

全光纤电流互感器的新型调制解调方案研究

欧阳康 洪小斌 伍 剑 林金桐

北京邮电大学信息光子学与光通信研究院国家重点实验室, 北京 100876

摘要 介绍了一种采用新型调制解调方案的全光纤电流互感器。该方案采用归零方波调制相位调制器,以正弦波信号作为本振信号实现模拟相干解调,对采样信号做数字信号处理(有限脉冲响应滤波、滑动平均滤波)完成阶梯波反馈补偿并实现电流闭环检测。对实验结果的分析表明,该方案能实现大电流闭环检测,在室温条件下、额定电流1000 A时达到IEC 60044-8:2002标准0.2级,具有实际应用价值。

关键词 光纤光学;全光纤电流互感器;归零方波;模拟相干解调;闭环检测

中图分类号 TM452

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0105004

A Novel Method on Modulation and Demodulation of All Fiber Optical Current Transformer

Ouyang Kang Hong Xiaobin Wu Jian Lin Jintong

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract A kind of fiber optical current transformer which employs a novel method on modulation and demodulation is proposed. The system controls the phase modulator with a return-to-zero square wave, and implements the analog coherent demodulation with a sine wave which acts as the local oscillator signal, and fulfills the current closed loop measurement by digital signal processing (finite impulse response filter, moving average filter) of acquired data to generate step wave. The result of the experiment suggests that the method can realize the closed loop measurement of large current, meet 0.2 level of IEC 60044-8:2002 standard when rated current is 1000 A at room temperature, and has the practical application value.

Key words fiber optics; all fiber optical current transformer; return-to-zero square wave; analog coherent demodulation; closed loop measurement

OCIS codes 060.2370; 120.5790; 280.4788

1 引 言

基于法拉第效应的反射式全光纤电流互感器(FOCT)具有测量精度高、动态范围大、绝缘性能好、抗电磁干扰和数字化输出等优点^[1],能够克服传统电磁式电流互感器的磁饱和与安全性不足等方面的缺点^[2],适应电力系统数字化和智能化的发展需求。

近年来,对FOCT的研究使其逐步进入实用化阶段,并已在国内智能变电站试点工程中挂网应用^[3]。目前对FOCT系统的研究趋势集中于通过改进光路结构或者电路结构来减小环境因素(如温度、振动等)干扰、提高测量精度与稳定性^[4]。FOCT电路系统普遍采用文献[5]中所描述的系统,以等占空比非归零方波调制光信号,以方波信号作为本振信号实现数字相干解调,通过阶梯波反馈实现电流闭环检测。文献[6]采用不等占空比归零方波调制方案的目的是实现 $\lambda/4$ 波片的温度补偿,信号处理方案与文献[5]本质上是一致的。这

收稿日期:2014-06-17;收到修改稿日期:2014-08-05

作者简介:欧阳康(1990—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感与嵌入式方面的研究。E-mail: oykwelcome@foxmail.com

导师简介:洪小斌(1971—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: xbhong@bupt.edu.cn (通信联系人)

种方案对器件的数字信号处理能力要求高。本文从调制方案与解调方案着手,探讨采用等占空比归零方波调制、正弦波作为本振信号实现模拟相干解调、阶梯波补偿的闭环方案,并描述了该方案的实现结构。该方案充分利用硬件乘法器实现模拟相干解调,简化了数字信号的算法需求,同时利用锁相环跟踪 FOCT 系统特征频率的微小变化更进一步地减小系统误差。通过原理分析、实验验证,表明该方案是有效可行的。

