

文章编号: 1001-3806(2003)05-0390-03

新型光电混合式电流互感器设计*

柴雄良 程兆谷 高海军

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海, 201800)

陈邦栋 董增平 李 锋

(上海思源电气股份有限公司, 上海, 201108)

摘要: 设计了一种光电混合式电流互感器, 它由传感头、光纤传输和光电转换器、信号处理电路和工作电源 4 部分组成。这种结构具有绝缘性能高、可靠性强、质量小等特点, 并对误差情况进行了分析。

关键词: 电力系统; 电流互感器; 光纤; 光电池; 压频转换器

中图分类号: TM452.94 文献标识码: A

Design of a novel electro optical hybrid current transducer

Chai Xiongliang, Cheng Zhaogu, Gao Haijun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800)

Chen Bangdong, Dong Zengping, Li Feng

(Shanghai Siyuan Electric Co., Ltd., Shanghai, 201108)

Abstract: A novel electro optical hybrid current transducer is designed. It consists of four parts: a sensor head, an optical fiber transmitter and optoelectric converter, a signal processing circuit and a power supply. In the operation environment, this device has the advantages of high insulation, high reliability, small mass and high inference rejection. Measurement errors are analyzed in this paper.

Key words: electric system; current transducer; optical fiber; photocell; VFC

引 言

电流互感器(CT)是电网中用来计量和继电保护不可缺少的设备。目前,电力系统中使用的电流互感器大部分基于电磁感应原理,随着现代电力向高电压、大容量方向发展,对电力系统电流互感器提出了小型化、自动化和高可靠性的要求,传统的电磁式电流互感器已不适应这一发展趋势。近几十年来,随着光纤和传感技术的迅速发展,电流传感器的研制也取得突破性的进展,许多光电式电流互感器(OCT)产品相继问世^[1~8]。与传统的电磁式电流互感器相比,它有许多独到的优点:不含油,无爆炸危险;与高压线路完全隔离,满足绝缘要求,运行安全可靠;不含铁芯,无磁饱和、铁磁共振和磁滞效应;抗电磁干扰;灵敏度高,响应频带宽;体积小,重量轻,易安装;便于计算机控制和信号处理,实现信息的可靠传递。

OCT 分为无源型和混合型两种。无源型 OCT 指传感头不需要电源供电,传感头一般用法拉第磁光效应原理制成,称为磁光式电流互感器(MOCT)。这种结构的最大缺点是温度和振动以及长期稳定性问题始终没能很好地解决,及光纤存在各种形式的双折射^[9]导致检测误差大;混合型 OCT 指高压侧电流信号通过采样线圈转换成电压信号后传输给发光元件而变成光信号,再由光纤传输到低电位侧,进行变换成电信号后放大输出。混合型 OCT 虽然在高压部分需要有源的电子线路,但无需特殊功能的光学元件,加之电子技术的发展使集成电子元件的精度和温度稳定性有了很大的提高,对电源容量要求大幅度下降,而且体积小、寿命长、价格低,使混合型 OCT 的实用程度大大超过无源型 OCT。

1 激光供能系统电流互感器

目前广泛应用的混合型 OCT 是通过小型 CT 从高压母线上获得的能量来检测高压母线电流,由于母线电压的不稳定引起了供给传感头的直流电压不稳定,从而导致测量结果有误差。如果改变混合型 OCT 的供能结构,使供电电压稳定,能大大提高测量结果的精确度。作者提出在高电压侧采用激光

* 上海市光科技资助项目。

作者简介:柴雄良,男,1974年9月出生。博士研究生。主要从事光电器件的研究。

收稿日期:2003-02-10;收到修改稿日期:2003-04-10

供电方式: 用大功率 LD 作为光源, 发出的光能提供驱动光电池光电转换给传感头供电。根据系统总功率需要选用合适的光功率和输出效率的 LD 后, 可以非常满意地得到光电池的恒定功率和电压输出, 该 OCT 的结构如图 1。这种结构既具有光纤传输的优点, 又避免了光学传感头存在的温度和振动问题。该 OCT 由传感头、激光供能系统、光电转换器和处理系统组成。

