

不同结构光学电压互感器抗电场干扰的探讨

程云国, 刘会金

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 外电场对光学电压互感器(Optical Voltage Transformer, OVT)的干扰与OVT的结构有关系, 通光方向和电压方向不同, 外电场对OVT的影响也不同。该文详细分析了外电场对OVT的横向调制和纵向调制两种基本结构的影响。针对这两种结构抗电场干扰的特点, 兼顾实际高电压测量中的信号处理, 提出了一种OVT传感头结构的改进措施。

关键词: 光学电压互感器; 横向和纵向调制; 电场

中图分类号: TM451; TM43 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)11-0013-03

0 引言

OVT较传统的互感器有无可比拟的优点, 它绝缘强度高、抗干扰能力强、测量频带宽、体积小、重量轻、无铁磁谐振和铁心饱和, 越来越引起人们的重视, 国内外对此都有研究, 并取得了一定的进展, 目前已有OVT挂网试运行^[1]。OVT是通过传感头敏感电场测量电压的, 传感头是OVT的核心, 其稳定性和抗干扰性是OVT技术的关键。本文从结构方面分析了传感头抗电场干扰的能力, 并介绍了一种改进的结构, 它较纵向调制信号处理简单, 较横向调制有明显的抗外电场干扰能力。

1 OVT的基本原理

某些晶体(如BCO晶体)在电场的作用下, 其折射率会发生变化, 在没有外电场作用时, BCO是各向同性, 光率体(折射率椭球方程)为圆球体。在外电场作用时, 光率体变成椭球方程^[2]。利用这种现象制成的OVT原理图如图1所示。



图1 光学电压互感器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of optical voltage transformer

当电场 E (电压) 作用于电光晶体时, 垂直电光晶体表面入射的偏振光将会分裂成振动方向相互垂直、不同折射率的两束光。由于折射率不同, 这两束光将产生一定的位相差。位相差与外电场成正比, 即 $\Delta\phi = kEl$, k 是比例系数, 它与电光晶体参数和

入射光波波长等因数有关; l 是光波通过晶体的长度。利用偏光干涉法可以间接地测量这个位相差: 出射光强 $I = I_0 \sin^2(\frac{\Delta\phi}{2})$, I_0 是入射光强。利用光电变换检测光强的变化可求得被测电压的大小。

2 外电场对横向调制和纵向调制的影响

光学电压互感器OVT多采用BCO晶体, 本文也以BCO为例分析外电场的影响。BCO晶体理论上既无自然双折射又无旋光性, 无外加电场作用时BCO晶体的光率体方程为:

$$\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}{n_0^2} = 1 \quad (1)$$

在外电场 (E_1, E_2, E_3) 作用下光率体方程^[2]变成

$$\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}{n_0^2} + 2 \cdot 41 (E_1 x_2 x_3 + E_2 x_1 x_3 + E_3 x_1 x_2) = 1 \quad (2)$$

式中: x_1, x_2, x_3 是电光晶体的3个主轴; E_1, E_2, E_3 是这3个方向上的电场分量; n_0 是BCO晶体无电场作用时的折射率; 41 是BCO晶体的线性电光系数。根据光率体的性质, 垂直晶体表面入射的线偏振光将分裂成振动方向互相垂直的两束线偏振光。通过光率体中心且垂直于入射光波法线的光率体截面为一椭圆, 记为 Σ 。椭圆 Σ 的长、短半轴方向即为这两束光的振动方向, 长、短半轴的长度即为相应光波的折射率^[2]。

光学电压互感器一般分为横向调制式和纵向调制式。横向调制指入射光线方向跟待测电场方向相互垂直, 纵向调制则是相互平行, 纵向调制一般电压全部加在晶体上, 横向调制可以调整电极间的距离降低电场强度, 如图2所示。

