

文章编号 : 0253-2239(2002)03-0351-04

一种光纤干涉式高压电流传感器的设计

刘 彬 张君正 张秋婵 谢 平

(燕山大学电气工程学院仪器科学与工程系, 秦皇岛 066004)

摘要: 设计了一种结构简单的光纤干涉式电流传感器, 给出了其数学模型, 并用实验验证了该系统的可行性。与其它光纤电流传感器相比, 该传感器高压侧无需电源, 特殊的光路使得它的测量范围大大增加, 并且对缓变的干扰信号(如温度)不敏感。

关键词: 电流传感器; 光纤干涉仪; 罗戈夫斯基线图

中图分类号: TM452⁺94; TN253 文献标识码: A

1 引 言

目前电力系统中, 对于高压电流的测量大都采用以电磁感应原理为基础的电流互感器。这种传统的测量技术, 随着电网电压的不断升高, 出现了许多不足: 动态范围小; 有故障电流时出现磁饱和、铁磁共振效应、磁滞效应、电磁干扰现象严重; 二次侧开路出现高电压, 体积大、重量重、价格昂贵、运输安装难度大^[1]。针对这些问题人们作了多方面的努力, 而当前最流行且最有应用前景的就是光学电流互感器的研究。就国内外对光学电流互感器的研究现状来看, 按其传感头的结构大致分为三种: 一是以磁光玻璃作为传感头的光学电流互感器; 二是以光纤作为传感头的光学电流互感器; 三是以电流互感器作为传感头的混合型光学电流互感器^[2~4]。前两种大都是基于法拉第磁光效应的光学电流互感器。以磁光玻璃作为传感头的光学电流互感器和混合型光学电流互感器是研究最广泛的两种。以光纤作为传感头的光学电流互感器虽然结构简单, 成本低, 但其实用化比较困难, 目前对它的报道还不多见。人们在基于法拉第磁光效应的光学电流互感器研究方面已取得了较大的进展, 美国 ABB Power T&D 公司在这方面走在世界前列, 其研究成果已部分产品化, 我国华中科技大学、清华大学、哈尔滨工业大学在这方面的研究也取得了很大进展, 但投入实用的还很少见^[5,6]。

磁光式光学电流互感器实用化的系统尚不多见的根本原因在于光纤的线性双折射效应和与光纤的

线性双折射效应具有相似作用的反射相移对测量结果有影响: 它们使系统灵敏度、可靠性和稳定性降低, 使测量结果与被测电流在光路内的位置有关、使系统抵抗外部电磁场影响的能力大大降低等。因此如何消除和减小系统的线性双折射效应已成为磁光式电流传感器研究中的关键问题。研究表明, 影响光纤线性双折射效应的因素相当复杂。而外在环境温度、压力、振动等的影响尤为严重, 也更为棘手, 这使得建立起完善的光纤线性双折射效应的表达式, 从而克服这种影响变得非常困难。

混合式光纤电流传感器大都采用有源型结构。在高压侧, 电流通过互感器转换为电压量, 再通过电压/频率变换器变成频率信号传给发光二极管, 变成光信号, 由光纤传给低压侧进行检测。由于高压侧电子线路需要电源驱动, 目前一般采用的有太阳能电池供电、母线电流供电、蓄电池供电等。电池电量不足时, 输出光功率会减小, 影响测量精度; 而导线电流供电, 在电流不稳的情况下很难保证高压侧电子器件的正常工作。另外, 混合式结构的高压侧结构也较为复杂。

针对光纤电流互感器采用传统方案遇到的棘手问题, 本文提出另外一种光纤干涉式测量原理。这种结构介于混合型与全光纤型之间, 在把高压电流变为电压量时也采用了混合式的电流互感器结构, 但是把这一电压加在压电陶瓷, 对缠绕在其上的光纤进行相位调制, 却类似于全光纤型。这一结构有取长补短之功效, 它避免了磁光式电流互感器受温度影响的问题, 混合式电流互感器在高压侧供电难的问题, 以及全光纤型电流互感器实现困难等。

2 光纤干涉式电流传感器的设计

2.1 系统结构图

这种光纤电流传感器的原理图如图 1 所示。

系统用罗戈夫斯基 (Rogowski) 线圈把高压端的电流线性地转化为电压量,采用压电陶瓷的逆压电

效应把电压量转化为光纤长度的变化量,即光的相位变化量。在光路中光的相位变化量被转化为光强量,光强信号通过光探测器、前置放大电路、反正弦变换电路、积分电路最后输出与被测电流成正比的电压信号。