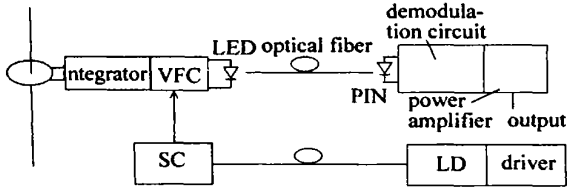


Fig. 1 OCT powered with laser energy

1.1 传感头

传感头由 Rogowski 线圈、积分器和压频转换器 (VFC) 构成。Rogowski 线圈是在一根截面细小而均匀的非磁性圆环上均匀密绕线圈, 在测量电流时, 将圆环围绕被测载流导线。由于 Rogowski 线圈采用非磁性芯, 所以在很宽的电流范围内不会出现饱和现象, 也不会带来线性误差。与传统的 CT 比, Rogowski 线圈具有体积小重量轻和结构简单等优点, 此外, 与高压截流导线没有电的联系, 运行安全可靠。

根据全电流定律: $\oint H \cdot dl = I$, 则 $H = \frac{I}{2\pi r}$, 所以, $B = \mu H = \frac{\mu I}{2\pi r}$ 。由电流感应定律: $e(t) = - \frac{d\Phi}{dt}$, $\Phi = \oint B \cdot dS = \oint \frac{\mu I}{2\pi r} dS = \int_{R_i}^{R_a} \frac{\mu I}{2\pi r} H dr = \frac{\mu I h}{2\pi} \times \ln \frac{R_a}{R_i}$ 。则磁通量为: $\Phi = N \Phi$, 即感应电动势为:

$e(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{\mu N h}{2\pi} \ln \frac{R_a}{R_i} \frac{dI}{dt}$ 。式中, I 为导体中流过的瞬时电流, 单位 A; r 为 Rogowski 线圈的骨架的任意半径, 单位 m; μ 为真空磁导率, 单位 H/m; N 为绕组匝数; h 为骨架高度, 单位 m; R_a 为骨架外径, 单位 m; R_i 为骨架内径, 单位 m。

绕组的互感为: $M = \frac{\mu N h}{2\pi} \ln \frac{R_a}{R_i}$, 所以, Rogowski 的感应电动势是: $e(t) = - M \frac{dI}{dt}$ (1)

由(1)式可以看出, Rogowski 线圈相当于一个微分器, 在实际应用中, 由于二次侧的线圈输出电压与一次侧母线的输入电流的导数成比例, 故在相位上两者相差 90° , 为使其相位一致, 要在线路里加一 RC

电子积分器, 它具有积分时间常数大, 输出电阻小, 受后极影响小等特点, 有提高测量电流的脉宽和减小测量的相对误差的优点, 其等效电路如图 2。构

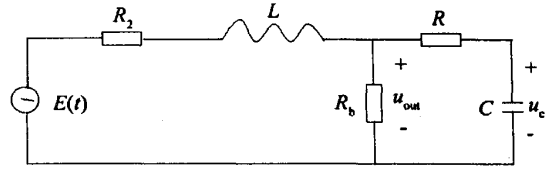


Fig. 2 The equivalence in circuit for the integrator

成积分器的运算放大器的型号是 ICL7620, 它是斩波稳零运算放大器。接入积分器后的输入电流与积分电压的关系如下: $u_{out} = u_c + R i_c$, $I_c = C \frac{du_c}{dt}$ 。

即: $u_c = \frac{1}{RC} u_{out} e^{-t/RC}$ 。而积分电压为:

$$u_c = \frac{R_b}{RCN} I(t) e^{-t/RC} \quad (2)$$

由此可见, 当选择较大的 R, C 值时, 衰减常数 $\tau = \frac{1}{RC}$ 可以消除或减少衰减, 而且经过积分器后, 使积分电压在相位上与输入电压的相位保持一致。

