

基于 Rogowski 线圈传感的光电电流互感器的研究

乔卉, 刘会金, 王群峰, 陈允平

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 随着电力系统的快速发展, 传统的电磁感应式 TA 所存在的问题日益严重, 给电力系统运行带来一定的故障隐患, 而彻底解决这些问题的前提是采用新的传感技术来研制新型的电流互感器。文中介绍了一种基于 Rogowski 线圈的新型混合型光电电流互感器的工作原理及系统的组成, 同时还研究了在技术实现和实用化过程中的一些问题和解决方法。

关键词: 光电电流互感器; 混合型; Rogowski 线圈

中图分类号: TM452⁺.93

文献标识码: B

文章编号: 1003-4897(2002)07-0040-04

1 引言

在电力系统中, 电磁感应式电流互感器被用来测量电流已有一百多年历史了。它为电力系统的计量、继电保护、控制与监视提供输入信号, 具有非常重要的意义。随着电力系统的传输容量越来越大, 电压等级越来越高, 传统的电磁式电流互感器因其传感机理而出现不可克服的问题: 绝缘结构日趋复杂, 体积大, 造价高; 在故障电流下铁芯易饱和, 使二次电流数值和波形失真, 产生不能容许的测量误差; 充油易爆炸而导致突然失效; 若输出端开路, 产生高电压对周围设备和人员存在潜在的威胁; 易受电磁干扰等。为适应电力系统快速发展的需要, 必须研究利用其它感应原理的电流互感器。

目前利用光学传感或光纤传输信号技术来研制新型的光电电流互感器 (optical current transducer, 简称 OCT) 已成为人们研究的焦点。由于采用传感头的不同, OCT 可分为全光型和混合型两大类。全光型 OCT 采用光学传感头, 其优点主要在于: 线性度比较好, 灵敏度可以做得很高, 绝缘性能好。资料表明, 国外已有产品面世, 国内也有样机开始进行挂网实验, 但温度变化对传感头可靠性和稳定性影响较大, 影响测量精度。由于电力系统对电流互感器的测量精度要求较高, 采用法拉第效应的全光型 OCT 还需要从传感头的结构、材料的选择、光路系统的构成等各方面进行改进, 提高其运行可靠性、稳定性, 使其能够达到电力系统实用的要求。

2 混合型 OCT

混合型 OCT 是利用有源器件调制技术, 以光纤作为信号传输媒质, 把高压侧转换的光信号传输到

接受端进行信号处理, 得到被测电流信息的装置, 其中光纤仅作为信号传输装置, 不用作传感器件。它避免了全光型 OCT 传感头易受温度变化的影响的缺点及光路设计中的技术难点。早期的混合型 OCT 是基于传统电流互感器 (TA) 发展的, 它既利用了光纤的高绝缘性的优点, 使电流互感器的制造成本、体积和重量显著降低, 又充分发挥了电力系统广泛接受的传统 TA 测量装置的优势, 具有很强的实用性, 但由于 TA 传感机理的限制, 这种混合型 OCT 仍存在着传统电流互感器难以克服的一些缺点, 如铁磁饱和问题。本文介绍的混合型 OCT 由于采用的新的传感机理, 从根本上解决传统电磁式 TA 所存在的问题, 且其受环境和温度的影响较小, 更易满足现场要求。

2.1 工作原理

Rogowski 线圈是一种较成熟的测量元件, 以前广泛地应用在电力系统高电压领域, 它实际上是一种特殊结构的空心线圈, 可根据被测电流的变化, 感应出被测电流的变化的信号, 其特点在于被测电流几乎不受限制, 反映速度快, 可以测量前沿上升时间为纳秒级的电流, 且精确度可高达 0.1%^[1]。从测量大电流的观点来看, Rogowski 线圈是一种较理想的敏感元件, 由于它不与被测电路直接接触, 可以方便地对高压回路进行隔离测量, 因此可以将其作为传感元件, 用于混合型光电电流互感器。

将测量导线均匀地绕在截面均匀的非磁性材料的框架上, 就构成了 Rogowski 线圈, 如图 1 所示。被测电流从线圈中心穿过, 由电磁感应原理可知: 任何一个随时间变化的电流 $i(t)$ 总是伴随着一个随时间变化的磁场环链, 这个磁场将在线圈中感应产生电势 $e(t)$, 电压 $e(t)$ 与电流的变化率 $di(t)/dt$