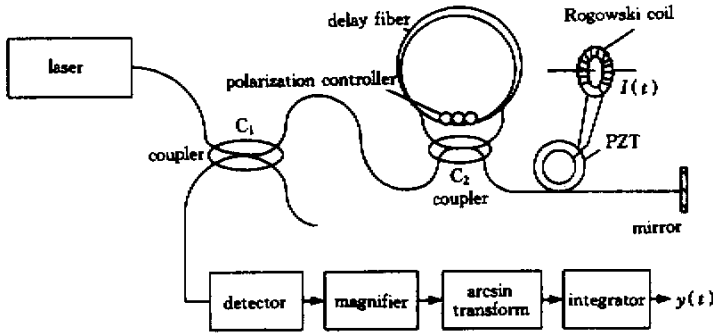


Fig. 1 Structure drawing of optical fiber current sensor

2.2 传感头原理分析

采用罗戈夫斯基线圈感应高压电流。根据电磁场理论,穿心母线或输电线与罗戈夫斯基线圈间的互感为

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{2\pi} N h \ln \frac{R}{r}, \quad (1)$$

式中 μ_0 为空气的导磁率, N 为线圈的匝数, h 、 R 、 r 定义如图 2 所示。

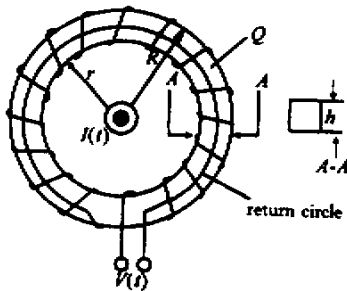


Fig. 2 Structure drawing of Rogowski coil

当母线电流 $I(t)$ 为正弦波时,罗戈夫斯基线圈的输出电势为

$$V(t) = M_{12} \frac{dI}{dt}. \quad (2)$$

上式表明,罗戈夫斯基线圈的输出电压与母线电流呈线性关系。把此电压加在压电陶瓷上,利用压电陶瓷的逆压电效应可将电压转化为圆筒压电陶瓷的径向形变量,从而使缠绕在其上的光纤发生轴向应变,其表达式为

$$\Delta L/L = BV(t), \quad (3)$$

式中 $\Delta L/L$ 为绕在压电陶瓷上的光纤的应变, B 为一个与压电陶瓷性能、形状及光纤特性有关的常数。

此处需用弹性力学进行受力分析推导出 B 值^[7]。

2.3 光路工作原理分析

图 1 中,激光器发出的光到达耦合器 C_2 时分成两束,第一束光先经过光纤延迟线,而第二束光直接经压电陶瓷进行相位调制后到达光纤反射镜,被反射回来,此时再经过光延迟线,第一束光经光延迟线后从耦合器 C_2 出来经相位调制后再被反射回到 C_2 ,与这时候从光延迟线中出来的第二束光发生干涉。由于只有光程差在光源的相干长度之内的两束光才能产生干涉,因此在本光路结构中只能是同时从光源出发,分别走上第一束和第二束光的光路,再回到光耦合器的这两束光能发生干涉。图中偏振控制器用来控制两束光的相移,使得以不同方向经过它的光的相移为 $\pm \pi/4$,以实现两束光的正交干涉。我们分析这两束光在整个光路中的相位变化。设光从 C_1 到 C_2 所用的时间为 t_1 ,光在延迟线中花费的时间为 T ,从 C_2 到压电陶瓷以及旋光镜与压电陶瓷的距离很短,花费时间可以不计。因此,第一束光在通过整个光路后的相位变化为

$$\phi_1 = \omega \left(2t + T + \frac{\Delta L_{t+T}}{v} \right) - \frac{\pi}{4}, \quad (4)$$

式中 ω 为光波频率, ΔL_{t+T} 为 $t+T$ 时刻绕在压电陶瓷上的光纤长度的变化量, v 为光在光纤中的速度。第二束光通过整个光路后的相位变化为

$$\phi_2 = \omega \left(2t + T + \frac{\Delta L_t}{v} \right) + \frac{\pi}{4}, \quad (5)$$

式中 ΔL_t 为 t 时刻绕在压电陶瓷上的光纤长度的变化量。由于调制信号(由罗戈夫斯基线圈转换的电压量)是连续变化的正弦信号,因此

$$\Delta l_t \neq \Delta l_{t+T}, \quad (6)$$

于是, 这两路光的相位差为

$$\phi_2 - \phi_1 = \phi(t) - \phi(t+T) + \pi/2, \quad (7)$$

式中 $\phi(t)$ 和 $\phi(t+T)$ 分别为 t 时刻和 $t+T$ 时刻绕在压电陶瓷上的光纤长度变化引起的光相位变化。选定适当长度的光延迟线可使 T 很小, 那么

$$\left. \begin{aligned} \phi(t) - \phi(t+T) &= T \frac{d\phi(t)}{dt}, \\ \left| T \frac{d\phi(t)}{dt} \right| &\leq \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(8) 式可以用傅里叶变换进行证明⁸ [保证相位差信号 $\phi(t)$ 的功率谱的最高频率 $f_{\max} < 1/(8\pi T)$] 因此探测器探测到的光强中与被测信号有关的一项为

$$d(t) = k_1 \cos[\phi(t) - \phi(t+T) + \pi/2] = -k_1 \sin[\phi(t) - \phi(t+T)], \quad (9)$$