2 基本原理

FOCT 的工作原理是基于安培定律和法拉第磁光效应,其基本组成结构如图 1 所示。整个结构根据功能可分为光学传感和信号处理电路两部分。

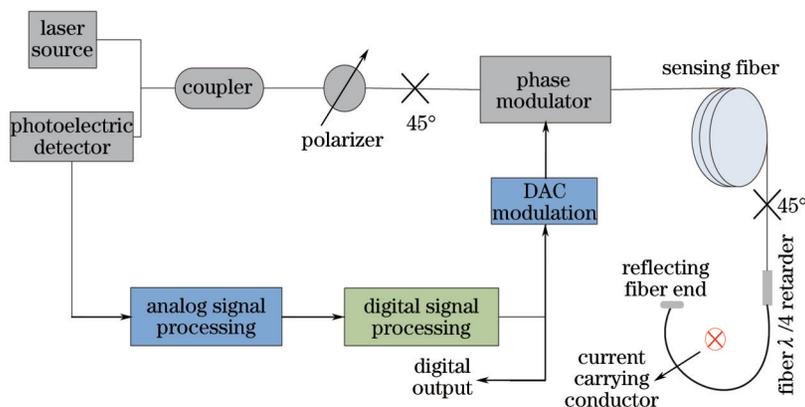


图 1 FOCT 系统基本结构

Fig.1 Basic structure of FOCT system

光学传感部分采用 Sagnac 干涉式结构以提高检测的灵敏度和稳定性。该结构通过检测模式正交的两束线偏振光之间的相位差来得到待测电流的大小,其具体原理可以见参考文献[7]。

信号处理部分主要分为模拟信号调理部分和数字信号处理部分,具体结构如图 2 所示,虚线框内是数字信号处理部分,框外是模拟信号调理部分。模拟信号调理主要完成光电转换信号的隔直放大、相干解调和采样;数字信号处理负责提供调制解调信号、采样信号滤波和阶梯波反馈算法(主要包括图 2 中的加法器和累加器 A、B 单元)。

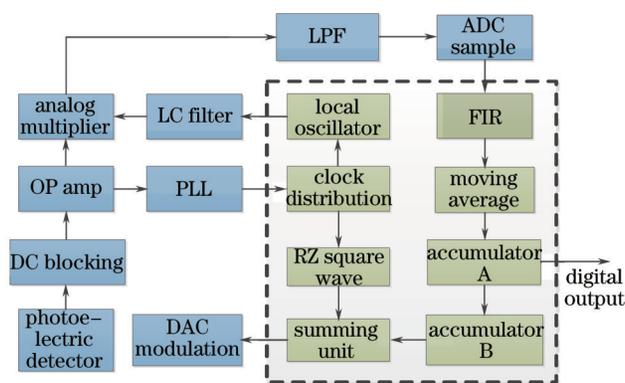


图 2 信号处理框图

Fig.2 Signal processing block diagram

3 信号处理

3.1 调制

光信号在整个 Sagnac 系统传输转换过程中,总共经历了两束圆偏光的两次法拉第相移,在起偏器处发生干涉后,光信号总的相移为 4 倍的法拉第相移,即

$$\varphi_f = 4NVI(t), \quad (1)$$

式中 N 为传感光纤匝数, V 为维德尔常数, $I(t)$ 为导线中的电流, 是随时间变化的函数。

光电探测器转换输出信号表达式为:

$$f(t) = A(1 + \cos \varphi_j), \quad (2)$$

式中 A 为输出电信号幅度, 与光源输出光强、光电转换效率以及光路损耗有关^[8]。

由(2)式可知, 余弦函数在零点处斜率为 0, 系统对小电流分辨率低。为了获得较高灵敏度, 可以通过相位调制器施加 $\phi = \pm\pi/2$ 相位偏置, 使余弦信号转化为正弦信号。由于正弦信号在零点附近斜率最大, 因此灵敏度在零点附近最好。另外, 通过调制, 信号频率调制到高频上, 避开噪声较强的低频段, 能够减少低频噪声的影响^[9]。

FOCT 系统的调制信号普遍采用非归零方波信号。调制信号如果是非归零方波, 在高低电压跃变处, 探测器输出尖峰信号, 如图 3(a) 所示; 为了延展尖峰信号, 调制信号采用归零方波^[6]。探测器输出一个频率两倍于调制信号的方波信号, 如图 3(b) 所示。

