

The Optical Electronic Voltage Transformer Based on Faraday Magneto-Optical Theory^{*}

SHEN Xin^{1,2}, SHU Hongchun¹, CAO Min², LIU Jing¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650504, China;

2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co. Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: This paper introduces the technology of optical electronic voltage transformer, analyses the existing problems of optical electronic voltage transformer applications, and presents an optical electronic voltage transformer based on Faraday magneto-optical theory. The main circuit of the transformer based on the inductance voltage divider, used Ampere circuital theorem and Faraday magneto-optical effect for current measurement, the current was measured indirectly by detection of the phase difference formed by two polarized beam, which transmitted in the fiber that around the current carrying conductor. There is a fixed linear and differential function between the current and the measured voltage, the merging unit gets the inductance ground voltage, which generated by the primary circuit. Finally, through the laboratory test, proves the method that the voltage measured by the current can completely meet the requirements of the power system voltage transformer.

Key words: optical electronic voltage transformer; inductance voltage dividing; Ampere circuital theorem; Faraday magneto-optical effect; discrete differential

EEACC: 2143; 4160

doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2019.02.004

基于法拉第磁光理论的光学电子电压互感器^{*}

沈鑫^{1,2}, 束洪春¹, 曹敏², 刘静¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院, 昆明 650217; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217)

摘要: 介绍了光学电子式电压互感器的技术现状, 并分析了现有光学电子式电压互感器应用中的问题, 提出了一种基于法拉第磁光原理的光学电子式电压互感器, 互感器主回路采用电感分压原理, 采用 Ampere 环路定律和磁光 Faraday 效应进行电流测量, 通过检测布置在载流导体周围的光纤中传输的两束偏振光间形成的相位差大小, 以间接地测量电流值。这个电流值与被测电压值之间是一个固定线性与微分的函数关系, 合并单元通过对电流信号进行线性与离散微分获得一次回路在主回路电感上施加的对地电压值。并通过实验室测试的验证, 证明这种利用电流测量原理实现电压测量的方式完全可以满足电力系统对于电压互感器的要求。

关键词: 光学电子式电压互感器; 电感分压; Ampere 环路定律; 磁光 Faraday 效应; 离散微分

中图分类号: O482.55; TM455.93

文献标识码: A

文章编号: 1005-9490(2019)02-0286-05

高压电压互感器是电力系统中获取电压信息的传感器, 对系统的安全性、稳定性和可靠性有着直接的影响。与传统电压互感器相比, 由于电子式电压互感器具有结构简单、体积小、重量轻、响应快、安全等优点正越来越受到人们的广泛的关注。一般地, 电子式电压互感器^[1-2]采用电容分压、电感分

压、电阻分压后直接测量其小信号, 而光学电子式电压互感器因为其抗电磁干扰能力强、与主回路无电气联系等优点正越来越受到广泛的重视。国际上已有光学电压互感器投入现场试运行^[3-6], 国内也相继开展了这方面的研究工作^[7-8]。

目前, 具有实用化前景的光学电子式电压互感器

项目来源: 国家重点研发计划项目(2016YFF0201202)

收稿日期: 2018-07-05

修改日期: 2018-09-05

主要是基于 BGO($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 晶体 Pockels 效应的体调制型光学电压互感器。但基于 Pockels 效应的光学电子式电压互感器一直存在着空间场强干扰以及温度稳定性问题。文献[9]描述了光学电子式电压互感器其传感头的光学晶体、光路结构、绝缘结构、光源受运行环境温度的影响,文献[10-12]都对光学电子式电压互感器现场应用提出了相应的技术解决方案,这些措施都是从工艺角度来解决由于 Pockels 效应本身的缺点,从现场应用情况来看收效甚微这严重阻碍了光学电子式电压互感器的实用化进程。

而采用法拉第磁光原理的光学电子式电流互感器^[13-14]却因为其技术上无论是其稳态测量准确度还是其暂态测量准确度上都具有比较大的优势,且已经在电力系统内得到了大量的工程应用。法拉第磁光原理是一种基于 Ampere 环路定律和磁光 Faraday 效应进行电流测量的方式。本文就此展开了讨论和研究,提出了一套利用法拉第磁光原理电流互感器作为测量单元,从而间接测量主回路电压的光学电子式电压互感器。并对这种原理的光学电子式电压互感器进行实际测试验证。