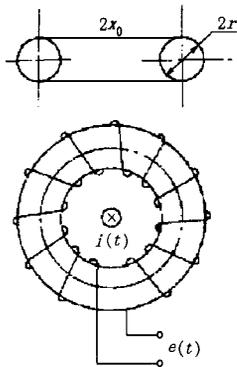


图1 Rogowski 线圈结构图

成正比。当互感系数 M 已知,感应电势 $e(t)$ 为

$$e(t) = - M di/dt \quad (1)$$

当 Rogowski 线圈的结构确定后,就可以通过理论分析计算出 $e(t)$ 与被测电流变化的关系。

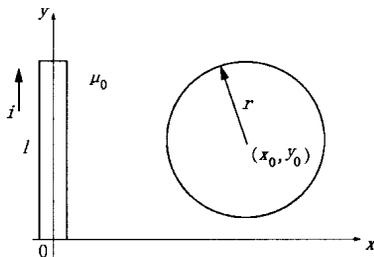


图2 求测量线圈中的感应电动势的示意图

假定无限长的导线中,通过电流 $i(t) = I_m \cos t$,右边为一圆形测量线圈。根据按图2所示标定的坐标位置,穿过圆形线圈的磁通量为

$$\begin{aligned} &= \iint \mu_0 \frac{I_m \cos(t)}{2x} dx dy = \\ &2 \int_{x_0-r}^{x_0+r} \frac{I_m \cos(t)}{2x} dx \int_{y_0-\sqrt{r^2-(x-x_0)^2}}^{y_0+\sqrt{r^2-(x-x_0)^2}} dy \quad (2) \end{aligned}$$

经过计算并根据 $\Phi = NI$ 可知,可得互感系数 M

$$M = \frac{\Phi}{i} = \frac{N}{i} = \mu_0 N(x_0 - \sqrt{x_0^2 - r^2}) \quad (3)$$

实际应用中,必须考虑多方面因素对互感系数的影响,因此必须通过一些措施测出实际的 Rogowski 线圈的互感系数。比较准确的方法是用标准可变互感器构成的电桥回路或其改进电路进行测量。

基于 Rogowski 线圈传感的混合型电流互感器系统框图见图3。

如图3所示,被测电流 i 通过 Rogowski 线圈时,在线圈出线端感应产生电势 e ,该信号经积分器得到一个与 i 同相位的电压信号,将该信号经 A/D 转换成数字信号后,再经过 E/O 调制成光信号,通过光纤传输到低压侧,然后再经过 O/E 转换后,将数字信号直接送到单片机进行数据处理,为微机保

