

光学电压互感器传感单元的设计与实验研究

温海燕,雷林绪,张朝阳,孙海江

(中国电力科学研究院 电力电子研究所,北京 100192)

摘要:光学电压互感器中的传感单元即光电作用单元是整个互感器系统中的关键部件,对整个互感器的结构和性能有重要影响。介绍了一种反射式光学电压互感器的基本原理,设计并制作了基于普克尔(Pockels)效应的电压传感单元,模拟电力系统高压绝缘和屏蔽装置设计了3种实验用绝缘屏蔽装置,利用光学电压互感器系统对传感单元进行了实验研究。常温下,0~2.5 kV直流电压测试结果表明,3种绝缘屏蔽装置下的互感器输出都显示了较好的线性关系,表明了该传感单元方案的可行性。

关键词:光学电压互感器;电光晶体;电压传感单元;普克尔效应;绝缘屏蔽装置

中图分类号:TM451

文献标识码:A

Design and Experimental Study of Optical Voltage Transformer Sensing Unit

WEN Haiyan, LEI Linxu, ZHANG Chaoyang, SUN Haijiang

(Dept. of Power Electronic, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Sensing unit (or photoelectric effect unit) of optical voltage transformer is the key part of the transformer, which has an important effect on the structure and performance of the transformer. Basic principle of a kind of reflective optical voltage transformer was introduced in the paper. The voltage sensing unit based on Pockels effect was designed and produced. Three insulating and shielding devices for experiments simulating power system high voltage insulating and shielding device were designed. Experimental study was made for sensing unit using the optical voltage transformer system. The test results under 0~2.5 kV direct voltage at room temperature showed that the output of the transformer had a good linear relationship with the three insulating and shielding devices respectively, indicating the feasibility of the sensing unit.

Key words: optical voltage transformer; electro-optic crystal; voltage sensing unit; Pockels effect; insulating and shielding device

0 引言

光学电压互感器由于体积小,质量轻,无饱和,绝缘性能好,抗电磁干扰能力强,测量频带宽及动态范围大等优点展现出很强的竞争力和广泛的应用前景,越来越受到电力系统行业研究人员的重视。在对光学电压互感器的研究中,人们提出了多种模型和理论^[1],其中以基于普克尔(Pockels)效应的光学电压互感器和基于逆压电效应的光学电压互感器较成熟,被国外大多数光学电压互感器制造厂商所采用,已有成熟产品问世且挂网运行成功^[2-4]。光学电

压传感器中最重要也是最核心的部分是电压传感单元,它实现将电压信息通过一定的效应转化为光信息,是光电作用部分,电压传感单元的结构和性能对于光学电压互感器的结构和性能有重要影响。本文提出一种基于Pockels效应的反射式光学电压互感器方案,介绍了其结构和基本原理。设计和制作了器件化的电压传感单元,模拟电力系统高压绝缘屏蔽装置设计制作了实验用绝缘屏蔽装置,并对传感单元进行了实验研究。实验结果显示,光学电压互感器的输出具有良好的线性关系,证明了该传感单元的方案可行性。

收稿日期:2012-09-10

基金项目:国家电网公司科技基金资助项目(SGKJKJ[2011]532)

作者简介:温海燕(1983-),女,北京人,工程师,硕士,主要从事光学电压互感器的研究。

1 反射式光学电压传感器结构及原理

图1为基于Pockels效应的反射式光学电压传感器的结构。主要包括光源、环形器、Y波导调制器、偏振光分束器(PBS)、保偏光纤延迟线、法拉第准直旋光器、电光晶体、光电探测器、前放电路、模数(A/D)转换器、数字信号处理单元、数模(D/A)转换器及相应驱动电路等。其基本原理:从宽谱光源超辐射发光二极管(SLD)发出的光经过环形器后在Y波导处被分成两束正交的线偏振光,这两束光经过PBS和保偏光纤延迟线进入传感单元,传感单元主要包括法拉第准直旋光器和电光晶体。法拉第准直旋光器将两束光的偏振面都旋转45°后垂直入射进入电光晶体。在外加电场作用下,它们之间产生Pockels相移后两束光被电光晶体表面的反射膜反射,又一次经过电光晶体,Pockels相移加倍。再次经过法拉第准直旋光器,继续沿之前的方向再旋转45°,这样,这两束光两次经过法拉第准直旋光器后振动方向都转过了90°。此时,原来沿延迟线X轴传播的光与沿Y轴传播的光发生模式互换。然后沿保偏光线延迟线X、Y轴传播的两束光在Y波导处发生干涉。最后携带相位信息的光经过环形器耦合进光电探测器。光电探测器将携带电流信息的干涉光强信号转换为电压信号,经过前放电路的放大、滤波等调理作用后,经过A/D转换器转换为离散的数字量,送入数字信号处理单元,数字信号处理单元完成数据解调;通过积分控制算法,产生阶梯波台阶高度,经过累加形成数字阶梯波,送至D/A转换器转换为模拟阶梯波,经过驱动电路施加给光路部分的Y波导相位调制器,实现闭环控制^[5]。数字信号处理单元还产生调制方波,完成数字滤波和数据输出等。