1 Pockels 效应的光学电压传感器

Pockels 电光效应是指某些透明的光学介质在外电场的作用下,其折射率线性地随外加电场而变化,会产生与外加电场强度成正比的双折射。Pockels 效应又称为线性电光效应,目前光学电子式电压互感器就利用 Pockels 效应。

若晶体在通光方向长为 l ,则出射的两束光之间的相位差为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_{x_1} - n_{x_2})l = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_0^3 \gamma_{41} El \quad (1)$$

或用电压表示为:

$$U = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_0^3 \gamma_{41} \cdot \frac{l}{d} V = \pi \frac{U}{U_\pi} \quad (2)$$

式中: $U_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma_{41}} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)$ 。

U_π 是使二束光产生 π 相差所需的外加电压,称半波电压, V 是外加电压, d 是施加电压方向的晶体厚度。由上式可见,只要测出相位差 $\Delta\varphi$ 的大小,就可以确定所要测量的电场和电压的大小。然而,测量光的相位差是困难的,一般利用干涉原理将相位调制问题变成强度调制问题。

图 1 为由 BGO 电光晶体构成的光纤电压传感器。它由光纤、准直透镜、起偏器、检偏器、1/4 玻片、电光晶体和耦合透镜组成。

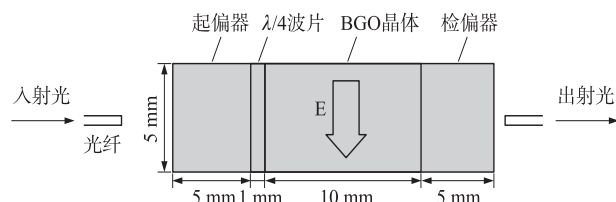


图 1 光纤电压传感器结构示意图

图 1 中,各元件的功能如下:

(1) 准直透镜:把来自光源 LED 的光束准直成平行光进入起偏器,并把经电压调制的光耦合进输出光纤中。

(2) 起偏器:把来自 LED 的光变成线偏振光;

(3) 1/4 玻片:引入 90 度附加相移;

(4) BGO 晶体:产生电光效应,敏感电压;

(5) 检偏器:将椭圆偏振光变成线偏振光。

工作过程为:由 LED 产生一个中心波长为 850 nm 的光波,通过光纤传至安装在高压侧的光学电压传感头。光首先进入起偏器使之变成线偏振光,然后经 1/4 玻片变成圆偏振光,当光经过电光晶体时,在电场的作用下变成椭圆偏振光,经检偏器后又变成线偏振光;其输出光强可以表示为:

$$I = \frac{1}{2} I_o \left[1 + \frac{\pi V_m}{V_\pi} \sin(\omega t) \right] \quad (3)$$

式中: I 为输出光强, I_o 为输入光强, $V_m = \pi V_m / V_\pi$ 为调制度, $V_m \sin(\omega t)$ 为被测电压。显然输出光强中含有被测电压的信息。

传感器的输出光由光纤传至远方的信号处理电路。PIN 管用来实现光电转换,将光信号变成电信号,再由模拟电路将信号进行滤波、放大等处理,最后信号进入数字电路和微处理器进行处理,得到被测电压。

2 基于法拉第磁光原理的光学电子式电压互感器实现方案

2.1 法拉第磁光原理光学电子式电压互感器总体架构

法拉第磁光原理的光学电子式电压互感器主要是通过采用法拉第磁光效应测量电压互感器主回路电流间接测量其一次电压。

但由于作为电压互感器其主回路电流一般在额定电压时控制在 200 mA 以下,200 mA 的电流目前还无法直接被法拉第磁光效应测量,其准确度无法保证。为了提高电流测量准确度,测量主回路电流时采用取样线圈的方式,将取样线圈在光纤环上进行多圈缠绕为确保其采样准确度一般采用 2 000 匝以上的缠绕,由于取样线圈直接缠绕在光纤环其相

