

一种电子式电流互感器的研制

申 焯, 王士敏, 罗承沐
(清华大学电机系, 北京市 100084)

摘要: 针对传统电流互感器绝缘复杂、易饱和等缺点, 研制了一套电子式电流互感器。利用 Rogowski 线圈作为传感头, 经过 A/D 转换、电光转换, 由光纤将一次电流信息传输到低电位端进行信号处理。数据采集采用多路数据采集系统, 可以将 Rogowski 线圈测量通道信号、保护通道信号、传感头温度值以及供电系统电压值进行分时传输。整套装置测量准确度达到 0.5%, 并具有绝缘简单、动态范围广以及不会产生磁饱和等优点。

关键词: Rogowski 线圈; 电子式电流互感器; A/D 转换

中图分类号: TM452

0 引言

电流互感器是电力系统的重要设备。随着电力工业的不断发展, 电网电压等级的不断提高, 电流互感器的绝缘及饱和问题也日益突出。各种旨在解决超高压绝缘和饱和问题的测量方法不断涌现, 其中, 基于光学和电子学原理的测量方法, 经过近 30 年的发展, 成为相对比较成熟的一种超高压条件下的测量方法^[1,2]。

本文利用 Rogowski 线圈测量一次电流信号, 输出电压信号经过 A/D 转换装置转换为数字信号。为了降低电流互感器绝缘设计结构的要求, 高压端到低压端的信号传输利用光纤完成, 因此必须利用电光转换将电信号转换成光信号并由光纤传输到低压端。在低压端的信号处理部分首先是将光信号还原为电信号, 然后通过 D/A 转换装置将数字信号转换为模拟信号, 最后对模拟信号进行处理。

1 Rogowski 线圈的测量原理

Rogowski 线圈是一种特殊结构的空心线圈, 相对于传感电流互感器, 它具有测量准确度高(误差小于 0.1%)、测量范围大(1 A~100 kA)、通频带宽(0.1 Hz~1 MHz)、无剩磁、制造成本低等优点^[3]。

本文使用的 Rogowski 线圈, 是用 $\varnothing 0.355$ 单丝漆包线分 4 层共 8 497 匝均匀绕制在非磁性材料的骨架上的。图 1 是电子式电流互感器利用 Rogowski 线圈测量电流的原理图。

根据全电流定律和电磁感应定律, 可以推导出线圈骨架内磁通 Φ 以及线圈感应电势 $e(t)$ 分别为:

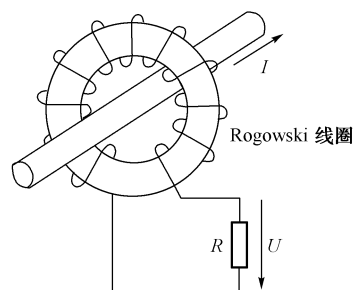


图 1 Rogowski 线圈测量原理
Fig. 1 Diagram of Rogowski coil

$$\begin{aligned}\Phi &= \oint B \cdot dS = \oint \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot dS = \\ &\int_{R_i}^{R_a} \frac{\mu_0 I}{2\pi r} h dr = \frac{\mu_0 I h}{2\pi} \ln \frac{R_a}{R_i} \quad (1) \\ e(t) &= - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(N\Phi)}{dt} = - \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{R_a}{R_i} \frac{dI}{dt} \quad (2)\end{aligned}$$

式中: I 为一次侧电流; 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_i 为骨架内径。

由式(2)可知, Rogowski 线圈感应电势与线圈尺寸、匝数以及一次电流有关, 不受外磁场和通流导体位置的影响。

式(1)成立的前提是漆包线均匀分布于线圈骨架, 而且通流导体必须与线圈之间保证一定的同轴度。如果漆包线不均匀分布于线圈骨架, 通流导体平行于线圈轴心, 线圈感应电势 $e(t)$ 的表达式为:

$$\begin{aligned}e(t) &= - \frac{\mu_0 N h}{4\pi} \ln \frac{R_a}{R_i} \frac{dI}{dt} - \\ &\frac{\mu_0 N h}{2\pi\beta} \frac{dI}{dt} \int \frac{1}{R} \arctan \left(\frac{R - \alpha}{R + \alpha} \tan \frac{\beta + \gamma}{2} \right) dR + \\ &\frac{\mu_0 N h}{2\pi\beta} \frac{dI}{dt} \int \frac{1}{R} \arctan \left(\frac{R - \alpha}{R + \alpha} \tan \frac{\gamma}{2} \right) dR \quad (3)\end{aligned}$$