由于 Rogowski 线圈输出电压是电流的导数, 这样就多了一个微分环节。在 Rogowski 线圈的输出端必须引入一个非线性的积分环节——压频变转换器 (VFC), VFC 的作用是将模拟电压或电流转换成与逻辑电路兼容的脉冲串或者方波, 其输出频率与模拟量呈精确的线形比例关系。这样微分环节和积分环节相互抵消, 从而保证了系统的线形度和准确度。输出频率连续跟踪输入信号, 直接影响输入信号的变化而无须外部同步时钟。如果在给定的计数周期内, 测量输入脉冲串或方波的个数, 就可以得到在这一计数周期内的平均频率, 即这一计数周期内输入模拟量的平均 A/D 值。

由于 VFC 的采样转换值是在采样周期内的平均值, 即引入了一个积分电路, 所以对信号中的高频分量有一定的衰减甚至丢失。数学推导如下:

设采样输入电压为 $f(t)$, 它的频谱函数为 $F(\omega)$, 积分计数周期为 T , 则: $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{j\omega t} dt$, 由于采样转换值是积分计数器周期

T 内 $f(t)$ 的平均值, 所以, $f_1(t) = \frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} f(t) dt$ 。对 $f_1(t)$ 作傅里叶变换:

$$F_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T}^{+T} f(\tau) d\tau \right] e^{j\omega t} dt = (e^{j\omega T} - 1) \frac{1}{j\omega T} F(\omega) \quad (3)$$

假如以 ω_s 的采样频率对 $f_1(t)$ 进行采样, 那么抽样信号 $f_{1s}(t)$ 的频谱函数为:

$$F_{1s}(\omega) = \frac{\omega_s}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} F_1(\omega + K\omega_s) = \frac{\omega_s}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} [e^{j(\omega + k\omega_s)T} - 1] \times \frac{1}{j(\omega + k\omega_s)T} F(\omega + K\omega_s) \quad (4)$$

从(3)式和(4)式看出: $F_{1s}(\omega)$ 就是以 ω 为周期重复 $F_1(\omega)$ 的函数。 $F_1(\omega)$ 和原始信号的频谱函数相比多了一个 $(e^{j\omega T} - 1) \frac{1}{j\omega T}$ 系数。而 $(e^{j\omega T} - 1)$ 的影响更加严重, 它使得满足下式时: $e^{j\omega T} - 1 = 0, \omega T = 2n\pi, n = 0, 1, 2, \dots, \omega = 2n\pi/T, n = 0, 1, 2, \dots$ 。它的频率衰减分量为 0。因此, 选取 VFC 时要求注意积分器的周期的选取, 否则将会造成频谱分量的丢失; 但另一方面, 适当地选取积分计数周期, 也可以消除特定频率的噪声, 同时由于 VFC 的低通滤波特性, 使之具有较强的抗干扰能力。因此, 只要采样频率满足采样定理, 利用采样值可以完全复现原始信号, 频谱分量没有任何丢失, 选用集成芯片 AD537 的 VFC 有利于大大减少高频分量的衰减。

1.2 光纤传输和电光转换

光脉冲信号有数字式和光学介质的优点, 对电磁或环境有很强的抗干扰能力。它通过光纤传输到低压端, 由于环境干扰和光纤结构不规则, 影响了 LED 发光强度的变化, 但对重新恢复信号没有影响, 而且光纤在高低压之间起电绝缘介质和实现高压侧电流采样数据向低压侧的高速传送的作用。光电转换通过型号为 HP1424LED 和 HP2424PIN 相连来实现。

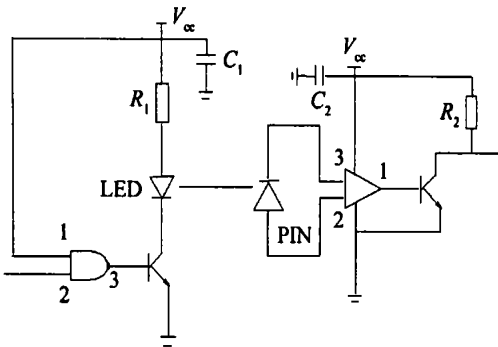


Fig. 3 Optical transmission system

频率信号从 VFC 输出后, HP1424 通过一个电阻接在电源 VFC 之间, 当 VFC 输出为高电频时, LED 不发光; 输出为低电频时, LED 导通发光。所以, LED 发光受电路输出频率的控制, 其频率与之

