

Rogowski 线圈电流互感器的全数字化设计

陈金玲, 李红斌, 冯 凯

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

All-digital Design of Rogowski coil Current Transformer

CHEN Jin-ling, LI Hong-bin, FENG Kai

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

摘要: Rogowski 线圈电流互感器是一种新型电子式电流互感器。与传统的电流互感器相比,它具有动态范围大和测量频带宽的特点,但它的温度特性、长期稳定性不及传统互感器。全数字化设计旨在更进一步提高互感器的性能,它包括数字积分、数字传输、数字化处理和数字输出4个部分。即除了传感头以外,互感器的其余部分均为数字形式。对全数字化设计的 Rogowski 线圈电流互感器进行了准确度试验和数字输出接口试验。试验结果表明,该数字化设计满足 IEC 标准关于 0.2 级互感器的精度要求以及数字输出的相关要求。

关键词: Rogowski 线圈; 全数字化; 数字积分器; 数字输出

中图分类号: TM452.93 文献标识码: A

Abstract: Rogowski coil current transformer(RCT) is a kind of novel electronic current transformer. Comparing with traditional current transformer (CT), RCT has many advantages, such as wide dynamic range, broad frequency band. On the contrary, the temperature characteristics and the long-term stability of RCT are inferior to those of CT. The all-digital design is applied to improve the performance of RCT further, including digital integrating, digital transmission, digital signal processing and digital output. That means all parts of the RCT except the sensor are digital. The accuracy test and the digital output interface test of all-digital RCT have been taken. The test results show that the all-digital designs can meet the 0.2 class accuracy and the requirements of IEC standard.

Key words: Rogowski coil; all-digital; digital integrator; digital output

0 引言

Rogowski 线圈电流互感器(RCT)是一种新型电子式电流互感器。与传统的电磁式电流互感器相比,

它具有如下特点:不含铁心,无磁滞效应和磁饱和现象,带宽得到显著改善;传感头与被测电流之间没有电气连接,对被测回路影响甚小;高低压侧之间通过光纤进行信号传输,实现了良好的电气绝缘,在高压及特高压应用领域具有独特优势;体积小、重量轻、易于实现测量和保护的自动化和数字化等。这些特点使得 RCT 日益成为人们关注的焦点。

为了还原被测电流,必须对 Rogowski 线圈传感头的输出信号进行积分。笔者介绍的全数字式有源电子式电流互感器,用数字积分器取代了模拟积分环节,高低压侧之间采用数字式传输,最终的输出也是数字形式,并且该数字输出可直接与以太网相连,符合 IEC 60044-8 《电子式电流互感器》标准的相关要求。也就是说,全数字式电子式互感器从传感头的输出信号开始,所有的后续处理及信号传输均采用数字方法,与部分或全部采用模拟环节的 RCT 相比,全数字式 RCT 具有更好的温度性能和抗电磁干扰性能。

1 Rogowski 线圈测量原理

Rogowski 线圈是均匀缠绕在一个截面均匀的非磁性骨架上的线圈,见图 1。

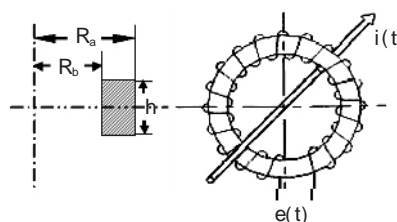


图 1 Rogowski 线圈

当有电流从线圈中心流过时,线圈两端会产生感应电势:

收稿日期: 2006-03-14; 修回日期: 2006-04-21

作者简介: 陈金玲(1978-),女,湖北新洲人,博士,主要从事电子式电流互感器的研究。

$$e(t) = - \frac{d(i(t))}{dt} = - M \frac{di(t)}{dt}$$

其中： i 为磁链； M 为 Rogowski 线圈的互感系数； i 为被测电流。当载流导体处于线圈中心位置不变时， M 是一个常数，其值由下式决定^[1]：

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2} \ln \frac{R_a}{R_b}$$

式中： μ_0 为真空磁导率； N 为线圈匝数； h 为骨架高度； R_a 为骨架外径； R_b 为骨架内径。

很显然，产生的感应电势是被测电流的微分，只需对其进行积分即可得出被测电流值。

2 全数字化设计

全数字式有源电子式电流互感器的结构框图见图 2。全数字化设计主要体现在数字积分、数字传输和数字输出 3 个方面。

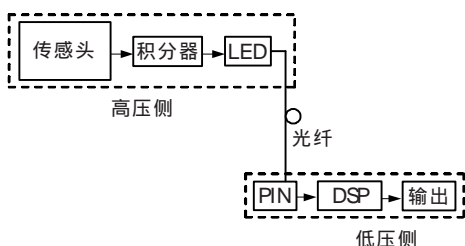


图 2 Rogowski 线圈电流互感器结构框图

2.1 数字积分器

常用的积分器通常为模拟积分环节，它由分立电子元件组合而成。由于实际所用分立元件不可能是理想的，运放的偏移，电容的泄漏和损耗，以及其它模拟器件的时漂和温漂，都会造成积分误差，从而造成电流测量的误差。为了克服这些缺陷，提出数字积分的方法。