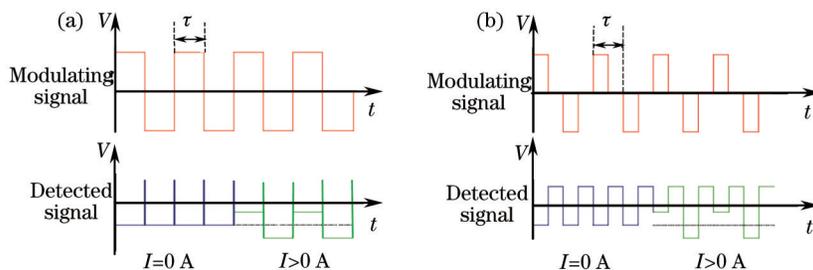


图 3 调制信号与探测信号。(a) 非归零方波调制; (b) 归零方波调制

Fig.3 Modulating signal and detected signal. (a) Non-return-to-zero square wave modulation; (b) return-to-zero square wave modulation

调制信号频率由光信号在光路中的渡越时间 τ (光束两次经历相位调制的时间间隔) 定。 $\tau = 2nL/c$, n 为光纤折射率, L 为延迟光缆长度, c 为光速。系统调制频率 $f = 1/2\tau$, 又称为系统特征频率。探测信号频率为 $2f$ 。

由于光信号在延迟光缆中的光程差受到延迟线长度和环境温度(影响光纤折射率)的影响, τ 可能发生微小改变从而影响系统频率发生变化。为了抑制系统频率的变化造成的系统误差, 信号处理方案中引入了锁相环跟踪整个系统的频率变化。

调制信号为归零方波, 对应非归零调制电压位置的探测器输出信号为

$$f(t) = \begin{cases} A(1 - \sin \varphi_j), & \phi = +\pi/2 \\ A(1 + \sin \varphi_j), & \phi = -\pi/2 \end{cases} \quad (3)$$

忽略掉无关的信号分量, 可以认为有效信号 $\sin \varphi_j$ 调制于频率为 f 的方波信号上, 表达式可以写为:

$$S(t) = \sin \varphi_j \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} C_n \frac{\sin(2\pi n f t)}{n}, \quad (4)$$

式中 C_n 为方波信号傅里叶展开式的系数。

3.2 解 调

光电探测器的输出既有微弱的有用信号(电流信息)也有主要来源于光源和光电器件的噪声信号。由于信号特征的变化是有规律且可估计的, 而噪声干扰是随机的, 因此可以采用相干解调方法提取噪声环境下的微弱信号。相干解调是指在实际输出信号频率已知的情况下, 通过人为地产生一个与实际信号同频同相的本振信号, 然后将该信号与混有噪声的有用信号相乘并经过低通滤波(LPF)获取有用信号。

系统调制频率为 f , 探测信号频率为 $2f$, 由(4)式可知, 电流信号被调制到频率 f 的方波上。根据相干解调思想, 为了提取出探测信号中蕴含的电流信号, 可以采用一个与被调制电流信号频率、相位相同的本振信号 f 进行同步解调。如图 2 所示, 本振信号为频率为 f 的正弦波信号, 其表达式为

$$d(t) = \frac{E}{2} \sin(2\pi f t), \quad (5)$$

式中 E 为本振信号的峰峰幅度值。

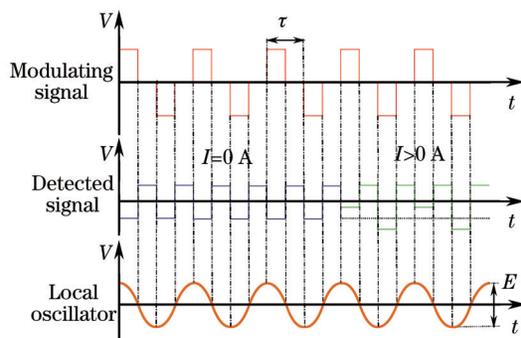


图 4 相干解调

Fig.4 Coherent demodulation

假设探测信号中混杂噪声信号为高斯白噪声 $n(t)$, 探测信号可以表示为 $S(t) + n(t)$, 与解调信号相乘并经过低通滤波可表示为

$$F_{LPF}\{[S(t) + n(t)]d(t)\} = F_{LPF}\left[\frac{E \cdot C_1}{2} \sin^2(2\pi f t) \sin \varphi_f\right] = \frac{E \cdot C_1}{4} \sin \varphi_f \approx \frac{E C_1}{4} \varphi_f. \quad (6)$$