一致, 这样电频率就转换成了光脉冲频率。光传输系统原理如图 3 所示。

1.3 信号处理

从 PIN 出来的调频信号通过解调电路恢复电流信号, 它具有噪声小、稳定性高的特点。而且输出的数字频率稳定, 有利于与计算机连接。低压侧的系统主要实现与高压侧系统的数据通信, 对电压、电流和功率的计算, 提供与继电保护和远程控制计算机的通信接口。信号处理系统的结构原理结构如图 4 所示。低压段采用 CPU 结构, 51 单片机完成数据电压、电流的数据采集, 80C196 单片机完成数据计算、显示和通信接口工作, 它们之间通过双端口 RMA 传递数据。

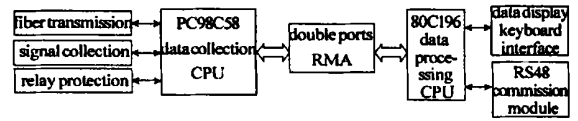


Fig. 4 Signal processing system

1.4 电源部分

传感头电路工作的能量是通过 CDQ-01A 单晶硅太阳能电池供给的。但由于一年四季的光照强度不同, 引发太阳能电池供给电路系统的能量不稳定。本文中应用光功率推动原理, 采用激光二极管光源功能方式作为传感头的电源。如图 5 所示。为了满足其输出电压大于 3.5V, 输出功率大于 200mW 的实际要求选择型号为 CGO98PH25 的激光二极管, 该二极管带热电制冷器 (TEC), 它是利用 Peltier 效应工作的半导体双向热泵浦器件, 安装在 LD 芯片和金属封装主体之间, 其作用是将芯片温度维持在 25℃。当环境温度大于 25℃时, TEC 加正偏, 制冷; 当环境温度小于 25℃时, TEC 加反偏, 加热。



Fig. 5 Sensor heading circuit

光电池是非线性器件, 存在最大功率点和阻抗匹配问题。通过改变图 5 中 LD 的驱动电流来调节光电池的输出功率, 在不同的光功率下, 光电池在不同匹配电阻上输出不同的最大电功率, 从中可以找出满足实际要求的光电池的工作点。

2 误差分析

系统的误差主要来自探头、环境温度和电源。

2.1 探头部分误差

由 (1) 式可知, Rogowski 线圈的误差与其结构 (下转第 395 页)

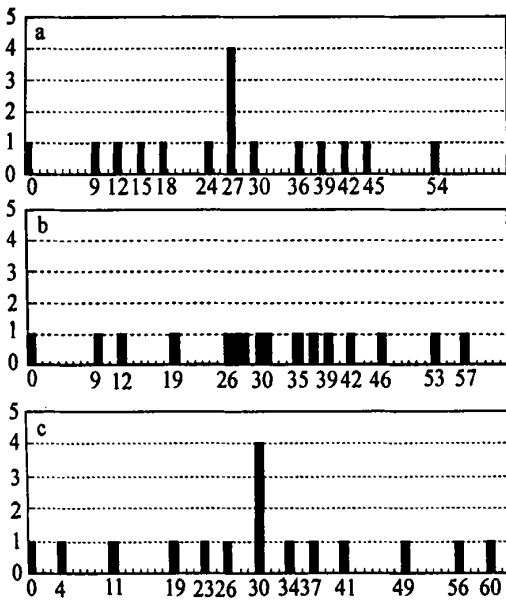


Fig. 5 Simulation results

a—the autocorrelation waveform in node A b—the cross correlation waveform in node A c—the autocorrelation waveform in node C

