

基于开环检测系统的全光纤电流互感器研究

李建中, 李泽仁, 张登洪, 温伟峰, 田建华, 王荣波

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 商用化的全光纤电流互感器(FOCT)的误差一般要求小于 0.2%, 信号处理方法是决定该类传感器测量准确度的关键因素。论述了全光纤电流互感器的光路结构、工作原理、技术优势和干涉信号特征, 提出了一种基于数字开环的全光纤电流互感器检测系统以及实现方案, 论述了其工作原理和特点, 试验结果表明, 该检测方法提高了全光纤电流互感器的性能, 使其满足了 0.2 级测量用电子式电流互感器的准确度要求, 对解决全光纤电流互感器的信号处理、测量准确度和测量灵敏度等问题具有较大的参考价值。

关键词: 全光纤电流互感器; 开环检测; 方波调制; 法拉第效应

中图分类号: TP212.14; TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1648-06

Open-loop detection of fiber optic current transducer

Li Jianzhong, Li Zeren, Zhang Denghong, Weng Weifeng, Tian Jianhua, Wang Rongbo

(Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The error of commercial fiber optic current transducer (FOCT) must be less than 0.2%, the signal processing is a key factor for high-accuracy current sensing. The topology, operational principle, technical advantage, signal characteristics of fiber optic current transducer was introduced. A new scheme based on digital open-loop detection for the measurement system of the FOCT was presented, the working principles and features of this design were analyzed. The experimental results show that the FOCT's measurement precision is improved by using the improved measurement system, and the FOCT can satisfy the accuracy requirements of the 0.2 class measuring electronic transducer, meeting the requirements of digital substation, so it is valuable for solving a great deal of problems, such as the signal processing, measurement accuracy, measurement sensitivity, et al.

Key words: FOCT; open-loop detection; square wave modulation; Faraday effect

收稿日期: 2013-09-11; 修订日期: 2013-10-15

基金项目: 中物院科学技术发展基金(2009B0201013)

作者简介: 李建中(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事光电测试及光纤传感技术研究。Email: jianzhong265@163.com

通讯作者: 李泽仁(1961-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光电测试技术研究。Email: zeren109@21.cn

0 引言

电流互感器是电网中最普遍、最基本的高压设备之一,它肩负着两个重要的使命:为电能的计量提供参数,为继电保护提供动作的依据。随着电网的发展,目前广泛使用的传统电磁式电流互感器暴露出其致命缺陷,例如高电压等级时绝缘极为困难、输出为模拟量、磁饱和等,满足不了我国智能电网发展战略的新要求,从而急需开发出一种新型的电流测量装置。国内外最终把目光集中在数字化的电子式电流互感器上,其中全光纤电流互感器 (fiber optic current transducer, FOCT)是技术最先进的类型,代表目前电流互感器的发展方向^[1-3]。

在借鉴光纤陀螺技术^[4-6]的基础上,国内外有众多单位对 FOCT 展开研究,但由于难度较大,绝大多数仍停留在理论研究或实验尝试阶段,仅有极个别单位研制成功。国外 ABB 和 NXTphase 公司的 FOCT 的测量准确度达 0.1%, 额定电流达 4 000 A。国内北京航空航天大学 and 燕山大学也对此进行了研究^[7-9],实验室内测量准确度可达 0.2%, 额定电流达 500 A,但离实用化还有很大距离。

FOCT 的信号检测方案是制约其实现满足要求的技术指标并达到实用化程度的关键因素之一,适当的检测方案和数据处理方法可以消除干扰因素对传感系统的影响,准确的反映出被测电流的大小。

文中提出了 FOCT 的一种开环检测方法,并阐述了该方法的理论基础和实现方案,解决了 FOCT 无法研制成功并达到高精度测量的瓶颈。实验表明,采用该检测方案搭建 FOCT 样机后,其测量准确度达到了 0.2 级。