由(6)式可知, 相干解调能从噪声中正确解调出有用信息并将其放大, 放大比例与本振解调信号幅度成正比, 因此相干解调能有效提高系统信噪比。

另外, 由于 $\sin \varphi_f \approx \varphi_f$ 只在小信号条件下成立, 因此为了提高系统测量范围、减小非线性误差, 需要做进一步的闭环反馈。

3.3 闭环反馈

数字信号处理部分对采样信号进行滤波处理并产生阶梯波形成系统闭环反馈。

闭环反馈是通过相位调制器引入一个与 4 倍法拉第相移大小相等、方向相反的反馈补偿相移 φ_c , 使得(3)式转化为:

$$f(t) = \begin{cases} A [1 - \sin(\varphi_f + \varphi_c)], & \phi = +\pi/2 \\ A [1 + \sin(\varphi_f + \varphi_c)], & \phi = -\pi/2 \end{cases}, \quad (7)$$

令 $\varphi_c = -\varphi_f = -4NVI(t)$, 系统则工作在灵敏度最好的零相位附近区域, 减小了非线性误差, 且扩大了系统的测量范围^[5]。

如图 2 所示, 阶梯波闭环反馈部分主要包含有限脉冲响应(FIR)滤波、滑动平均滤波和阶梯波闭环反馈三部分。FIR 滤波器通过对采样信号做低通滤波, 减小采样信号的毛刺噪声以提高信噪比。该 FIR 滤波器带宽设置不可过窄, 否则会造成采样电流信号相位发生变化引起系统振荡。滑动平均滤波是指在某一微小时间段内对采样信号进行多次采样取其平均值, 相当于低通滤波, 可以再次降低采样信号的毛刺噪声, 提高系统精度。平均点数越多, 滤波效果越好, 但同时也会降低系统数据输出速率。获取某一时刻的电流信号平均采样值后, 以该值为基准做第一次累加获取阶梯波台阶值, 再做第二次累加生成阶梯波。阶梯波与调制信号叠加驱动数模转换器(DAC)调制器形成闭环反馈, 并将阶梯波的台阶作为系统最终输出, 反映原始电流信号。

4 实 验

为了对此方案进行验证, 研制了一个原理样机进行相关测试。

4.1 电流通断测试

室温条件下, 分别对系统进行通断电流测试, 通过 PC 端采集数据并显示波形。如图 5 所示, FOCT 系统在未通入电流情况下的系统闭环输出, 噪声幅度为 3; 图 5(b)显示 FOCT 系统在通入 700 A 电流时的系统闭环输出, 为 50 Hz 正弦信号, 峰峰幅值为 1653。

结果表明, 该系统在无电流通入时, 系统噪声极小, 具有较高的噪声抵抗能力。

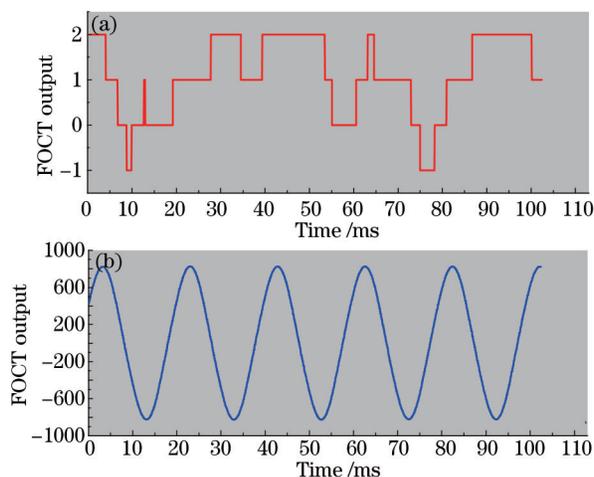


图5 FOCT系统通断电流测试。(a) 0 A; (b) 700 A

Fig.5 On-off current test of FOCT system. (a) 0 A; (b) 700 A

4.2 线性度实验

室温下,做10次闭环测试。依次在导线中通入100 A,200 A,⋯,1000 A的电流,记录系统闭环输出峰峰值,并绘制散点图进行拟合。

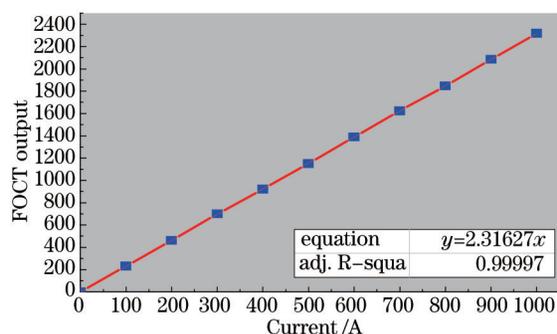


图6 FOCT系统线性度测试

Fig.6 Linearity test of FOCT system

由图6可以看出,FOCT系统在1000 A电流范围内线性度良好,回归系数 $R^2=0.99997$ 。实验结果与原理分析描述的闭环检测可减小系统测量非线性误差相符。