式中 k_1 为比例系数。

因为光纤长度变化与光相位变化满足⁹

$$\Delta\phi = \alpha\Delta L, \quad (10)$$

式中 $\alpha = \frac{nk_0(2-n^2P_{12})}{2}$, 其中 n 为光纤在未受应变状态下的折射率; k_0 为光在真空中的传播常数, P_{12} 为光纤的光弹系数。

综合(2)式、(3)式、(8)式、(9)式、(10)式, 我们可以得到 $d(t)$ 的详细表达式:

$$d(t) = -k_1 \sin\left[\alpha TLBM_{12} \frac{d^2 I(t)}{dt^2}\right]. \quad (11)$$

(11) 式再经过反正弦变换、积分电路后得到与被测电流成正比的电压信号

$$y(t) = KI(t), \quad (12)$$

式中 K 为系统常数, 其值的大小与系数 k_1 、 α 、 T 、 L 、 B 以及处理电路的各时间常数、比例系数有关。

下面我们分析一下这种光路结构与普通干涉仪相比的相位压缩程度。设调制信号 $\phi(t)$ 的幅值为 ϕ_m , 频率为 f_m , 则

$$\phi(t) = \phi_m \sin(2\pi f_m t), \quad (13)$$

则由 $|\phi(t) - \phi(t+T)| \leq \pi/2$ 的限制条件可得

$$T\phi_m f_m \leq 1/4. \quad (14)$$

在压电相位调制器的例子中, 或其它类似的可以使光纤伸缩的相位调制器中, 在 ΔL 长度内, 相位偏移为

$$\phi_m = \frac{2\pi n \Delta L}{\lambda}, \quad (15)$$

式中 n 为光纤的平均折射率, λ 为真空中的光源波长。将(15)式及 $T = nL/c$ (L 为光延迟线长度; c 为真空光速)代入(14)式得

$$\Delta L f_m L \leq \frac{c\lambda}{8\pi\xi n^2}, \quad (16)$$

式中 ξ 为应变光学校正系数, 对于石英玻璃光纤, 该值近似为 0.78。

根据(8)式、(9)式、(13)式及(15)式, 即可得到相位差变化量的幅值

$$[\phi(t) - \phi(t+T)]_m = \frac{4\pi^2 n^2 \xi L f_m \Delta L}{c\lambda}. \quad (17)$$

比较普通干涉仪与该干涉仪的相位变化量幅值

$$\frac{\phi_m}{[\phi(t) - \phi(t+T)]_m} = \frac{c}{2\pi f_m n L} = \frac{1}{2\pi f_m T}, \quad (18)$$

在选定 $L = 3 \text{ km}$, $f_m = 50 \text{ Hz}$ 时, 得到其比值为 220.2, 即该干涉仪在检测相位时把原调制相位压缩了上百倍⁹。

3 实 验

实验中我们采用型号为 LDM3S-803、波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的半导体激光器; 压电陶瓷采用锆钛酸铅 (PbTiO-PbZrO) 系列; 光纤采用在 $1.3 \mu\text{m}$ 波长处有理想传输特性的通讯用单模光纤; 探测器采用在 $1.3 \mu\text{m}$ 处有较好响应度的 InGaAs (PIN 型) 光伏探测器。用变压器模拟大电流传输线, 测得的实验结果如图 3 所示, 图中横坐标表示用电流表测得的被测电流值, 纵坐标表示用本系统进行测量的输出对应电压值。

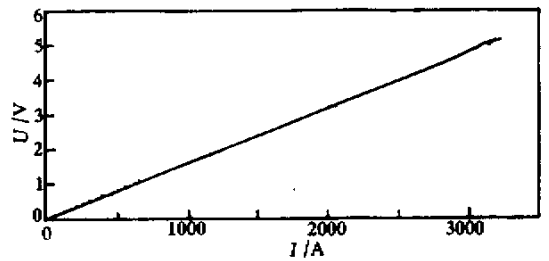


Fig. 3 Output characteristics of the experimental system

由实验结果看出, 系统的输入与输出具有很好的线性度, 在 $40 \text{ A} \sim 2000 \text{ A}$ 范围内其精度能保证在 0.2 级 (图中, $|e|_{\min}$ 是角差的量度, I/I_{\max} 是测量电流与最大电流值的比值)。估计角差的产生是因为传输线相位延时。系统的主要误差来自于光路, 对于光路来说, 由于采用具有相位压缩作用的干涉仪结构, 两束光具有相同光路, 故不存在光路不平衡产生的相位噪声, 光路系统的噪声主要包括散粒噪声、光源强度噪声、瑞利反散射噪声和连接反射噪声, 合