1 系统结构

基于反射式 Sagnac 干涉仪方案的 FOCT 的结构如图 1 所示,光源输出光经过耦合器后,先由光纤起偏器起偏,形成一束线偏振光,再被 45°熔接点等分为两束正交的线偏振光,并分别沿保偏光纤的快轴和慢轴传输。依照信号处理单元给出的调制信号,相位调制器对两束正交线偏振光进行同步调制。随后,被调制过的两束光经由光纤延迟线传输至传感单元,经过 λ/4 波片后,分别转变为左旋和右旋的圆偏

振光,并进入传感光纤。在待测电流产生的磁场的作用下,由于法拉第效应,传感光纤中的这两束圆偏振光会以不同的速度传输,产生相位差。在由传感光纤端面的反射镜反射后,两束圆偏振光的偏振模式互换,并反方向穿过传感光纤,从而再次和磁场相互作用,使 Faraday 效应产生的相位差加倍。两束圆偏振光通过 λ/4 波片后,恢复为两个正交的线偏振光,但交换了偏振轴向,并在起偏器处发生干涉。携带相位信息的干涉光信号经由耦合器进入探测器,转化电信号输出,再在后端进行信号处理,最终得到待测电流值。

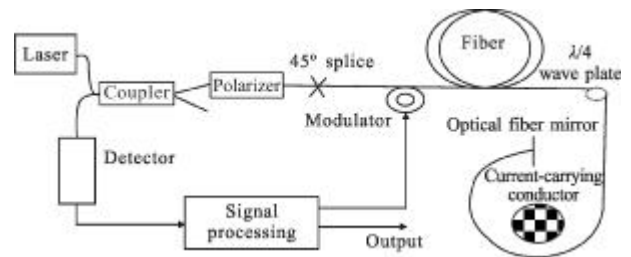


图 1 反射式 Sagnac 型全光纤电流互感器的原理图

Fig.1 Scheme of the reflecting Sagnac FOCT

采用该方案的 FOCT 的灵敏度增大了一倍,此外,由于发生干涉的两束光,在整个光路的传输过程中,分别都通过了传输光纤的 X 轴和 Y 轴与传感光纤的左旋和右旋模式,只在时间上略有差别,因此返回探测器的光只携带了由法拉第效应产生的非互易相位差,而互易性的效应,如温度和振动对信号的影响则可以相互抵销,从而增强了对环境变化的抗干扰能力。

全光纤电流互感器最终输出的干涉信号与法拉第相位差的关系如下:

$$I_o(t) = \frac{K \cdot L \cdot P_o}{2} [1 + \cos(\Delta\phi)] = A [1 + \cos(\Delta\phi)] \quad (1)$$

式中:K 为探测器的响应度;P_o 为光源发出的光强;L 为整个光路的损耗;A 为与 K、L 和 P_o 有关的变量;Δφ=4VN 为 Faraday 效应产生的相位差,其中 V 为传感光纤的 Verdet 常数,N 为传感光纤圈环绕载流母线的整数匝数,I 为载流母线中的待测电流。

2 开环检测方法

开环检测方案是通过方波调制在光路中引入一个恒定的非互易相位差 π/2,使公式(1)中 Δφ=Δφ+π/2,就可以将光强与相位之间的余弦关系变成正弦关系,如图 2 所示。由正弦函数的性质可知,在零点

的斜率最大,且在一定范围内输出和输入呈线性关系,即在零点附近系统的灵敏度最高,可以对微小的法拉第相移 $\Delta\phi$ (趋近于零)进行更好的探测,而且可以分辨出 $\Delta\phi$ 的正负。

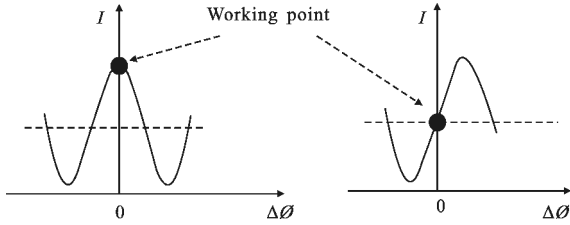


图 2 原始干涉信号和加入 $\pi/2$ 偏置相位的干涉信号
Fig.2 Output signal of interferometer, original and $\pi/2$ offset