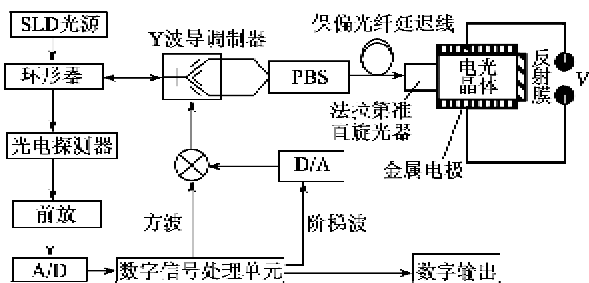


图1 基于Pockels效应反射式光学电压传感器结构示意图

2 传感单元的设计

传感单元主要由法拉第准直旋光器和电光晶体组成。电光晶体选用Bi₄Ge₃O₁₂(BGO)晶体,尺寸为5 mm×5 mm×10 mm,采取45°-x₃切割。采用

横向调制,外加电场垂直于(001)面,光沿晶体[110]方向传播。与晶面(110)平行的两端面抛光,一面镀增透膜,一面镀反射膜。晶体结构如图2所示。

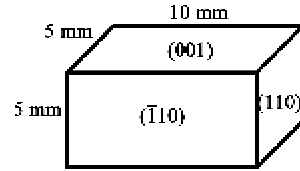


图2 晶体结构示意图

晶体与(001)面平行的两个平面镀金属并各自引出一根导线作为电极引出线,便于实验时加电压。一端带有尾纤的法拉第准直旋光器与电光晶体的光入射面,即镀有增透膜的一面相邻。经过光学调试和整体封装,形成器件化的传感单元,其封装外形图如图3所示。其工作原理:沿保偏光纤快慢轴传播的两束正交线偏振光经法拉第准直旋光器后,振动方向旋转45°后垂直进入电光晶体。采用横向调制,晶体在电场作用下产生线性电光效应,即Pockels效应,两个振动方向的光产生相位差后两束光被反射膜反射再次经过电光晶体,相位差加倍。再次经过法拉第准直旋光器后,两束光的振动方向再次旋转45°,这时,两束光的振动方向与原来相比各自旋转了90°,实现了模式互换。

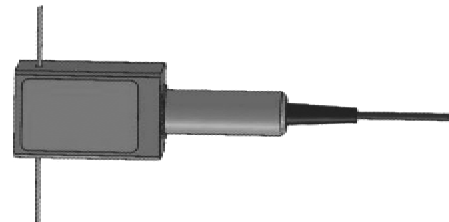


图3 传感单元封装外形图

由于非互易器件法拉第准直旋光器的引入,使参与干涉的两正交线偏振光往返两次通过后发生模式互换,即正向传输时的x偏振模式反向传输时变为y偏振模式;正向传输时y偏振模式反向传输时变为x偏振模式,因此,除电光传感单元外,两正交线偏振模式经过相同的光程,构成光纤传导和晶体传感的准互易反射光路^[5],提高了光路的抗干扰能力,并可引入成熟的数字闭环检测技术用于Pockels相移的解调^[7],提高测量的动态范围和灵敏度。

3 绝缘屏蔽装置的结构设计及实验研究

环境中的电场会对传感头产生较大影响,为了得到稳定电场,模拟电力系统高压绝缘和屏蔽装置,设计了方形金属盒、圆柱形金属筒和大平行平板3

种绝缘屏蔽装置对传感单元进行了实验研究。

3.1 方形金属盒

方形金属盒为封闭型,壁厚约 1 cm,传感头固定于其中,金属盒壁上开 3 个小孔,将电极引出线和传感头的尾纤从盒中引出,尾纤与光学电压互感器的光路部分连接。结构示意图如图 4 所示。