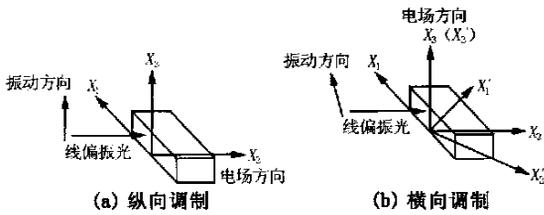


图2 调制方式

Fig. 2 Modulation approach

在纵向调制中,待测电场方向为 x_2 轴方向,如图 2(a) 所示,令 $x_2 = 0$ 可以求出椭圆 的方程为:

$$\frac{x_1^2 + x_3^2}{n_0^2} + 2 \cdot 41 E_2 x_1 x_3 = 1 \quad (3)$$

式(3)表明 E_1 、 E_3 并不影响两束偏振光的振动方向和相应光波的折射率,这是纵向调制的突出优点。从该方程还可以看出,这两束偏振光的振动方向与 x_1 (x_3) 轴成 45° 角,与 E_2 的大小无关。相应光波折射率的大小随 E_2 变化:

$$\begin{cases} n_1 = n_0 - \frac{1}{2} n_0^3 \cdot 63 E_2 \\ n_3 = n_0 + \frac{1}{2} n_0^3 \cdot 63 E_2 \end{cases} \quad (4)$$

两束偏振光的位相差

$$= 2(n_3 - n_1)l = 2n_0^3 \cdot 63 E_2 l \quad (5)$$

如果电压全部加在晶体上,即 $V = E_2 l$, 那么 $= 2n_0^3 \cdot 63 V$, 可见,位相差与电压成正比,与晶体尺寸无关。

在图 2(b) 所示的横向调制中,待测电场方向为 x_3 (x_3) 轴方向,在外电场 (E_1 、 E_2 、 E_3) 作用下光率体方程为:

$$\frac{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}{n_0^2} + 2 \cdot 41 (E_1 x_2 x_3 + E_2 x_1 x_3 + E_3 x_1 x_2) = 1 \quad (6)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 是电光晶体的 3 个主轴; E_1 、 E_2 、 E_3 是这 3 个方向上的电场分量。 x_1 、 x_2 是 x_1 、 x_2 轴绕 x_3 (x_3) 旋转 45° 角而成,先进行坐标变化,然后令 $x_2 = 0$ 即可求得通过光率体中心且垂直于入射光波法线的光率体截面椭圆方程 (在 $x_1 x_3 o$ 平面直角坐标系中) 为:

$$\frac{x_1^2 + x_3^2}{n_0^2} + 2 \cdot 41 \left(\frac{1}{\sqrt{2}} E_1 x_1 x_3 + \frac{1}{\sqrt{2}} E_2 x_1 x_3 + \frac{1}{2} E_3 x_1^2 \right) = 1 \quad (7)$$

根据光率体的性质,入射线偏振光分裂成两束振动方向相互垂直的线偏振光,由式(7)所表示的椭

圆方程可以看出,这两束光的振动方向和光波折射率与 E_1 、 E_2 、 E_3 都有关。按照琼斯算法,振动方向偏转和折射率变化都会引起电光晶体的琼斯矩阵发生变化。在图 1 中电光晶体采用图 2(a) 所示的方位,检偏器与起偏器的透光轴互相垂直, $1/4$ 波片的快慢轴与起偏器的透光轴成 45° 角。外电场引起振动方向改变,对该椭圆方程 进行坐标变换,设变换后的椭圆主轴偏离 x_1 、 x_3 轴 (无外干扰电场,即 $E_1 = E_2 = 0$, E_3 是任意大小的待测电场时,椭圆坐标主轴是 x_1 、 x_3 轴),先不考虑折射率大小的变化,则由检偏器输出的线偏振光的琼斯矢量为:

$$E_0 = G_3 G_2 G_1 E_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{i}{\sqrt{2}} \\ -\frac{i}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2i \sin(\frac{\pi}{2}) \sin(\dots) \cos(\dots) + \cos(\frac{\pi}{2}) & -i \sin(\frac{\pi}{2}) \cos(2\dots) \\ -i \sin(\frac{\pi}{2}) \cos(2\dots) & -2i \sin(\frac{\pi}{2}) \sin(\dots) \cos(\dots) + \cos(\frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

G_1 、 G_2 、 G_3 分别表示 BCO 电光晶体、 $1/4$ 波片和检偏器的琼斯矩阵, E_i 表示入射光经过起偏器后的琼斯矢量。则检偏器输出光强

$$I_0 = E_0 \cdot E_0^* = \frac{1}{2} I_i (\sin^2 \dots + 1) \quad (9)$$

I_i 是入射光经起偏器后的光强, $I_i = E^2$ 。考虑折射率变化引起附加位相差, 并设 $\dots = 1$, 则输出光强

$$I_0 = \frac{1}{2} I_i l (\dots + 1) \cos^2 \dots + 1 \quad (10)$$

外电场引起振动方向和折射率变化,影响输出光强的大小。

当 $E_1 = E_2 = 0$ 时,椭圆 方程简化为:

$$\left(\frac{1}{n_0^2} + 41 E_3 \right) x_1^2 + \frac{x_3^2}{n_0^2} = 1 \quad (11)$$

