%	角差/(′)
2	-3.76	30.6	-2.37	23.4	1.85	32.8
5	-2.45	22.3	-2.26	19.7	0.87	30.4
80	-0.1	3.9	-0.06	1.7	0.08	3.0
100	-0.09	2.8	-0.07	2.4	0.06	2.6
120	-0.09	2.3	-0.06	2.3	0.07	2.9
190	-0.49	24.5	-0.33	12.4	0.51	26.7

5.2 样机暂态模拟试验结果

在动模实验室对电流型 EVT 样机进行了暂态性能试验.模拟了高压侧出口短路、高压侧断开和重合闸等暂态过程,利用 DF3386 故障录波测距装置对互感器的二次输出电压进行了录波,分别得到如图 10~图 12 的录波图.从图中波形可以看出,系统能准确地反映一次暂态过程,响应速度快,表明积分电路的暂态性能满足要求.

6 结语

选择和设计应用于电流型 EVT 的积分电路时,应综合考虑其频率特性、暂态特性和温度稳定性是否能够满足 EVT 工程实用的要求.本文提出了一种带隔直控制的积分电路,将其用于电流型 EVT 可以使互感器获得良好的频率响应特性和暂态性能.此外,提出了利用热敏电阻对积分电路进行温度补偿的方法,通过选择合适的元件和参数设计,可提高积分电路的温度稳定性.仿真和试验结果表明,本文设计的积分电路和温度补偿方案有效,研制的电流型 EVT 样机达到了 IEC 0.2 级测量和 3P 级保护用电子式电压互感器的标准,同时能够满足 40 次以下谐波电压测量的要求.

参考文献

[1] S Kucuksari, G G Karady. Experimental comparison of conventional and optical VTs, and circuit model for optical VT[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 1571 – 1578.

[2] Branislav Djokic, Eddy So. Calibration system for electronic instrument transformers with digital output[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(2): 479 – 482.

[3] 徐大可, 赵建宁, 张爱祥, 等. 电子式互感器在数字化变电站中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 78 – 82.

Xu Dake, Zhao Jianning, Zhang Aixiang, et al. Application of electronic transformers in digital substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 78 – 82. (in Chinese)

[4] Marco Faifer, Sergio Toscani, Roberto Ottoboni. Electronic combined transformer for power-quality measurements in high-voltage systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(6): 2007 – 2013.

[5] W F Ray, C R Hewson. High performance Rogowski current transducers[A]. IEEE Industry Application Conference[C]. Roma; IEEE, 2000. 3083 – 3090.

[6] Ehsan Abdi-Jalebi, Richard McMahon. Simple and practical construction of high-performance, low-cost Rogowski transducers and accompanying circuitry for research applications[A]. Instrumentation and Measurement Technology Conference[C]. Ottawa: IEEE, 2005. 354 – 358.

[7] 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 of designing integrator of Rogowski current transducer[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(9): 13 – 16. (in Chinese)

[8] 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 Kewei, Wang Ning, Duan Xiongying, et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of

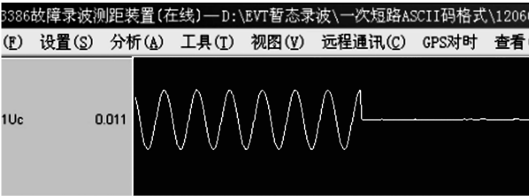


图10 一次短路时EVT样机二次输出电压录波图

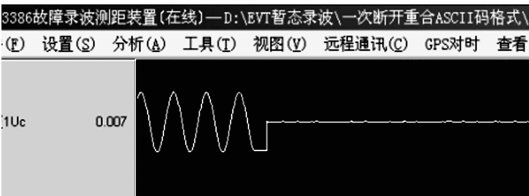


图11 高压断开时EVT样机二次输出电压录波图

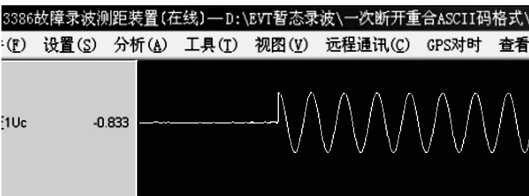


图12 重合闸时EVT样机二次输出电压录波图

- CSEE, 2004, 24(12): 104 – 107. (in Chinese)
- [9] 高广玲. 电子式电流互感器传变特性及适应性保护原理研究[D]. 山东济南: 山东大学, 2010.
Gao Guangling. Study on Transfer Characteristics of Electronic Current Transducer and Adaptive Protection Principle[D]. Jinan, Shandong: Shandong University, 2010. (in Chinese)
- [10] 高迎霞, 毕卫红, 刘丰, 等. 基于 Rogowski 线圈的电流互感器信号处理中积分算法的研究[J]. 电测与仪表, 2006, 43(11): 1 – 5.
Gao Yingxia, Bi Weihong, Liu Feng. The research of the integral arithmetic in signal processing for Rogowski current transducer[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(11): 1 – 5. (in Chinese)
- [11] G D'Antona, M Lazzaroni, R Ottoboni, et al. AC current-to-voltage transducer for industrial application[A]. Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. USA: IEEE, 2003. 1185 – 1190.
- [12] IEC 60044 – 7. Instrument Transformers – Part 7: Electronic Voltage Transformers[S].
- [13] IEC 60044 – 8. Instrument Transformers-Part 8: Electronic Current Transformers[S].
- [14] 钱政, 申烛, 罗承沐. 电子式光电组合电流/电压互感器中的相位补偿技术[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 40 – 44.
Qian Zheng, Shen Zhu, Luo Chengmu. Application research of phase compensation in electronic photoelectric integrated current/voltage transformer [J]. Automation of Electric Power System, 2002, 26(24): 40 – 44. (in Chinese)
- [15] 肖霞, 徐雁, 叶妙元. 电子式电压互感器中的相位补偿研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 41 – 44.
Xiao Xia, Xu Yan, Ye Miaoyuan. Phase compensation scheme for electronic voltage transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 41 – 44. (in Chinese)
- [16] 彭龙新, 杨乃彬, 林金庭. 宽带单片低噪声放大器的增益温度补偿[J]. 电子学报, 2006, 34(5): 934 – 937.
Peng Longxin, Yang Naibin, Lin Jinting. The temperature compensation for MMIC broadband amplifier gain [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(5): 934 – 937. (in Chinese)
- [17] 刘欣萌, 彭喜元. 微波功率测量的热等效误差[J]. 电子学报, 2008, 36(2): 371 – 375.
Liu Xinneng, Peng Xiyuan. Thermal equivalence error of microwave power measurement [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(2): 371 – 375. (in Chinese)

作者简介



邵霞 女, 1980 年生于河南南阳, 湖南大学电气与信息工程学院博士研究生, 研究方向为电子式互感器、数字信号处理技术。

E-mail: syice2003@163.com



彭红海 男, 1971 年生于湖南会同, 湖南大学电气与信息工程学院教师、博士研究生, 研究方向为电子式互感器、数字信号处理技术。

E-mail: peng_honghai@163.com