对可靠性及安全性较差,所以必须采用保护电抗以防止取样线圈开路时造成一次事故,以提高互感器的可靠性。所以最终实际结构如图 2 所示。

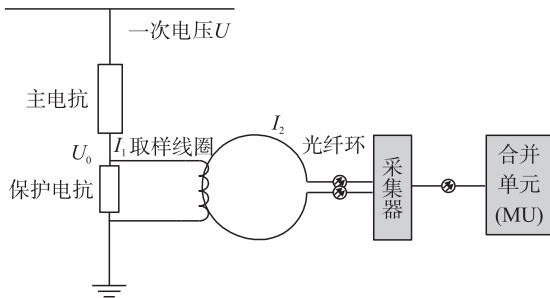


图 2 法拉第磁光原理电子式电压互感器
总体结构图

法拉第磁光原理的光学电子式电压互感器主要由电气回路以及光学测量回路组成。电气回路中主电抗负责控制主回路电流以及高压绝缘,保护电抗起到安全作用以防止当测量回路出现异常时高压主回路开路,取样线圈采用多匝缠绕的方式以提高光学测量单元的测量准确度。光学测量单元中光纤环为电流传感器,采集器包含光学互感器的检测电路、调制回路以及整体计算,合并单元负责将多个电子式互感器的采样信息收集完成同步后按照数字化协议发出。

2.2 电气回路等效计算

电气回路是由主电抗、保护电抗以及取样线圈组成,法拉第磁光电流信号测量的电流值是取样线圈中流过的电流。所以电气回路的等效电路如图 3 所示。

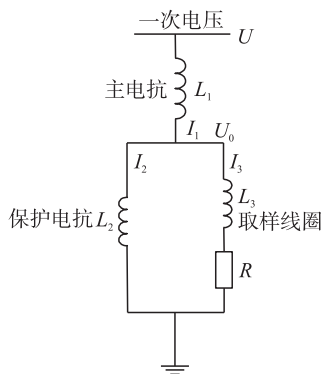


图 3 电气等效回路

法拉第磁光测量的电流值为 I_3 , 取样线圈上电压为:

$$\dot{U}_0 = RI_3 + j\omega L_3 \dot{I}_3 \quad (3)$$

根据式(3)保护线圈电流为:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_0}{j\omega L_2} = \frac{RI_3 + j\omega L_3 \dot{I}_3}{j\omega L_2} \quad (4)$$

根据基尔霍夫定律将式(4)代入从而得到:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \frac{RI_3 + j\omega L_3 \dot{I}_3 + j\omega L_2 \dot{I}_3}{j\omega L_2} \quad (5)$$

U 为系统一次电压, U_0 为取样线圈电压, 取样线圈电压设计时放在 5 V 左右, 所以其对主回路电压的影响可以忽略。根据式(5)计算主回路电压与取样电流之间的关系:

$$\dot{U} = j\omega L_1 \dot{I}_1 \quad (6)$$

式中: L_1 是主电抗电感值, L_2 是保护电抗电感值, L_3 是取样线圈电感值, R 是取样线圈电阻, 这些参数都是固定值。被测电压值 U 与光纤环测量获得的电流信号之间在频域上存在一个固定的函数关系。

将式(6)的频域公式映射到其时域上得到其时域公式:

$$U = -\frac{L_1 R}{L_2} I_3 + \frac{L_1 L_2 + L_1 L_3}{L_2} \frac{dI_3}{dt} \quad (7)$$