在检测电路中产生方波电压信号 $V(t)$,驱动相位调制器,同时令调制方波信号的周期为光在光纤光路中的传输时间 τ 的 2 倍,占空比为 50%,幅值为半波电压 V_π 的 1/2,即调制信号在正半周产生的相移为 $\pi/2$,在负半周不产生调制相移。

光束在光路中传输完一整圈(所用时间为 τ),进入探测器前,整个过程引入的总相位差为 $\Delta\phi(t)=k_p[V(t)-V(t-\tau)]$ (k_p 为调制器的相位调制常数)。对于占空比为 50%、周期为 2τ 的方波调制,经调制器引入的总相位差恰好为两个方波信号错开半个周期后相减的差值 $\pm\pi/2$,即整个过程产生了 $\pm\pi/2$ 的非互易相位差(调制器的相位调制常数取典型值 1 rad/V),如图 3 所示。

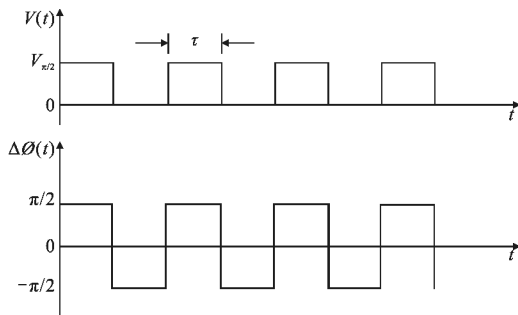


图 3 方波调制原理图
Fig.3 Principles of square wave modulation

令探测器探测到的光强信号为 $I_0(t)$,则在方波的正半周,探测器探测到的光强信号为:

$$I_{01}(t)=A[1+\cos(\Delta\phi+\pi/2)]=A[1-\sin(\Delta\phi)] \quad (2)$$

在方波的负半周,探测器探测到的光强信号为:

$$I_{02}(t)=A[1+\cos(\Delta\phi-\pi/2)]=A[1+\sin(\Delta\phi)] \quad (3)$$

由公式(2)和(3)可知,当待测电流为零时,法拉第相位差 $\Delta\phi=0$,干涉输出 $I_0(t)$ 为直流量,当待测电流不为零时,由于增加了幅值为 $\pm\pi/2$ 的相位调制,干涉输出变为叠加在直流 A 上的幅值为 $A\sin(\Delta\phi_s)$ 的方波信号,即 $I_0(t)$ 会在 A 附近上下波动,波动幅值为 $A\sin(\Delta\phi_s)$,该幅值大小反映了法拉第相位差 $\Delta\phi$ 的大小,波动的频率为 $1/2\tau$,即方波调制频率。由此可理解为电流导致的磁场改变了方波的幅度,通过对方波幅值的检测就可以得到电流值。

把前一环节得到的干涉方波信号的前、后半周期相减,这样,直流量抵消,交流量加倍,可得解调输出为:

$$I_0(t)=I_{01}(t)-I_{02}(t)=-2A\sin(\Delta\phi)\approx -2A\cdot\Delta\phi \quad (4)$$

由公式(4)可以看出,解调后的输出信号 $\Delta I_0(t)$ 与相移之间不再是余弦关系,而变成正弦关系。此外,只要检测出方波在正、负半周输出的干涉光强信号的差值 $\Delta I_0(t)$,就可以得到法拉第相移 $\Delta\phi$ 的值,而且一般 $\Delta\phi$ 较小,接近于零,因此可认为解调输出 $\Delta I_0(t)$ 与 $\Delta\phi$ 直接成线性关系。

解调是在对公式(2)和公式(3)描述的连续信号采样和 A/D 转换后通过数字电路实现的,对解调后的值再做简单处理就可得到法拉第相移 $\Delta\phi$ 的值,再根据 $\Delta\phi=4VNI$ 直接计算出待测电流的值 I 。

因此证明,通过加入方波调制信号可以消除干涉仪输出光强信号与电流产生的相移之间成余弦关系的影响,大大提高了系统的灵敏度,便于从微弱的干涉信号中提取出相位差信息。此外,通过观察解调输出值的正负,还可判断相移的正负,同时通过高频调制,将干涉信号从噪声极大的基带平移到高频,便于进行相关的滤波处理,以提高信号的信噪比。