设光正交码的相位不匹配自相关峰和互相关峰分别为 λ_A 和 λ_C , 相位匹配自相关峰为 λ_{max} 。从仿真结果可见, 由图 4 所示的 POADM 组网中, $\lambda_A = \lambda_C = 1$, $\lambda_{max} = 4$, 其差别为 3, 对光学处理中的阈值设定十分有利。

3 结束语

由电路交换向分组交换演进是电信网络的发展趋势之一, 在光传送网上体现为不同的支撑技术, 设计了一种面向分组业务的新型 OADM 结构, 给出了设计原则和研究结果, 为进一步深入研究与应用奠定了良好基础。

参 考 文 献

- [1] Shivakela E S, Sivarajan K N, Selvarajan A. J Lightwave Technol, 1998, 16(4): 501~ 508.
- [2] Park E, Mendez A J, Gamire E M. IEEE Photon Technol Lett, 1992, 4(10): 160~ 1162.
- [3] Cotter D, Lucek J K, Shabeer M *et al.* Electron Lett, 1995, 31(23): 2201~ 2202.
- [4] Lee S W, Green D H. IEE Proc-Communication, 1998, 145(4): 265~ 271.
- [5] Shin J D, Jeon M Y, Kang Ch Shin. IEEE Photon Technol Lett, 1996, 8(7): 941~ 943.
- [6] Zhang J G, Sharma A B, Kwong W C. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44(3): 952~ 962.
- [7] Chung Fan R K, Salehi J A, Wei V K. IEEE Transactions on Information Theory, 1989, 35(3): 595~ 604.
- [8] Salehi J A. IEEE Transactions on Communications, 1989, 37(8): 824~ 833.

(上接第 392 页)

密切相关, 这就要求在绕制线圈时尽量使结构坚固、紧密。采取这些措施后, 经校验后 Rogowski 线圈的精度为 0.15%; 由(2)式可知, 误差与 VFC 有关, 还与电阻和电容和 AD537 的压值有关, 选用精度高、性能好的元器件及芯片, 其精度可达 0.10%。

2.2 环境温度的变化引起的误差

在我国室外温度变化范围为 -40°C 至 70°C , 温度变化 5°C 时, 电子元件的阻值会变化 0.1Ω , 因此环境温度的影响是不能忽略, 但在实际应用中要采取补偿措施, 减小温度对测量结果的影响。

2.3 电源部分引起的误差

系统使用硅光电池作电路电源, 用大功率 LD 为其提供光能。LD 的输出波长随环境温度的变化发生漂移, 从而影响光电池输出电压的稳定; 其测量精确度还受到光谱宽度、功率漂移和恒流源纹波等因素的影响, 合理地选择光源和设计驱动电流时十分重要的, 为了保证测量的精度, 要求光源的纹波系数尽可能的小。采取上述措施后, 电源输出电压的稳定度为 5%。

3 结 论

所提出的光电式电流互感器集光纤通信和微机技术于一体, 克服了传统的取样线圈的缺点。采用光纤技术起到安全作用; 采用激光功能方式, 使传感器工作稳定, 能满足实际工作要求。该器件在实际使用中会得到进一步的改进, 有着广阔的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Harms H, Papp A. Appl Opt, 1980, 19(22): 3741~ 3745.
- [2] Maffetone T D, McClelland T M. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1430~ 1437.
- [3] Yamagata Y, Oshi T, Katsukawa H *et al.* IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 8(3): 866~ 873.
- [4] Katsukawa H, Ishikawa H, Okajima H *et al.* IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 11(2): 702~ 707.
- [5] Yoshida Y, Kawazoe S, Ibuki K. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(4): 1805~ 1812.
- [6] Ulmer E A. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 892~ 898.
- [7] Cease T W, Driggs J G, Weikel S J. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1374~ 1379.
- [8] Saw a T, Kurosawa K, Kaminishi T. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(2): 884~ 891.
- [9] Stolen R H, Turner E H. Appl Opt, 1980, 19(6): 842~ 845.