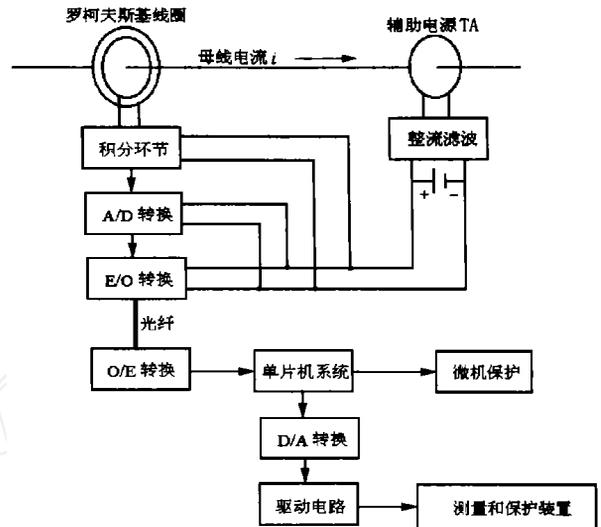


图3 基于 Rogowski 线圈传感的混合型电流互感器的系统框图

护提供所需的信号,或者对信号进行 D/A 转换,还原成模拟电流信号,然后经过放大,供测量和保护装置用。

2.2 硬件系统设计

2.2.1 输入调理电路

本装置的输入调理电路由有源积分器、低通滤波器和直流偏置电路组成。

由上述可知 e 与 i 存在微分关系,为得到能正确反映被测电流情况的信号,必须加一积分环节。为保证测量精度,实际系统采用的是如图4所示的有源积分器。

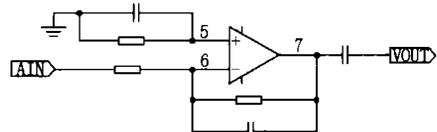


图4 输入调理电路中的积分环节

2.2.2 A/D 转换

串行 12 位 ADC 采用 MAX187,为 +5V 单电源供电、自带采样保持和基准电压电路。其外围电路由时基电路、采样控制电路、串行数据编码电路等组成。

2.2.3 E/O 转换及光纤传输

考虑到光纤具有抗干扰能力强,绝缘性能好的特点,本系统将信号经过 E/O 转换利用光纤传输,从而大大降低了电力系统中的电磁干扰对测量装置的影响。电光转换由发光二极管 LED3S403 实现,其对脉冲的响应时间小于 4ns,工作电流小于 100mA。光纤传输系统主要由光发送器、光缆及光接收器组成。由于采用数字调制,对电磁干扰和环境因素具

有较强的抵御能力,光强的变化也不会对传输的光脉冲信号造成多大影响。

2.2.4 O/E 转换

由于采用了数字的传输方式,光电管对输入光脉冲的响应速度直接制约着通信速率,实验证明,采用光敏三极管作光电转换器件,其对方波的响应只能达到几十千赫兹。为了提高传输速率,提高系统的实时性,这里采用了 PIN 光电二极管,本文使用 PDRM 970 型 PIN 管(见图 5),它具有十分宽的频带响应范围。

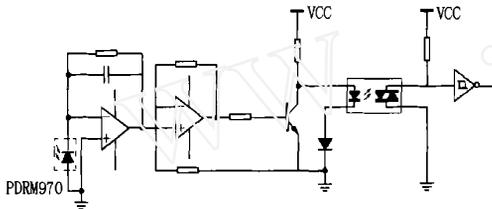


图 5 O/E 转换电路图

2.2.5 信号处理

低压端接收到的信号经单片机系统可完成综合控制、数据存储和通信等功能,提供实际需要的数字信号;为满足实际测量及传统的继电保护等其它扩展功能的需要,同时采用串行 12 位 A/D 转换器 MAX531,得到模拟信号,MAX531 由 $\pm 5V$ 电源供电、自带基准电压电路,可双极性输出,其输出为正弦波,经一与 AD 采样 LPF 相同特性的 LPF 即可平滑输出波形。

3 存在的问题及讨论

混合型 OCT 在高压端使用了许多有源器件,因此提供一个合适的电源是保证电流互感器正常工作的关键,也是一个技术难题。目前国内外一般采用两种方案,一是从被测电流取用电源,即在被测母线上安装一个辅助电源 TA,该 TA 处于高压端,绝缘要求低,因此结构较简单,考虑到电源 CT 可能出现故障,还必须并联一蓄电池组作为备用电源;二是激光能量传输,即通过 O/E 转换,将光能转变为电子元件所需的电能。但这两种方案都存在一定缺点,前者安装使用不方便,后者成本较高。作为电子元件的驱动电源,功率并不大,因此可以考虑使用太阳能装置来提供电源,现有的太阳能蓄电池能满足电力系统现场工作的要求,而且太阳能蓄电池重量轻、体积小,方便安装和检修。考虑到经济性,本装置使用安装辅助电源 TA 的方案。

在实际研制过程还需注意的是由于 Rogowski 线

圈是靠电磁感应原理来测量电流的,且灵敏度较高,因此易受外界磁场的干扰,必须对 Rogowski 线圈采取有效的屏蔽技术,以减小测量误差。

4 实验研究

自制圆形 Rogowski 线圈外形如图 1,其大环直径 $2x_0$ 为 15 cm,截面直径 $2r$ 为 3.5 cm,用直径 0.31mm 的漆包线绕 3140 匝。大电流发生器由加拿大 RTDS(Real Time Digital Simulator)技术公司制造的实时数字模拟系统和奥地利 Omicron 公司生产的 CMS156 功率放大器组成。RTDS 的模拟电流源通过 Rack 模拟量 I/O 接口与 CMS156 功率放大器相联,功率放大器具有三相电压和三相电流输出。其中单相输出电流有效值范围为 0~75A。实验线路如图 6 所示。初步实验 Rogowski 线圈的工频输出特性如图 7(a)所示,实验结果如表 1 所示。高次谐波情况下 Rogowski 线圈的输出特性如图 7(b)所示,实验结果数据如表 2 所示。由图 7 可见 Rogowski 线圈在工频及高次谐波的情况下的线性度良好。