3 开环检测方法的电路实现

根据所述的开环检测方案,可设计如图 4 所述的电路。

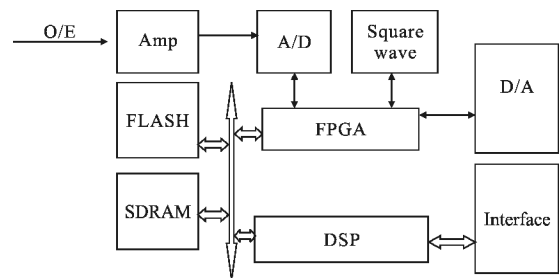


图 4 开环检测方案的电路框图
Fig.4 Schematic diagram of open-loop detection

系统功能描述: 电路上电复位后, DSP 和 FPGA 程序加载并对外围 A/D、D/A 及其他程控电路及接口初始化; FPGA 在 DSP 的控制下产生调制方波, 数据采集和模数转换同步在方波的正半周和负半周, A/D 采集到的数据通过 SDRAM 或外部 FLASH 存储器进行缓存后, 由 DSP 读取进行下一步处理, DSP 对数据进行处理后用于 D/A 输出所需阶梯波和或控制 FPGA 进行数字输出。

根据所述方案, 完成了开环电路的制作和调试, 其外形如图 5 所示, 可同时输出解调电流信号的数字量和模拟量, 目前测试结果及实际应用情况良好。该电路通过串口或网口与计算机连接, 利用所编写的测试软件, 对样机发送控制命令, 并接收及显示数据(数字量), 此外, 还可以通过 SMA 接口, 将表征待测电流的模拟信号接入示波器进行显示。

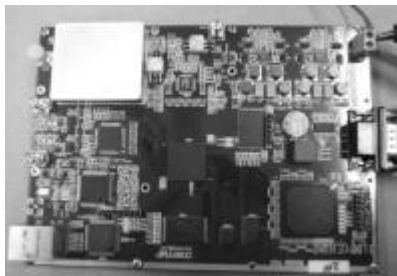


图 5 开环检测电路

Fig.5 Circuit of open-loop detection

4 实验结果

利用该开环电路研制了 FOCT 样机, 如图 6 所示, 其中主机部分(右侧机箱)选择的元器件为 SLED 光源、PIN-FET 光探测器、直波导光学相位调制器和



图 6 研制的 FOCT 样机

Fig.6 Outside view of fiber optical current transducer

全光纤起偏器, 光纤传感部分(左侧圆环)则由全光纤 1/4 波片(自制)、传感光纤(低双折射光纤, 4 圈, 总长度 3~5 m)、光纤端面反射镜(定制)、外部保护装置

(由绝缘材料制成)等模块组成。

采用大电流发生器(交流, 50Hz, 有效值 0~5000 A)作为测试电流源, 并以 0.01 级(误差低于 0.01%)的标准电流互感器(经过资质单位的检定)为基准, 按照国标要求, 搭建了一套准确度校检系统^[10], 以之对 FOCT 样机进行测试并校检其测量准确度。

加载电流后, 样机输出的干涉信号经过光电探测后接入示波器, 其波形如图 7 所示, 可见, 如前所述, 干涉输出为一个方波信号(方波边沿的大幅度信号为全光纤电流互感器固有的尖刺噪声), 即 $I_0(t)$ 会在直流 A 附近上下波动, 波动幅值为 $A\sin(\Delta\phi_s)$, 波动的频率为 $1/2\tau$, 即方波调制频率。