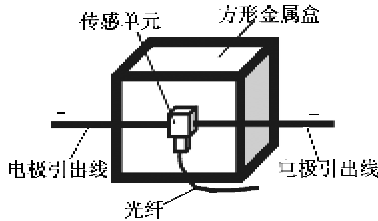


图 4 方形金属盒屏蔽结构示意图

实验时直流电源为 20 kV 直流稳压电源,灵敏度为 0.01 kV,调节方式为手动旋钮。电源的接地端连接其中一根电极引出线,电源正极连接另一根电极引出线。实验在室温下进行,加压范围为 0~2.5 kV,每隔 0.5 kV 依次加压,利用零漂测试软件测得互感器的输出如图 5 所示。由于存在零电压偏置及测试软件的输出是无量纲物理量,因此主要考察各电压等级下输出量之间的相对关系。

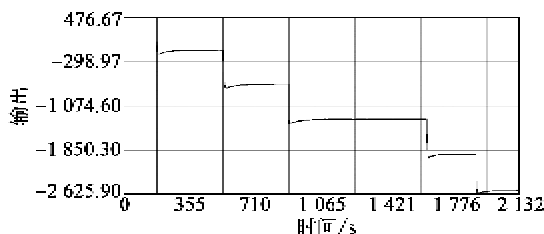


图 5 方形金属盒屏蔽下传感单元加压实验结果

由图 5 可看出,当电压为 0 时即传感头上不加压,输出有一定的偏置。这是因为虽然 BGO 晶体理论上无自然双折射、热释电性、旋光性,且稳定性良好,然而实际的 BGO 晶体存在自然双折射、旋光性、弹光效应和热光效应,而且还存在吸收和色散,这些因素都会对光学电压互感器的测量精度产生影响^[8-9]。其中零电压下的偏置主要来自于 BGO 晶体内部的杂质引起的双折射,以及晶体在加工过程中因受力及温度变化形成的晶体内部残余应力,这些应力将引起某种程度上的应力双折射和旋光性。

由图 5 还可看出,每次加压时,有一个过冲然后逐渐恢复到稳定的过程,约需 2 min。其中每次手动调节电压时间不超过 5 s,因此其影响可忽略。这种现象可能是由法拉第旋光镜与电场间相互影响造

成的。

取各电压等级下稳定状态时的输出作为对应电压输入时的输出值。利用输入和输出数据,用最小二乘法拟合求得的直线如图 6 所示,直线斜率 $k = -1.2124$ 。由图可看出,各测试点和直线吻合得较好,反映出互感器输出和输入有明显的线性关系。

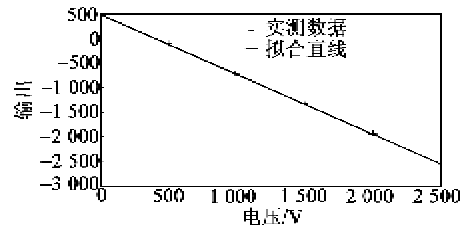


图 6 输入、输出数据的拟合直线

3.2 圆柱形金属筒

圆柱形金属筒主要由有底的金属圆筒、绝缘上盖、金属杆和传感单元支撑部件等组成。其中金属杆穿过绝缘上盖伸入圆柱筒内部,金属杆侧面设计安装支撑部件,用来固定传感单元,材料为绝缘材料,此时将传感单元的电极引出线去掉。金属壁上开一小孔使传感头的尾纤通过,尾纤与光路部分相连接。实验时,金属筒壁接地,金属杆接正电压,此时,金属筒内部将形成稳定电场,在金属筒内的传感单元的 2 个面将感应电势差,此电势差与金属杆上的电压有一定关系。圆柱形屏蔽绝缘装置结构如图 7 所示。

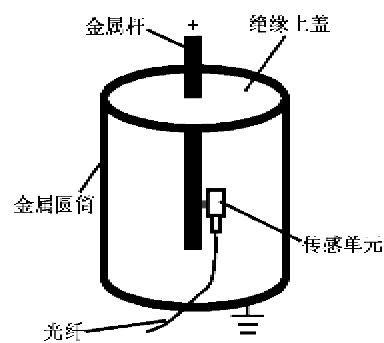


图 7 圆柱形金属筒绝缘屏蔽结构示意图

测试时对传感头的加压范围为 0~2.5 kV,选取 0、0.5 kV、1.0 kV、1.5 kV、2.0 kV、2.5 kV 6 个点进行测试,测试结果如图 8 所示。由图可看出,互感器输出有明显的线性关系。不加电压时零偏仍较大;每次调整电压时,仍出现一个较明显的类似脉冲的过程,但持续时间缩短为二三十秒后逐渐恢复稳定。电压加到 2.5 kV 时难以稳定。