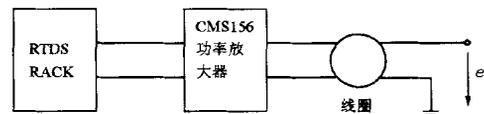


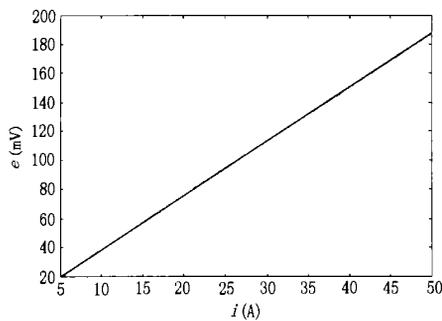
图 6 实验连接图

表 1 实验结果

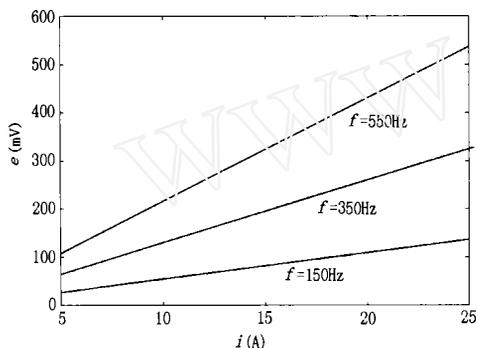
i/A	e (测量值)/mV
5	20.21
8	31.31
10	38.75
15	57.70
20	76.22
25	94.80
30	113.46
35	132.00
40	150.55
45	169.12
50	187.54

表 2 不同频率下的实验结果

i/A	e/mV		
	150 (Hz)	350 (Hz)	550 (Hz)
5	27.13	65.10	107.88
10	54.20	130.10	215.72
15	81.27	195.15	323.48
20	108.33	260.10	431.24
25	135.41	325.12	539.00



(a) Rogowski线圈的工频输出特性



(b) Rogowski线圈的高次谐波输出特性

图7 Rogowski线圈的输出特性

5 结束语

主要分析了作者所研究的基于 Rogowski 线圈的新型光电电流互感器的工作原理、系统组成及技术实现,并对研制过程的一些问题进行了说明。基于 Rogowski 线圈的光电电流互感器具有许多传统 TA 所不能及的优点:绝缘结构简单,体积小,重量轻,无铁磁饱和,可靠性高,灵敏度高,测量范围大,频带

宽,是最有可能应用于实际电力系统的新型 OCT,具有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 揭秉信. 大电流测量[M]. 北京:机械工业出版社, 1987, 1.
- [2] Ward D A. Measurement of Current Using Rogowski Coils [Z]. The Institution of Electrical Engineers, 1993.
- [3] Donaldson E F, Gibson J R, Jones G R, et al. Hybrid Optical Current Transformer with Optical and Power-line Energisation[J]. IEE Proc - gener Transm Distrib, 2000, 147, (5).
- [4] 聂一雄,尹项根,等. 磁位计在电力系统继电保护中应用的可行性研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(16).
- [5] Arthur Radun. An Alternative Low-Cost Current-Sensing Scheme for High-Current Power Electronics Circuits [J]. IEEE Transaction on, Vo 142, Isuel, 1995.
- [6] 易本顺,刘延冰,等. 光学电流传感器现场运行性能分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, (2).
- [7] 罗苏南,叶妙元,等. 光学组合互感器的研究[J]. 电工技术学报, 2000, 12(6).

收稿日期: 2001-11-06

作者简介: 乔卉(1977-),女,硕士研究生,从事电力系统运行与控制等方面的研究; 刘会金(1952-),男,教授,从事电力系统稳定、继电保护及自动化方面的研究; 王群峰(1978-),男,硕士研究生,从事电力系统自动化等方面的研究; 陈允平(1945-),男,教授,博士生导师,国务院学位委员会电工学科评议组成员,从事电力系统继电保护、高压技术、电力系统自动化等方面的研究。

The research of optical current transducer based on the Rogowski coils

QIAO Hui, LIU Hui-jin, WANG Qun-feng, CHEN Yun-ping

(Department of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the fast development of power system, the problems of the traditional electromagnetic current transducer are increasingly severe. A thorough solution to these problems is to adopt a new sensitive principle to produce a new type of current transducer. Many things about a new type of hybrid optical current transducer founded on the Rogowski coils were introduced in this paper, including its principle, system construction and some problems and solution during the course of practicality of this type hybrid OCT.

Key words: optical current transducer; hybrid; Rogowski coils

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告