

用于高电压环境下的光学电压电场传感器

冯 运¹ 陈洪波¹ 白 欢¹ 王 靖² 马剑辉²

(1. 四川电力科学研究所, 四川 成都 610072; 2. 武汉康普常青软件技术有限公司, 湖北 武汉市 430071)

摘要: 复杂电磁环境下电量信号的采集一直是国内外研究的热点。基于 BGO 晶体的光电效应原理, 提出了一种绝缘子串电场强度的测试方法, 并开发出新型光学传感器, 其具有抗干扰能力强、尺寸小、绝缘性能好等优点, 具有广阔的应用前景。

关键词: 光学; 电压; 电场; 传感器

Abstract: It is a hot spot of the researches on the acquirement of the electric signal in complex electromagnetic environment both at home and abroad. Based on photoelectric effect of BGO crystal, a testing method to get the electric field intensity of insulator strings is presented, and a new type of optical sensor is developed with the strong interference rejection, small size and good insulation ability, which has a broad application prospects.

Key words: optics; voltage; electric field; sensor

中图分类号: TM835 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2013)02-0059-04

0 引言

自 1970 年半导体激光器在室温连续工作和低损耗光纤实现之后, 随着两者的飞速发展, 光纤通信和光纤传感技术的应用领域显著扩大。近年来, 为适应大规模、大容量电力系统的需要, 尤其是遥控、遥测和人工智能等开发研究中的特殊需要, 针对光纤传感技术的研究蓬勃发展, 利用光纤的无感性、绝缘性、细径性、柔软性、耐热性、耐腐蚀以及低损耗传输等电气物理特性研制成的原理新颖、种类繁多的光纤传感器, 应用领域涉及电磁噪声下的检测、雷电检测、安全检测、狭小空间的检测、移动体内部检测以及在高温、化学气氛、水下和空间的检测。检测参数包括电场、磁场、温度、压力、位置、移动和转动等。下面将对最新研制成功的利用铋酸铋电光效应的光纤电压传感器和电场传感器的原理结构和基本特性进行探讨。

1 电光效应测量电压电场原理

光纤电压电场传感的结构主要由传感头、信号传输光纤及测量系统组成, 以工作波长为 1 550 nm

的 LED 作为光源; PIN 光电二极管(或光电倍增管)光电接收组件作为光探测器, 用单模光纤传输光信号; 传感头由起偏器、BGO 晶片、1/4 波长片、检偏器和短程透镜构成。LED 光源发出的光经透镜准直, 由起偏器变成线偏振光, 1/4 波长片将线偏振光再变成圆偏振光, 之后穿过处于电压或电场中的 BGO 晶体, 由于加在 BGO 上的电压或电场的作用, 这个圆偏振光转换成椭圆偏振光。经检偏器检偏后的光信号其调制度相当于交流电压和电场, 光电平的大小则对应着直流电压或电场。因而, 加在 BGO 上的电信号就可通过检测光信号来测量。

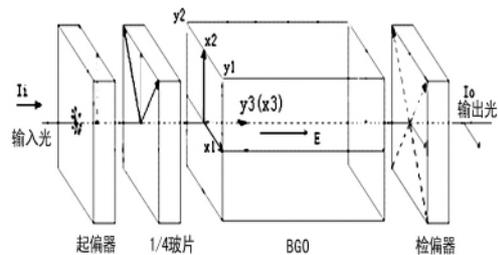


图 1 电场对偏振光的调制示意图

在没有外电场及干扰双折射时, BGO 晶体是光学各向同性体, 其逆介电张量为

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_0 = 1/\epsilon_0, \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$$

在外加电场 E 的作用下, BGO 晶体的折射率椭圆方程为

$$(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) / n_0^2 + 2\gamma_{41}(E_{1,2}x_3 + E_2x_1x_3 + x_1x_2) = 1$$

当透光方向和外加电场方向平行时,电场作用下的光轴方向为 $y_1y_2y_3$, 调制偏振光振动方向为 y_1y_2 如图 1 所示。

折射率椭球方程为

$$(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) / n_0^2 + 2\gamma_{41}(E_1x_2x_3 + E_2x_1x_3 + E_3x_1x_2) = 1$$