式中: R 为线圈骨架的等效半径; α 为通流导体相对

于线圈圆心的偏心距; β 为不均匀分布线圈对应的中心角; γ 为线圈的初始角。

非均匀分布的 Rogowski 线圈如图 2 所示。

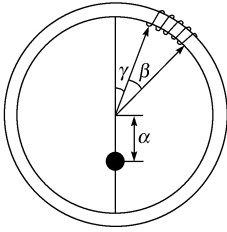


图 2 非均匀分布的 Rogowski 线圈
Fig. 2 Rogowski coil with nonuniform distribution

如果 $\beta = 2\pi$, 方程(3)等价于方程(2)。这表明: 如果漆包线均匀分布于线圈骨架, 线圈感应电势 $e(t)$ 与通导体偏心度无关。

如果 $\alpha = 0$, 线圈感应电势 $e(t)$ 的表达式为:

$$e(t) = -\frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{R_s}{R_i} \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

因此, 设计 Rogowski 线圈时必须将导线均匀缠绕于线圈骨架, 对通导体同轴度的要求就可以大大降低。

2 电子式电流互感器系统设计

电子式电流互感器的设计思路是在高压端利用 Rogowski 线圈测量大电流信号, 将线圈输出的小电压信号传输到低压端, 再经低压端信号处理电路处理, 其输出信号可作为测量信号或接二次保护设备。

如何将位于高压端的 Rogowski 线圈输出信号传递到低压端是电子式电流互感器设计的重点。光纤具有良好的绝缘性能, 利用光纤作为高压端和低压端的信号传输媒质, 具有绝缘简单、造价低、技术成熟等优点。在高压端将电信号转换为光信号, 通过光纤传输信号, 在低压端再将光信号转换成电信号, 并进行信号处理。为了提高测量的准确度, 在进行光电转换之前, 首先将模拟信号转换成数字信号。这样, 光纤中传输的是光脉冲信号, 不易受干扰, 而且传输距离远。图 3 是电子式电流互感器测量系统设计图。

电子式电流互感器必须同时满足测量、保护的需求, 测量范围不同, 因此采用 2 个 Rogowski 线圈, 一个用于测量通道, 另一个用于保护通道。电子式电流互感器工作在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 电子元件受温度影响较大, 因此必须对温度变化导致测量结果的偏差进行补偿。为了提高传感头电路工作的可靠性, 可将供电电压信号作为报警信号。

A/D 转换器采用 12 位多路数据采集系统, 可

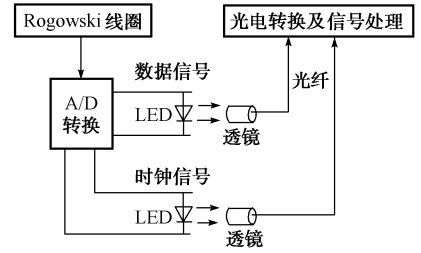


图 3 电子式电流互感器测量系统设计图
Fig. 3 Design of measurement system of electronic current transformer

以同时将电子式电流互感器的测量通道信号、保护通道信号、高压端温度信号、高压端供电电压信号同时采集, 利用时分复用的编码方式进行传输。为了保证 A/D 转换器能够正常工作, 必须在高压端增加针对 A/D 转换器的时序控制电路, 控制 A/D 依次采集 4 路信号, 然后将 4 路信号按照时分复用方式合成为 1 路信号。为区别各路信号, 需要在每一路数据之前合成该路数据信号对应的地址信号。

光电转换和电光转换器件采用发光二极管(LED)和光电管(PIN), LED 和 PIN 之间采用普通通信光纤连接。

由式(2)可知, Rogowski 线圈感应电势 $e(t)$ 与一次电流的微分成正比。为了获取一次电流的信息, 必须在低压端的信号处理单元增加积分环节。

为保证高压端和低压端的时钟同步, 在传输数据的同时, 还要将高压端的时钟信号传输到低压端。因此, 系统使用了 2 根光纤, 一根光纤传输数据信号, 另一根光纤传输时钟信号。