2.3 法拉第磁光电流测量

法拉第磁光电流测量其基本结构如图 4 所示, 包括光路和检测电路两部分。

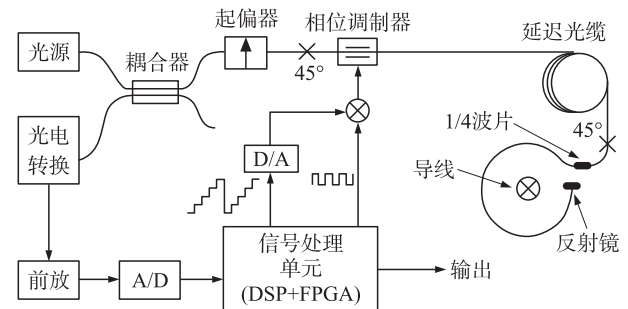


图 4 数字闭环全光纤电流传感器总体结构

光路上采取反射式、干涉型结构, 干涉结果只携带了 Faraday 磁光效应产生的相位信息。

检测电路本质上是一种以相关解调为基础的数字锁定放大器, 包括前置放大电路、A/D 转换电路、D/A 转换电路, 以及以 FPGA 和 DSP 为核心的数字信号处理电路, 主要完成信号的提取、调制、解调, 和输出等功能。

实际应用时使数字阶梯波在调制相位达到 2π 时自动复位, 即 D/A 输出最大时, 对应的反馈调制相移为 2π 。因此对互感器闭环信号检测系统有:

$$\frac{S_{out}}{2^n} = \frac{\phi_R}{2\pi} \quad (8)$$

式中: n 是 D/A 转换器位数。

在闭环条件下, 又有:

$$\phi_R \approx -\phi_F = -4NVI \quad (9)$$

综合两式得:

$$S_{\text{out}} = \frac{2^n}{2\pi} \phi_R = -\frac{2^n}{2\pi} 4NVI = -\frac{2^{n+1}NV}{\pi} I \quad (10)$$

因此,互感器系统变比表达式为:

$$K = \frac{S_{\text{out}}}{I} = -\frac{2^{n+1}NV}{\pi} \quad (11)$$

式中: n 、 N ,和 π 是常量,而 V 是光学 Verdet 常数,所以测量获得的是一个正比于瞬时电流值的离散信号,采集器内对信号进行处理使之可直接对应实际电流值。

由于采集器内通过光学电流测量回路获得的是一个电流值的固定采样速率离散瞬时信号,是一个时间上不连续的瞬时采样点。

因为实际取样线圈缠绕匝数为 2 000 匝所以式一次主回路电压 U 与光学测量电流之间的时域函数关系:

$$U = \frac{L_1 R}{2\,000 \times L_2} I + \frac{L_1 L_2 + L_1 L_3}{2\,000 \times L_2} \frac{dI}{dt} \quad (12)$$

其时域离散函数简化公式为:

$$U = K_1 I + K_2 (I_{N+1} - I_{N-1}) \quad (13)$$

式中: K_1 、 K_2 为与 L_1 、 L_2 、 L_3 、 R 以及采样速率相关的固定参数。

3 准确度影响因素及实验验证

基于法拉第磁光原理的光学电子式电压互感器本质是一种以光学电流测量方式进行间接电压测量的光学电子式电压互感器,其磁光电流环节的白噪声影响主要是集中在小电流的环节但光学电子式电压互感器的测量准确度范围为 80%~120%,则其白噪声影响基本可以忽略不计,为了使互感器的系统具有很强的抗振动干扰的能力,采用两束始终在同一根光纤的两个正交模式上传输的偏振光。为了验证法拉第磁光原理光学电子式电压互感器的整体准确度,全光纤的温度补偿方案在实验室内对试品进行了全温度范围的额定电压准确度测试^[13]。测试结果如图 5、图 6 所示。