实现数字积分的方法很多，最常见的是采用 A/D 转换芯片将传感头所得模拟信号转化成数字信号，输入至微处理芯片 (MCU)，设计相应的数字积分算法来实现^[2]。若要达到较高的测量准确度，ADC 的转换位数要足够高，这样的 ADC 芯片通常价格昂贵；或者 ADC 位数不高，采样率足够高 (过采样) 也可实现高精度测量，但这样会加重 CPU 的负担，不利于互感器其它功能的实现。

笔者采用了一款能量计量芯片——ADE7759。ADE7759 具有两个通道，其中的一个通道内置了数字积分器，特别为 di/dt 型传感头设计，可直接与 Rogowski 线圈的输出相连。ADE7759 内置积分器的幅频、相频特性见图 3 和图 4。它与 Rogowski 线圈的幅频、相频特性互为补偿，整体频率特性在所需范围内为一条直线^[3]。这也印证了 ADE7759 特别适用于 Rogowski 线圈电流互感器的信号解调。

ADE7759 采用了两种技术来提高内置 ADC 的

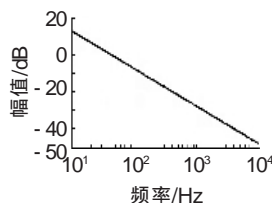


图 3 ADE7759 幅频特性

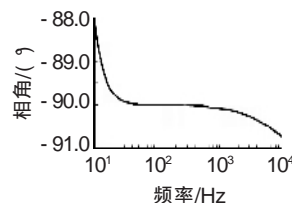


图 4 ADE775 相频特性

性能，即过采样和数字低通滤波。内部过采样频率为 894 kHz，远高于所需的 40 Hz ~ 2 kHz 的频率范围。但过采样会造成量化噪声，数字低通滤波可有效抑制有用带宽内的量化噪声，进一步提高了 ADC 的信噪比。位于 ADC 后的数字积分器的最终输出为 20 位，对输入信号的采样频率最高可达 27.9 kHz，这些都为实现高精度 (如 0.2 级) 的测量奠定了基础。

利用 ADE7759 这种将 ADC 和数字积分功能集于一身的芯片，不仅为测量的高精度提供了有力保障，也使得互感器的结构更简单，在很大程度上简化了硬件设计工作，降低了互感器的成本和开发周期。

2.2 数字式传输及数字化处理

由于采用了数字积分器 ADE7759，互感器高、低压侧之间可直接进行数字式传输，所以只需选用适当的 LED、PIN 及光纤，并设计适当的发光驱动和接收电路即可。特别要指出的是，ADE7759 的串行输出方式为数据在高低压侧之间的传输提供了方便，使得单根光纤即可完成，相比并行传输节省了光纤数量，也无须为节省光纤而另行设计并/串转换单元。数字式传输具有更强的抗电磁干扰性能，且传输不易受光纤弯折程度的影响。

基于 DSP 的数字信号处理系统，采用一块辅助的 CPLD 芯片提供 SCLK 时钟，同时将从串口读取的数据进行分离整理，转换为并行数据交由 DSP 进行处理。DSP 具有强大的计算能力，可实现有效值、相位的计算以及数字滤波等功能，从而更进一步提高互感器的准确度和抗干扰性能。

2.3 数字输出

电网技术的发展要求变电站的计量、保护、控制等装置的信息能够集成和共享，这就要求电子式互感器能够进行数字输出。具备数字接口是电子式电流互感器发展的必然趋势。按照 IEC 60044-8 标准的要求，数字输出可采用两种通讯方式：① IEC 61850-9-1 描述的以太网接入方式，按照 ISO/IEC 8802.3 协议规定的帧格式对数据进行封装，并通过 TCP/IP 协议实现数据传输；② 点到点的链接方式，按照 IEC 60870-5-1 规定的 FT3 数据帧格式封装数据，实现数据传输。考虑到以太网技术比较成熟，普及性高，有利于变电站的大量实时信息交换、数据集成和维护，所以采用以太网接入方式。

数字传输的实时性要求传输速度足够快。以 50 Hz 工频信号为例，考虑极限采样频率 4 kHz (每周采

样 80 个点), 以及实际情况中的不确定因素, 加上 10% 的冗余, 数据传输的波特率不能小于 4.33 MHz^[4]。该值在以太网的带宽范围之内, 用以太网完全可以实现。另外, TCP 协议是一种可靠的面向连接的协议, 具有差错校验、数据恢复、数据重传、流控制、阻塞控制等功能, 保证了数据通信的可靠性。