振动方向是固定不变的 x_1 、 x_3 轴方向,折射率大小与 E_3 有关。因此可以通过屏蔽 E_1 、 E_2 减少由此导致的误差。

3 一种改进的结构

在高电压测量中,BCO 晶体的纵向调制半波电压

$V = \frac{\dots}{2 n_0^3 \cdot 41}$ (\dots 是入射光波波长,取 $\dots = 820 \text{ nm}$) 约为几十千伏,远小于被测电压,如果采用全电压法,被测电压全部加在电光晶体上,输出光强与电压就不是一一对应关系。用一路光路来测量被测电压

将很困难,为此采用双光路,在其中一光路中有 $1/4$ 波片,为两束偏振光增加 $1/2$ 的位相差;另一光路中无 $1/4$ 波片,利用它们的相互关系可以唯一地确定被测电压^[3]。

纵向调制全电压法有优良的抗外电场干扰的能力。如果沿光波方向各点电场不同,两束线偏振光的位相差 $= k \int_0^l E \cdot d\vec{l}$ 。在全电压纵向调制中,两极间的电压 $V = \int_0^l E \cdot d\vec{l}$,这个积分与路径无关,所以电场分布和外电场的干扰都不会影响到电压的测量,半波电压的大小与晶体尺寸无关,传感头的设计相对较为容易。纵向调制结构也存在缺陷,过高的电压加在晶体上,会降低传感头电光晶体的温度稳定性,同时增大了绝缘难度,信号处理较为复杂,也需要一定的时间。

横向调制时,电压并不是直接加在晶体上的,调整电极间的距离可以实现各种电压等级的测量。直接作用在电光晶体上的电压降能够提高电光晶体的温度稳定性,设计制作都较纵向调制简单。横向调制电极间的距离容易受温度的影响,这是影响传感头温度稳定性的一个重要因数,因此电极间都是采用温度系数接近电光晶体温度系数的绝缘材料填充。从前面的分析还可以看出外电场对横向调制结构的影响非常明显,这是横向调制的一个重要的误差来源,应采取措施加以屏蔽。

结合纵向调制和横向调制的优缺点,设计了一种改进的纵向调制结构,原理图如图3。

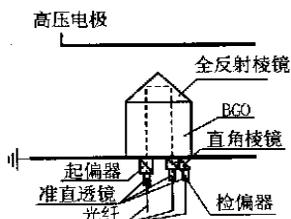


图3 一种改进的调制结构

Fig. 3 An improved modulation constitution

与纵向调制不同的是电压不是全部加在电光晶体上,可以调整电极间的距离改变电场的大小,降低作用在电光晶体上的电压,有利于提高电光晶体的温度稳定性和线性度,通光方向和待测电场方向平行。通过完全类似于纵向调制的分析可知,垂直于通光方向的外电场对传感头影响很小,平行于通光方向的外电场又受到电极的屏蔽,所以传感头受外电场的干扰要比横向调制要小得多,大大提高了测

量精度。输出信号的线性度又明显优于纵向调制,在图3中只需一路光路就可以解调电压信号,配合另一路光路可以实现双光路误差消除,能够在一定程度上减少温度、压力等的影响,双光路还能消除输入光强变化的影响^[4,5]。

电极间距离太大会显著降低传感头的灵敏度,电极间的距离也会受温度影响,从而影响测量精度。因此应综合考虑,确定电极间的电场强度。电场分布不均匀对测量也有一定的影响。

4 结论

分析表明外电场不影响全电压纵向调制结构的电压测量,对横向调制的干扰很显著。信号处理方面横向调制却相对容易得多。结合它们的优缺点设计的改进结构,调制方式是电压不全加在电光晶体上的纵向调制,抗电场干扰能力较强,输出光强与电压的线性度较好,信号处理简单。加在电光晶体上的电压降低还有利于电光晶体温度稳定性的提高。电极间的距离容易受温度影响是它的一个缺点,电极间应采用温度系数接近电光晶体的绝缘材料隔离。