根据图 5、图 6 可以得出,在额定电压下, -20℃~70℃ 温度区间内其电压准确度均满足 0.2 级电压互

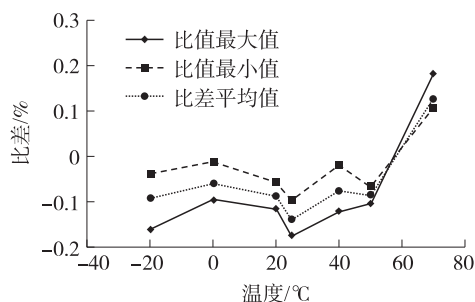


图5 额定电压下温度比差测试结果图

感器的准确度要求。且一般电子式互感器的温度补偿均以常温下为理想输出,所以在常温下准确度为光学电子式电压互感器最理想输出。

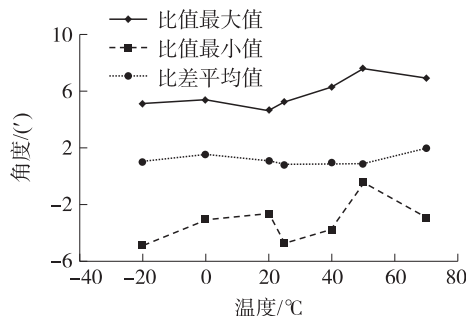


图6 额定电压下温度相差测试结果图

4 结论

基于 BGO 晶体 Pockels 效应的光学电压互感器是一种电光原理的电压测量技术,但这种电光测量方式对电压场强均匀度、材质的温度特性都有着非常高的要求,前端为了保证场强均匀度一般采用电容分压后再进行电光测量。目前的加工工艺以及材质都难以达到高压电压互感器的准确度等级要求。而基于全光纤 Ampere 环路定律和磁光 Faraday 效应的光学电子式电流互感器却逐渐实现了工程化,其准确度等级以及暂态指标已经达到了电流互感器的基本要求。由于电压互感器测量范围相对较窄并不需要很大的动态范围所以利用这种电流测量原理实现的光学电压互感器大大提高了光学电子式互感器的准确度等级。电感分压的电学电子式互感器也已经大面积使用,其可靠性得到了现场的验证。光学电子式互感器因为其无电气回路的直接联系,利用的是电光或磁光原理不受电磁回路干扰的影响,在电子式互感器小信号传输领域具有很大的技术优势。不拘泥于光学测量原理与测量方式,利用光学电子式电流互感器的成熟技术,稍加改进,采用光学电流测量原理间接测量电压的方式实现的光学电子式电压互感器是未来光学电子式电压互感器发展的技术方向。

参考文献:

- [1] GB/T 20840.7 互感器第八部分:电子式电压互感器,2008[S].
- [2] GB/T 20840.8 互感器第八部分:电子式电流互感器,2008[S].
- [3] Kanoi M, Takahashi G, Sato T, et al. Optical Voltage and Current Measuring System for Electric Power Systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 1986, 1(1): 91-97.
- [4] Sawa T, Kurosawa K, Kaminishi T, et al. Development of Optical Instrument Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 1990, 5(2): 884-891.

- [5] Santos J C, Taplamacioglu M C, Hidaka K. Pockels High-Voltage Measurement System[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 8-13.
- [6] Farnoosh Rahmatian, Patrick P Chavez, Nicolas A F Jaeger. 230 kV Optical Voltage Transducers Using Multiple Electric Field Sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 417-422.
- [7] 肖霞, 叶妙元, 陈金玲, 等. 光学电压互感器的设计和试验[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 45-47.
- [8] 王红星. 电容分压型光学电压互感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 16-17.
- [9] 罗苏南, 叶妙元, 徐雁. 光纤电压互感器稳定性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 15-19.
- [10] 陈金令, 谢腊堂, 宋建和. 提高光学电压互感器测量准确度方法的探讨[J]. 光电工程, 2004, 31(3): 29-32.
- [11] 李开成, 叶秒元, 詹琼华, 等. 光纤电压互感器中电光晶体对测量准确度的影响[J]. 光电工程, 2000, 27(4): 67-71.
- [12] 李开成, 叶秒元, 詹琼华, 等. 提高光纤电压传感器温度稳定性的方法[J]. 压电与声光, 2000, 22(2): 72-74.
- [13] 张朝阳, 张春熹, 王夏霄, 等. 闭环光纤电流互感器误差分析与实验研究[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 417-423.
- [14] 刘青, 王增平, 徐岩, 等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 13-14.
- [15] 阎永志. 光纤电压电场传感器基本特性的研究与应用[J]. 压电与声光, 1989, 11(1): 15-21.



沈 鑫(1981-), 男, 教授级高级工程师, 博士, 从事电能计量和智能电网研究, 23755803@qq.com;



束洪春(1961-), 男, 教授, 博导, 从事智能电网研究。