4.3 比差实验

室温条件下,分别对系统输入额定电流1000A的5%、20%、100%、120%,测试FOCT系统的比差并与IEC 60044-8:2002标准0.2级比对。

表1 额定电流(1000 A)下比差实验

Table 1 Ratio error experiment under rated current (1000 A)

Rated current percentage	0.2 level standard ratio error	Prototype ratio error
5%	$\pm 0.75\%$ (1.5%)	0.5433%
20%	$\pm 0.35\%$ (0.7%)	0.2373%
100%	$\pm 0.2\%$ (0.4%)	0.2011%
120%	$\pm 0.2\%$ (0.4%)	0.1858%

由表1可以看出,室温条件下采用该调制解调方案的FOCT系统在额定电流1000 A条件下可以达到IEC 60044-8:2002标准0.2级要求。

5 结 论

介绍了一种采用新型调制解调方案的全光纤电流互感器。光路部分采用反射式Sagnac结构,电路部分

采用归零方波调制,以正弦波信号作为本振信号实现模拟相干解调,并通过锁相环跟踪抑制系统频率因外界环境影响造成的波动,数字信号处理部分实现FIR滤波、滑动平均滤波以及阶梯波闭环反馈。样机实验结果表明,该信号处理方案能够实现大电流的闭环检测,在室温条件下、额定电流1000 A时可达到IEC 60044-8:2002标准0.2级,具有实际应用价值。

参 考 文 献

- 1 Byoungho Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, 9(2): 57-59.
- 2 K Bohnert, P Gabus, J Kostovic, *et al.*. Optical fiber sensors for the electric power industry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2005, 43(3-5): 511-526.
- 3 Li Chuansheng, Zhang Chunxi, Wang Xi Xiao, *et al.*. Key techniques of reflective Sagnac interferometer-type fiber optic current transformers[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(12): 104-108.
李传生,张春熹,王夏霄,等.反射式Sagnac型光纤电流互感器的关键技术[J].*电力系统自动化*, 2013, 37(12): 104-108.
- 4 Huang Jianhua, Wang Jia. Key technology of optical current transformer[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2009, 29(2): 94-97.
黄建华,王佳.光学电流互感器的关键技术[J].*电力自动化设备*, 2009, 29(12): 94-97.
- 5 Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xi Xiao, *et al.*. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(30): 42-46.
张朝阳,张春熹,王夏霄,等.数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J].*中国电机工程学报*, 2009, 29(30): 42-46.
- 6 Zhang Chaoyang, Zhang Chunxi, Wang Xi Xiao, *et al.*. Temperature compensation methods of $\lambda/4$ wave plate for fiber optic current sensor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2008, 23(12): 55-59.
张朝阳,张春熹,王夏霄,等.光纤电流互感器 $\lambda/4$ 波片温度误差补偿[J].*电工技术学报*, 2008, 23(12): 55-59.
- 7 K Bohnert, P Gabus, J Nehring, *et al.*. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(2): 267-276.
- 8 Wang Na, Wan Quan, Shao Xia, *et al.*. Research on the modeling and simulation techniques of fiber optic current transformer[J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 38(10): 44-49.
王娜,万全,邵霞,等.全光纤电流互感器的建模与仿真技术研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(10): 44-49.
- 9 Yuan Yuchang, Feng Lishuang, Wang Xi Xiao, *et al.*. Design of measurement system on all fiber optical current transducer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(5): 95-98.
袁玉厂,冯丽爽,王夏霄,等.全光纤电流互感器检测系统的设计[J].*光电工程*, 2006, 33(5): 95-98.

栏目编辑:韩峰