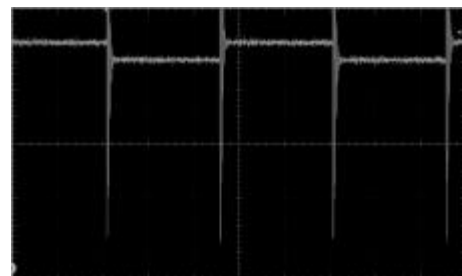


图 7 开环电路检测到的干涉信号

Fig.7 Output signal of FOCT

测试软件及解调出来的电流信号如图 8 所示, 可见样机测试得到的电流信号具有较好的波形质量。测试软件获得的电流数据可读出并存储到 Excel 文档中, 以选择对应的测试点进行测试并计算误差, 样机额定一次电流值 I_p 拟确定为 4 000 A, 根据国标 0.2 级准确度的要求, 在 I_p 的 5%~120% 范围内, 实测误差如表 1 所示, 其中标准电流值 Real current i 标指 0.01 级标准电流互感器对待测电流进行检测得

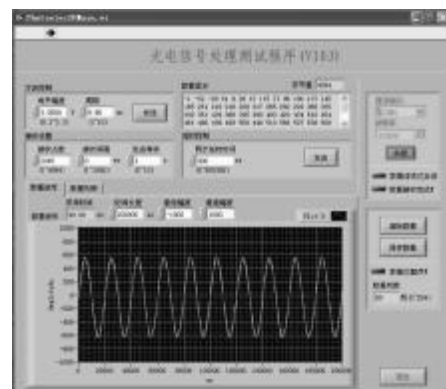


图 8 测试软件界面及解调出来的交流电流

Fig.8 Processing software and FOCT's output with AC current

到的电流值(有效值,与真实值之间的误差低于 0.01%),单位为 A;样机解调信号的数字输出 Digital outputs 指样机对待测电流进行解调后输出的数字量;样机解调出的电流值 Demodulated current $i_{解}$ 指样机解调信号的数字输出乘以一个固定变比得到的数值,表征解调输出的电流值(有效值),单位为 A;电流误差为 $i_{解}$ 和 $i_{标}$ 之间的误差。

表 1 测试点及各点的误差

Tab.1 Experimental result of the sensor

Real current/A	Digital outputs	Demodulated current/A	Error/%
195.325 6	291.920 1	195.936 8	0.31
303.427 5	451.112 8	302.786 9	-0.21
402.125 8	597.796 6	401.241 1	-0.22
602.548 9	899.135 9	603.5	0.16
803.712 5	1 199.940 9	805.400 3	0.21
1 001.576 8	1 489.979 7	1 000.074 4	-0.15
1 250.569 8	1 865.607 1	1 252.195 5	0.13
1 503.123 6	2 241.696 5	1 504.626 7	0.10
1 751.549 1	2 605.403 2	1 748.746 6	-0.16
2 001.459 3	2 982.806 5	2 002.059 7	0.03
2 252.761 7	3 358.333 4	2 254.113 4	0.06
2 504.364 4	3 734.532 6	2 506.618 3	0.09
2 750.231 3	4 094.615 8	2 748.306 1	-0.07
3 000.791 6	4 469.891 8	3 000.191 4	-0.02
3 251.322 2	4 841.621 7	3 249.696 5	-0.05
3 500.424 3	5 220.388 4	3 503.924 7	0.10
3 749.107 9	5 589.030 7	3 751.357 4	0.06
4 001.368 9	5 965.091 9	4 003.769 7	0.06
4 250.349 7	6 329.297 5	4 248.224 5	-0.05
4 500.126 8	6 702.587 6	4 498.776 8	-0.03
4 803.654 9	7 162.541 4	4 807.497 8	0.08

根据表 1 的数据,可知在采用开环检测方法及其电路提高了传感信号的检测性能后,再加上优化自制全光纤 1/4 波片的性能(更好的转换传输线偏振光和传感圆偏振光)、优化光纤传感部分的长度及缠绕圈数(统筹法拉第效应和双折射效应)、螺旋缠绕及封装保护光纤传感部分(降低线性双折射和外界环境的影响)、精密控制光路的偏振特性(使信号的偏振态精确的按照设计进行转变和传输)等措施后,FOCT 样机实现了额定一次电流值 4 000 A 的指标。此外,由表 1 还可得到测量误差曲线,如图 9 所示,可直观地看出在全量程范围内的实测误差均满足