由于在 $x_1x_2x_3$ 坐标系和 $y_1y_2y_3$ 中 x_3y_3 重合, 因此令 $x_3 = 0$ 等效于 $y_1y_2y_3$ 坐标系令 $y_3 = 0$ 。因此令 $x_3 = 0$, 可求得偏振光振动面上椭圆方程为

$$(x_1^2 + x_2^2) / n_0^2 + 2\gamma_{41}E_3x_1x_2 = 1$$

上式表明 E_1 、 E_2 并不影响偏振光的振动方向和折射率。对椭球方程主轴化为

$$x = Qy, \quad Q = (e_1 \ e_2)^T$$

其中 $e_1 = [\cos\pi/4, \sin\pi/4]$, $e_2 = [\cos\pi/4, \sin(-\pi/4)]$ 。

$$(\beta_0 + \gamma_{41}E)y_1^2 + (\beta_0 - \gamma_{41}E)y_2^2 + \beta_0y_3^2 = 1$$

新坐标系的两个坐标轴方向是原坐标轴绕电场方向 y_3 旋转 45° 而成, 且与电场无关(坐标变换矩阵 Q 是一个与 E 无关的量)。主轴化后的椭圆方程直观地表示了振动平面上的两个主轴方向的双折射率。

$$n_1 = n_0 - (1/2)n_0^3\gamma_{41}E$$

$$n_2 = n_0 + (1/2)n_0^3\gamma_{41}E$$

$$\Delta n = n_0^3\gamma_{41}E$$

两个偏振方向光程差 $\Delta n^* l = n_0^3\gamma_{41}E$ 相位差 $\delta = (2\pi/\lambda)n_0^3\gamma_{41}El$ 。

由上式看出, 相位差仅 δ 和电场强度一个变量相关, 且关系为线性, 其他均为 BGO 晶体的材料常数, 该相位差通过偏光干涉的方法转变为光强度信号 P 。

包含相位信息的光强度信号耦合入单模光纤的光线经过 BGO 传感头, 在被测电压或电场的调制下到达 PIN 二极管, 经过光电接收组件(由前置跨阻放大器, AGC 放大电路组成)。滤波电路将其分离成直流和交流两部分, 探测到的光功率交流分量 P_{AC} 和直流分量 P_{DC} 的比值 P_{AC}/P_{DC} 和被测交流电场线性相关。

当施加到 BGO 上的电场信号较弱时, 输出光信号的强度调制为

$$P = 1/2P_0(1 + K^* E_0 \sin\omega t)$$

其中 P_0 为入射到 $1/4$ 波长片表面的光强; K 为和

BGO 尺寸和封装外壳材料形状相关的常数; E_0 为电场强度, 于是 $P_{AC}/P_{DC} = K^* E_0^* \sin\omega t$ 。

因此, 来自光源、光探测器的能量涨落以及系统中光纤连接、耦合的变化均可以得到消除。

在这个 BGO 光学电场传感器测量系统中, LED 耦合到单模光纤中的能量非常微弱, 约为 $1 \sim 2 \mu W$, 由于起偏器、检偏器和 $1/4$ 玻片的存在, 传感器的插入损耗在 $8 \sim 10$ dB 之间, 因此光电探测器实际上能接收到的光能量仅为 100 nW 级。因此对光电探测组件的要求需要能够测量 nW 量级光功率。

对于电场分布的测量, BGO 电场传感器体积需要做得尽可能小, 所有的光学元件需要用环氧树脂粘接和封装以满足电气性能和机械强度的要求。因为传感头本身对空间电场在一定距离内会略微使得电场强度畸变, 减小封装材料的介电常数可以减少这种影响。此外, BGO 传感头与光纤耦合应采用有机和无机绝缘材料做成的连接器, 以保证高绝缘性和无感性。

2 基本特性试验

以大型平板电极作为高电位, 试验台面为地, 分别以不同高度的绝缘柱做支撑, 使平板电极和桌面平行。平板电极 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 厚度 2 mm , 不锈钢材料。桌面不锈钢材料, 长方形, 尺寸略大于上极板。晶体通光方向长度 $d = 5\text{ cm}$, 折射率 $n_0 = 2$, 介电常数 $\epsilon = 16$, 有效电光系数记为 γ 约 1 pm/V 。

试验的 2 种方式调制为: (1) 直接放在地极板表面, 极板间隔 23 cm ; (2) 横向放置于塑料杯顶部, 高度约为 23 cm , 极板间隔 43 cm , 如图 2 所示。试验结果如表 1 所示。



图 2 试验布置图

表1 传感器调制试验结果

编号	极板间距 /m	加载电压 /kV	电场强度 /($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	感应电压 /mV
1	0.23	45.1	196	944
2	0.43	50.0	116	413

由电光效应导致的偏振态附加相位差的测量值 $\Delta\delta_{\text{测}} = U/U_0 \Delta_1 = 0.050 \Delta_2 = 0.022$ 。