3 系统测量结果及分析

根据图 3 的设计, 对整套系统进行了整体测试。数据信号和时钟信号同步是获得准确测量结果的前提。图 4 是低压端光电变换输出数据图, 由图可知, 传输到低压端的数据信号和时钟信号仍然同步。

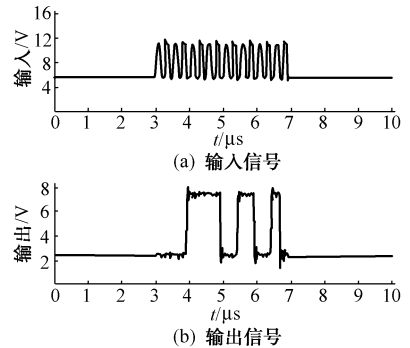


图 4 低压端光电变换输出数据图
Fig. 4 Data diagram of photoelectric conversion at secondary side

传输到低压端的数据由 16 位组成,前 4 位为地址位,0000 至 0111 分别对应 A/D 转换器的第 1 路至第 8 路;后 12 位为数据位。图 4 表示地址为 0000 (第 1 路)对应的数据信号。将时钟信号和数据信号传输到 D/A 转换器,4 路合成的信号分离,然后进行 D/A 转换,得到与一次电流成正比的模拟测量信号以及保护信号、高压端供电电压信号和温度信号。

测量二次端实际模拟输出量,与理论上的一次电流对应的二次端模拟输出量比较,根据式(3)计算电子式电流互感器的测量比差 ϵ_c (单位为 %)。

$$\epsilon_c = \frac{100(U_{\text{理}} - U_{\text{测}})}{U_{\text{理}}} \quad (3)$$

式中: $U_{\text{理}}$ 表示理论上的一次电流对应的二次端模拟输出量; $U_{\text{测}}$ 表示二次端实际模拟输出量。

图 5 是系统测量的线性度,它表示一次电流与低压端输出模拟电压信号之间的关系。其中,横坐标为一次输入电流,纵坐标为低压端输出模拟电压。由图 5 可知,该测量系统具有良好的线性度,说明电子式电流互感器具有不易饱和的特点。

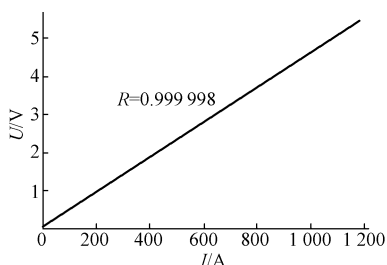


图 5 系统测量的线性度
Fig. 5 Linearity of system

图 6 是系统测量的比差图,其中虚线表示 IEC 6044-8 标准对电子式电流互感器的比差要求,实线表示系统实测比差。由图 6 可知,该系统比差满足 IEC 6044-8 标准 0.5 级电子式电流互感器要求。比差主要由以下几部分产生: Rogowski 线圈测量误差, A/D 转换误差, D/A 转换误差。这对 Rogowski 线圈的材料、缠绕工艺、A/D、D/A 集成电路的选择都提出了一定的要求。

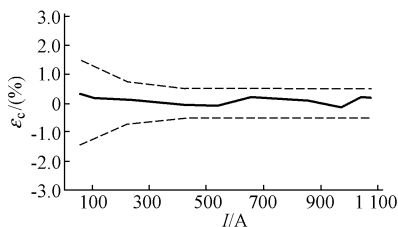


图 6 系统测量比差

Fig. 6 Ratio error of electronic current transformer

的输入信号和输出信号。模拟仿真运行是指根据安匝数相等的原则,以小电流通过多匝线圈代替大电流。输入小电流信号转换为电压信号,该电压信号与电子式电流互感器输出电压信号同时显示于图 7。