0.2 级测量准确度的要求。

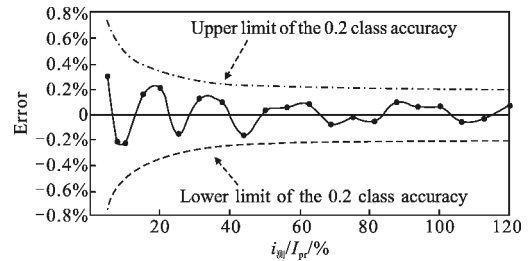


图 9 全量程范围的实测误差曲线

Fig.9 Curve of FOCT's scale factor error

5 结论

文中针对 FOCT 光路十分微弱的信号,提出了基于方波调制解调的开环检测方法,详细阐述了其理论基础,并给出了一种采用 FPGA+DSP 的实现方案,为研制满足应用要求的 FOCT 样机奠定了基础。

采用文中所述的方法研制了 FOCT 样机,经测试,样机实现了额定一次电流 4 000 A、准确度 0.2 级的指标。

参考文献:

- [1] Bohnert K, Gabus P, Brandle H. Fiber-optic dc current sensor for the electro-winning industry [C]//17th Int Conference on Optical Fiber Sensors, 2005, 5855: 210-213.
- [2] Bohnert K, Gabus P, Nehring J, et al. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 267-276.
- [3] Wang Jingfei, Liang Jingwei, Dong Qianmin, et al. Study of sensing coil errors in in-line Sagnac interferometer current transducer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48: 102303-1-6. (in Chinese)
王景飞, 梁京伟, 董前民, 等. 反射式 Sagnac 干涉光纤电流互感器的传感头误差研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48: 102303-1-6.
- [4] Shu Jiantao, Li Xuyou, Wu Lei, et al. Vibration error restrain technology for high-precision fiber optic gyroscope [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2201-2206. (in Chinese)
舒建涛, 李绪友, 吴磊, 等. 高精度光纤陀螺振动误差抑制技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2201-2206.
- [5] Li Min, Song Ningfang, Zhang Chunxi, et al. Dynamic characteristics test of fiber optic gyroscope based on cross-correlation identification[J]. Infrared and Laser Engineering,

- 2011, 40(4): 723-727. (in Chinese)
- 李敏, 宋凝芳, 张春熹, 等. 采用相关辨识的光纤陀螺动态特性测试方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 723-727.
- [6] Wang Weiqiang, Liu Jun, Lu Jun. Technology of time division multiplexing closed-loop control for three-axis fiber optic gyroscopes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(11): 2195-2200. (in Chinese)
- 王维强, 刘军, 鲁军. 三轴光纤陀螺的分时复用闭环控制技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2195-2200.
- [7] Li Hui, Zhang Chunxi, Li Lijing, et al. Design of a robust controller for fiber optic current transformer system[J]. *High Voltage Apparatus*, 2009, 45(6): 28-30. (in Chinese)
- 李慧, 张春熹, 李立京, 等. 光纤电流互感器系统的鲁棒控制器设计[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 28-30.
- [8] Li Hui, Zhang Chunxi, Zhang Xi, et al. Noise suppression of fiber optic current transformer system based on robust control [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(1): 87-90. (in Chinese)
- 李慧, 张春熹, 张曦, 等. 基于鲁棒控制的光纤电流互感器的噪声抑制[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 87-90.
- [9] Lou Fengwei, Zheng Shengxuan, Wang Haiming. A new type optical fiber current transformer[J]. *Optical Technique*, 2005, 32(5): 782-784. (in Chinese)
- 娄凤伟, 郑绳萱, 王海明. 一种新型光纤电流互感器[J]. 光学技术, 2005, 32(5): 782-784.
- [10] Yu Wenbin, Zhang Guoqing, Guo Zhizhong. The research for calibration technology of electronic current transformers [J]. *High Voltage Engineering*, 2004, 30(7): 20-21. (in Chinese)
- 于文斌, 张国庆, 郭志忠. 电子式电流互感器校验技术的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(7): 20-21.