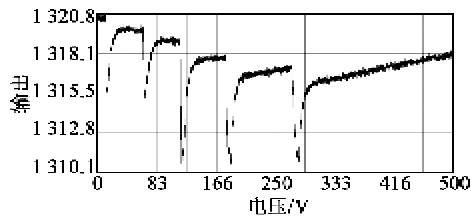


图8 圆柱形金属筒绝缘屏蔽传感单元加压实验结果

3.3 平行平板

为进一步研究传感单元在稳定电场中感应电势差的情况,采用大金属平行平板来形成较均匀的稳定电场。两平行平板尺寸远大于传感单元,传感单元固定于下平板表面靠中心位置,下平板加电压,上平板接地,如图9所示。此时,探头将置于平行平板之间产生的电场中。电压从0逐渐加压到3 kV,加压间隔为0.5 kV,最后再降到0,测试结果如图10所示。

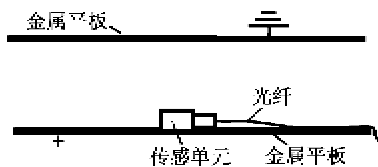


图9 平行平板结构示意图

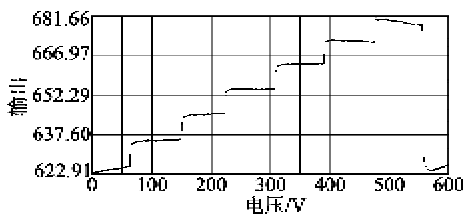


图10 平行平板加压实验结果

由图10可看出,输出具有较好的线性关系,但每档电压下恢复到稳定的过渡时间较长。

综合分析以上3种绝缘屏蔽装置中传感单元的加压实验结果,互感器输出都呈现出一定的线性关系,证明了这种电压传感单元方案的可行性。但是也有以下几点共同的问题:

- 1) 电压为0时,零漂较大且不同的绝缘屏蔽装置下零漂不同。
- 2) 改变电压时都无法直接达到稳定值,而是有一个过渡过程,其时间有长有短。
- 3) 电压水平较高如2.5~3 kV时,输出值不稳定。

考虑到法拉第旋光镜里有磁环,其置于电场中可能与电场有相互影响。

4 结束语

本文介绍了基于Pockels效应的反射式光学电压互感器的基本原理,引入非互易性光学器件法拉第准直旋光器形成准互易反射式光路,并引入数字闭环检测技术用于Pockels相移的解调。设计并制成器件化的电压传感单元,为在实验时形成稳定电场,设计并制作了3种屏蔽绝缘装置进行实验,包括方形金属盒、圆柱形金属筒和平行平板,并进行了实验研究。室温下,0~2.5 kV直流电压测试结果均反映出互感器输出具有良好的线性关系,证明了该传感单元方案的可行性。每次调整电压时都有一段不稳定过程,可能是由于法拉第旋光镜中的磁环对电场有一定影响,有待于进一步的研究。该传感单元方案结构简单,准互易光路结构和数字闭环检测技术提高了光路系统的抗干扰能力,同时提高了互感器的动态范围和响应灵敏度,具有一定的研究价值,设计更稳定可靠的绝缘屏蔽结构及改进传感单元的结构以提高其稳定性与可靠性是下一步研究工作的重点。

参考文献:

- [1] BI Lan, LI Hui. An overview of optical voltage sensor [C]// Hangzhou: 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, IEEE, 2012: 197-201.
- [2] RAHMATIAN F, CHAVEZ P P, JAEGER A F. 230 kV optical voltage transducers using multiple electric field sensors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 417-422.
- [3] SANDERS G A, BLAKE J N, ROSE A H, et al. Commercialization of fiber-optic current and voltage sensors at Nxtphase[C]// Portland: The 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, IEEE, 2002: 31-34.
- [4] BOHNERT K, GABUS P, BRANDLE H. Fiber-optic current and voltage sensors for high-voltage substations[C]// Nara: 16th International Conference on Optical Fiber Sensors, IEICE, 2003: 752-754.
- [5] 肖庆亮, 张朝阳, 杨德伟. 一种新型光纤电压互感器数字闭环控制系统模型研究[J]. 燕山大学学报, 2010, 34(1): 90-94.
XIAO Qingliang, ZHANG Chaoyang, YANG Dewei. Digital closed-loop control system model analysis of a new type optical fiber voltage transformer[J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(1): 90-94.

(下转第693页)