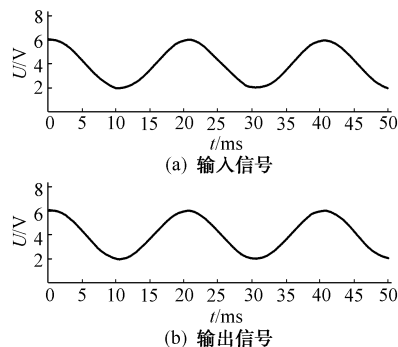


图 7 电子式电流互感器的输入信号和输出信号
Fig. 7 Input signal and output signal of electronic current transformer

4 问题讨论

高压端电子线路的供能问题是电子式电流互感器的难点。目前比较常见的有两种供能方案:① 利用激光供能;② 利用传统的电磁式电流互感器供能^[4,5]。

图 8 是利用激光供能的原理图。采用出光功率为 1.5 W 的激光器,光电池输出电功率达 150 mW,经过 DC/DC 转换后,可以提供 2 路 5 V 电压和 1 路 15 V 电压,基本满足高压端电子线路需求。但还需要在系统稳定性、提高光电池转换效率方面做进一步的研究。

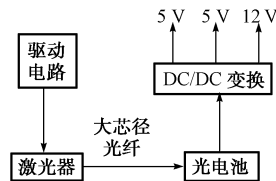


图 8 激光供能系统

Fig. 8 Energy supply scheme using laser

利用传统的电磁式电流互感器直接从输电线上取得能量,其易饱和的特点成为供能的关键。经过适当的设计,当输电线电流大范围变化时,由于线圈的饱和可获得稳定供电电压。

经过研究比较,系统最终采用传统电磁式电流互感器供能的方案。

5 结论

本文使用 Rogowski 线圈作为传感头,以光纤作为数据传输媒介,研制了一台电子式电流互感器。

该电子式电流互感器具有以下特点:

a. 传感头使用 Rogowski 线圈, 具有测量准确度高、测量范围大、通频带宽、无剩磁、制造成本低等优点。

b. 高压端和低压端分别采用电光变换和光电变换, 以光纤连接两端, 绝缘结构简单, 绝缘成本低。

c. 整套系统测量的准确度达到 0.5%, 满足 IEC 6044-8 标准 0.5 级电子式电流互感器的要求。

参考文献

- 1 申 焯, 罗承沐 (Shen Zhu, Luo Chengmu). 电子式电流互感器的新进展 (Development of Electronic Current Transformer). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25 (22): 59~63
- 2 王廷云, 罗承沐, 田玉鑫 (Wang Tingyun, Luo Chengmu, Tian Yuxing). 电力系统中光电电流互感器研究 (Study on Optical Current Transformer in Power System). 电力系统自动化

(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(1): 38~41

- 3 Murgatroyd P N, Woodland D N. Geometrical Properties of Rogowski Sensors. IEE Colloquialism on Low Frequency Power Measurement and Analysis. 1994-11-09
- 4 Banwell T C, Estes R C, Reith L A, et al. Powering the Fibre Loop Optically — A Cost Analysis. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(3): 481~494
- 5 Tardy A, Derossis A. A Current Sensor Remotely Powered and Monitored Through an Optical Fibre Link. Optical Fibre Technology, 1995, 1: 181~185

申 焯(1978—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电气设备在线监测系统的开发。E-mail: shenzhu99@mails.tsinghua.edu.cn

王士敏(1946—), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统自动化设备的开发。

罗承沐(1937—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统数字化。

DEVELOPMENT OF AN ELECTRONIC CURRENT TRANSFORMER

Shen Zhu, Wang Shimin, Luo Chengmu
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An electronic current transformer is developed to overcome the disadvantage of traditional current transformer such as complexity of insulation, saturation of coils and so on. With a Rogowski coil as sensor, the information of primary side current can be transferred to secondary side for signal processing by analog-digital conversion and electric-optic conversion. Derivative signals of current for measurement and relay produced with Rogowski coils, temperature signal and the value of supply voltage at primary side can be transferred with time division multiplexing data acquisition system (TDMDAS). The accuracy of electronic current transformer is better than class 0.5. And it is very easy to insulate and has wide dynamic range and no magnetic saturation.

Key words: Rogowski coil; electronic current transformer; A/D conversion