参考文献:

- [1] Sawa T, Kurosawa K, Kaminishi T, et al. Development of Optical Instrument Transformers [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 884-891.
- [2] 张克从 (ZHANG Ke-cong). 近代晶体学基础 (Modern Crystallography) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 1998.
- [3] 徐雁, 陈志萍, 朱勇, 等 (XU Yan, CHEN Zhi-ping, ZHU Yong, et al). 无分压纵向线性电光效应用于高电压测量 (The Measuring Principle for High Voltage and the Signal Demodulation Method Based Pockels Longitudinal Electrooptic Effect) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2000, 26(4): 59-60, 63, 66.
- [4] 何葳, 徐雁, 等 (HE Wei, XU Yan, et al). 绝缘气体压力变化对光电电压互感器准确度的影响 (Influence of Insulation Gas Pressure Change on Accuracy of Optical Voltage Transformer) [J]. 变压器 (Transformer), 2001, 38(5): 34-36.
- [5] Kyung S L. New Compensation Method for Bulk Optical Sensors with Multiple Birefringences [J]. Applied Optics, 1989, 28(11): 2001-2011.

(下转第 19 页 continued on page 19)

性,改善了交直流系统的暂态稳定性,更好地发挥了直流输电的优越性。在控制器设计过程中,参数优化目标函数、模糊规则的确定非常重要,如何进行参数在线优化也是今后研究的方向。

参考文献:

- [1] 李兴源 (LI Xing-yuan). 高压直流输电系统的运行和控制 (Operation and Control of HVDC Transmission System) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 1998.
- [2] 房大中 (FANG Da-zhong). 提高交直流电力系统稳定性的 HVDC 模糊逻辑控制器的研究 (A Fuzzy Logic Controller for the HVDC System to Enhance Stability of AC/DC System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(6): 23-27.
- [3] Mishra S, Dash P K, Hota P K, et al. Genetically Optimized Neuro-Fuzzy IPFC for Damping Modal Oscillations of Power

System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(4): 1140-1147.

- [4] 诸静 (ZHU Jing). 模糊控制原理与应用 (Theory and Application of Fuzzy Control) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1995.
- [5] 袁曾任 (YUAN Ceng-ren). 人工神经网络及其应用 (Artificial Neural Network and Application) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1999.

收稿日期: 2003-10-23; 修回日期: 2003-11-05

作者简介:

许秀芳 (1976 -), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电;

李兴源 (1945 -), 男, 教授, 博士生导师, 中国电机工程学会理事, IEEE 高级会员, 从事电力系统稳定与控制、高压直流输电的研究。

HVDC fuzzy neural controller for improving the transient stability of system

XU Xiufang, LI Xingyuan, YAN Quan, LIU Hongchao, WANG Lu
(School of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper puts forward an on-line controller for the HVDC transmission system to improve the transient stability of the AC/DC system. Based on the combination of fuzzy and ANN, this controller selects the voltage value of the AC bus at rectifier and its rate ratio as input signals of fuzzy control, the output of fuzzy part as one of the input signals of neural network, employs improved BP algorithm to perform neural network on-line training and NETOMAC software to perform off-line optimization. Simulation results show this proposed controller can damp the active power oscillation and enhance the transient stability of system.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377017).

Key words: fuzzy logic; ANN; HVDC; NETOMAC software; parameter optimization

(上接第 15 页 continued from page 15)

收稿日期: 2003-12-20; 修回日期: 2004-01-02

作者简介:

程云国 (1972 -), 男, 硕士, 研究方向为灵活电力系统;

刘会金 (1952 -), 男, 教授, 博导, 主要从事电能质量和传感器方面的研究。

Discussion on electrical field interference to optical voltage transformer with different structures

CHENG Yun-guo, LIU Hui-jin
(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Applied electrical field interference to optical voltage transformer has something to do with its own structure of OVT. Applied electrical field has different effects on OVT when the directions of light beam and voltage are different. This paper details these effects upon the two basic structures of OVT—transverse and longitudinal modulation. Considering their characteristic and signal process of real high voltage measurement, it proposes an improved structure of OVT.

Key words: optical voltage transformer; transverse and longitudinal modulation; electrical field