数字输出接口用嵌入式网络模块 NB100 来实现。该模块是基于高性能 32 位微处理器 386EX 的嵌入式系统, 具有 10 M~100 Mbps 自适应以太网控制器, 可直接与 100BASE-TX 以太网连接, 见图 5。

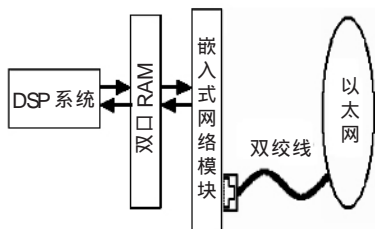


图 5 基于嵌入式网络模块的数字输出

3 试验

包括准确度试验和数字输出接口试验。

3.1 准确度试验

该试验旨在检验 Rogowski 线圈及数字积分器的准确度。将 Rogowski 线圈产生的感应电势直接接入 ADE7759, 将 ADE7759 的积分输出与参考电压(由标准电流互感器输出)进行比较, 所得比差与相差结果见图 6。

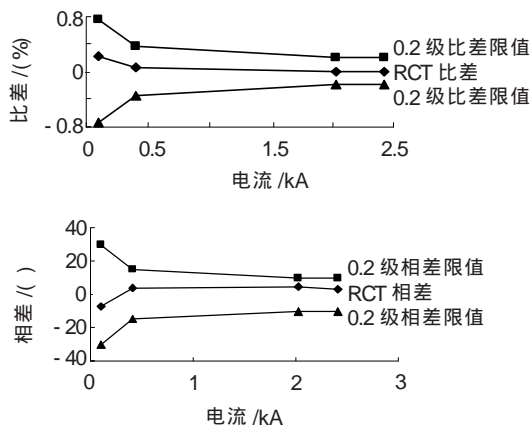


图 6 Rogowski 线圈及数字积分器的准确度试验结果

试验设定额定电流 I_0 为 2 kA, 从试验结果可以看出在 5%~120% I_0 范围内, 比差和相差均在 IEC 标准规定的 0.2 级互感器的误差限制之内。

3.2 数字输出试验

该试验旨在验证数字输出符合 IEC 标准的相关要求, 传输无失真和错误。试验将数字输出接口的输出波形与标准波形(80 个采样点/周期)进行了对比, 比较结果见图 7。

从图中可以看出, 参考波形与数字输出波形吻

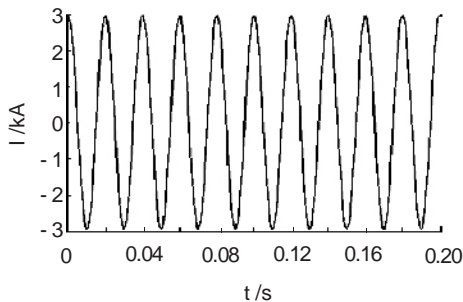


图 7 数字输出波形与参考波形的比较

合得很好。

此外, 数字接口还在国家互感器质检中心进行了校验, 校验方法: 由质检方提供 0.05 级标准 CT 及 0.01 级基准 A/D 转换器, 其输出电流信号作为校验系统的输入信号, 并提供 0.2 级被试 CT, 其输出电流信号作为数字接口的输入信号, 分别取额定电流的 5%、20%、100%、120% 作为测量点, 得出的实验数据见表 1。不难看出, 数字输出具有极高的精度。

表 1 数字输出接口的准确度试验结果

电流百分比 / (%)	比差 / (%)	相差 / ()
120	-0.0803	-1.393
100	0.0187	1.309
20	0.0218	-2.743
5	0.0929	-1.991

4 结语

Rogowski 线圈电流互感器因为具有很宽的测量频带和良好的绝缘性能, 因而非常适于高压环境下的电流测量。全数字化设计主要体现在 4 个方面: 数字积分、数字传输、数字化处理及数字输出。即从传感头信号输出以后到互感器最后输出的所有环节, 都采用数字的方式进行。全数字式设计为提高 Rogowski 电流互感器的温度性能和抗干扰性能提供了有力保障。对数字积分器及数字输出接口的试验证明, 基于 ADE7759 的数字积分环节以及嵌入式系统的数字输出接口都具有很高的准确度。

参考文献:

- [1] Liao J, Guo X, Luo C, et al. Studies of Rogowski Coil Current Transducer for Low Amplitude Current (100 A) Measurement[C]// Electrical and Computer Engineering, 2003. IEEE CCECE 2003. Canadian Conference on Volume 1: 2003: 463-466.
- [2] 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.
- [3] Analog Devices Datasheet. Active Energy Metering IC with di/dt Sensor Interface ADE7759 [Z]. USA: Analog Devices, Inc. 2002.
- [4] 李萌, 李红斌, 冯凯, 等. 基于嵌入式以太网的电子式互感器数字输出接口[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 93-96.