理地选择光学器件及减小电路部分的滤波带宽可减小这些噪声的影响。系统在小电流处的精度在 0.5 左右,这主要是由压电陶瓷在低电压处的非线性特性引起,这可以通过测量时合理地设置静态工作点来排除。

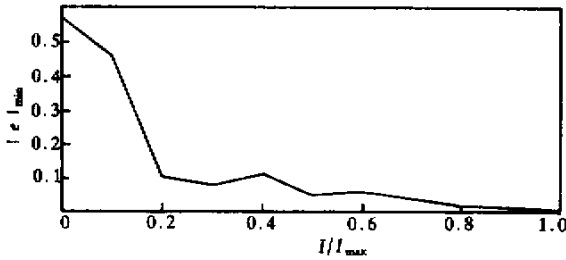


Fig. 4 Angle error characteristics of the experimental system

结论 本文对一种新型的光纤电流传感器进行了理论分析和实验验证。由于传感头采用罗戈夫斯基线圈结构,排除了一般混合式光纤高压电流传感器在高压侧取电源的困难;由于传感光束与参考光束在同一根光纤中传输,从而有效地抑制了因弯曲、振动及温度等环境变化所产生的干扰及光纤固有双折射的影响;由于采用相位压缩原理使得系统动态范围扩大了数百倍。而输出的相位差变化量对时间的导数使得这种结构电流传感器对缓变的温度变化不敏感,解决了以法拉第电磁效应建立的光纤电流传感器对温度变化不稳定的问题。压电陶瓷低压处的非线性以及压电陶瓷长期稳定性给系统精度带来较大的影响是该系统的不足之处。

参 考 文 献

- [1] Power System Instrumentation and Measurements Committee and Fiber Optic Sensors Working Group, Power Systems Communication Committee. Optical current transducers for power systems: A review. *IEEE Trans. Power Delivery*, 1994, **9**(4): 1778~1787
- [2] Dong Xiaopeng, Chu B C B, Chiang Kin Seng. Twisted fibre electric current sensor with compensation for arbitrary bias phase shift. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1999, **19**(7): 981~987 in Chinese)
- [3] Katsukawa H, Ishikawa H, Okajima H. Development of an optical current transducer with a bulk type Faraday sensor for metering. *IEEE Trans. Power Delivery*, 1996, **11**(2): 702~707
- [4] Chen Wei, Zhang Guansheng, Cai Xiaobo. Research an electric infrared current transform. *High Voltage Apparatus*(高压电器), 1995, (4): 3~6 in Chinese)
- [5] Yariv A. Fiber optic smart structure. *Proc. IEEE*, 1996, **84**: 60~67
- [6] Qiao E, An Zuoping, Luo Chengmo *et al.*. Development and application of optic current transformer: Looking forward instrument transformer technology in 21 century. *Transformer*(变压器), 2000, **37**(1): 40~43 in Chinese)
- [7] Wang Tingyun. Fiber-optic phase modulation theory and experiment analysis with PZT cylinder. *Acta Photonica Sinica*(光子学报), 1999, **28**(2): 134~137 in Chinese)
- [8] Swart P L, Spammer S J. Differentiating fiber optic relective ring interferometer for alternating current measurements. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(4): 1054~1058
- [9] Wang Tingyun, Sun Shenghe, Zheng Shengxuan *et al.*. Interferometric phase compression theory and its application. *Acta Photonica Sinica*(光子学报), 1997, **26**(8): 698~702 in Chinese)

Designing of an Optic Fiber Interferometer High-Voltage Current Sensor

Liu Bin Zhang Junzheng Zhang Qiuchan Xie Ping

(School of Electric Engineer Yanshan University, Qinghuangdao 066004)

(Received 2 January 2001; revised 19 April 2001)

Abstract: A simple struture optic fiber interferometer current sensor was designed. The model is given and the feasibility is tested. Compared with other current sensors, this sensor is free of power suppty in high-voltage side, with a large measuring range and is not sensitive to slow variable such as temperature because of its special optic circuit.

Kay words: current sensor; optic fiber interferometer; Rogowski coil