由于相位差 $\delta = (2\pi/\lambda) n_0^3 \gamma_{41} E_1 l$, 即电场强度测量值 $\Delta\delta_1 = (2\pi/\lambda) n_0^3 \gamma E_1 d = (2\pi/1.55 \mu\text{m}) \times 2^3 \gamma E_1 \times 5 \text{ cm}$, 计算可得 $E_1 = 30.8 \text{ kV/m}$; $\Delta\delta_2 = (2\pi/\lambda) n_0^3 \gamma E_2 d = (2\pi/1.55 \mu\text{m}) \times 2^3 \gamma E_2 \times 5 \text{ cm}$, 计算可得 $E_2 = 13.6 \text{ kV/m}$ 。

由于晶体本身介电常数为16, 理想情况下, 如果晶体和空气之间界面为无限大, 则其感应电场应为临近空气中电场的 $1/16 = 0.0625$, 但实际上, 晶体本身的尺寸是有限的, 而且其形状也会影响附近的电场分布, 研究表明, 晶体尺寸越小, 其内电场感应强度越接近于空气中的实际电场。

同时从试验结果可以看出: (1) 晶体悬空和晶体贴地电极的感应电场灵敏度有较大区别, 原因是由于平板电极形成的空间电场在靠近上下极板的位置有较大的畸变, 因此需要以悬空测量的数据作为标定量; (2) 由于条件限制, 传感头虽然有很小的介电常数, 但在高电压环境下, 表面的感应电荷也会对测量结果造成影响。

3 应用

在各类输、变电气产品的研究、设计、试验和制作过程中, 最为突出的是电气绝缘设施和电场防护等问题, 需要检测不同部位的电压和电场分布。现有的典型检测手段(静电电压表)除体积大、精度低和操作频繁外, 其抗干扰能力差, 同时本身会严重影响环境本身电场分布, 因此往往不能反映真实情况。光学电场互感器除占用空间小、响应速度快、抗干扰能力强以外, 最突出的优点就是传感头和信号传输通道都不含有任何金属, 且由介电常数低的材料组成, 对电场分布影响基本可以忽略, 特别是在高电压场合, 极佳的绝缘性能保障了操作人员的安全, 是目前理想电场检测手段。

由于BGO晶体不仅是优良的电光晶体, 而且还有优良的电气物理性能。因此, 其灵敏度高, 测量范

围广, 输入阻抗高, 抗干扰能力强, 几乎不受温度影响, 目前正在许多领域获得应用。

(1) 电压测量

由于BGO传感器是无感和高输入阻抗的, 所以可以对高压输电配电系统电气设备进行无感、安全快速和遥控测量。例如对多级串联超高压绝缘子分压的测量, 可以得知每一个绝缘子承担的电压值。

(2) 电场测量

不适合狭小空间和表面电场分布的测量。例如, 高压架空线绝缘子周围电场分布测量, 通过电场分布判断绝缘子运行状况。

(3) 高频冲击波的监测

BGO传感器的输入阻抗高、测量频带宽、响应速度快, 适合于输电网高频电压波动的分析及冲击试验和雷电冲击波形的观测与监视。

4 结 语

从电光效应基本原理出发, 探讨了BGO晶体光学电压电场传感器的原理、结构、基本特性及其应用。提出并通过试验验证了传感头本身对电场分布造成的影响, 同时与传感头内感应电场强度和传感头放置位置以及方向相关, 说明了传感头尺寸以及封装材料对电场测量是至关重要的, 应选用小介电常数的非金属材料制成小尺寸表面光滑的封装外壳。

光学电场电压传感器是因其绝缘强度高, 抗干扰能力态范围大、体积小、频带宽、绝缘性能好和无爆炸危险等优点使其在电力系统中发挥越来越重要的作用, 势必成为新一代电力监测技术的主流。

参考文献

[1] 夏强峰. 瓷质悬式绝缘子劣化非接触式检测方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.

[2] 蒋兴良, 夏强峰, 胡琴, 等. 劣化绝缘子对悬垂串电场分布特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 118-124.

[3] 李洪杰, 王颖. 绝缘子串周围静电场的数值计算及其结果在故障绝缘子检测方面的应用[J]. 电瓷避雷器, 1997(4): 8-10.

[4] Birlasekaran S, Li H J. Detection of Faulty Insulators on Power Transmission Line[C]. Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000.

[5] 徐其迎,李日隆. 110 kV 合成绝缘子沿面电场分布的研究[J]. 绝缘材料 2003(4):48-50.

[6] 袁小娴,陈俊武,周志成,等. 330 kV 线路复合绝缘子电位和电场分布的有限元计算[J]. 电瓷避雷器 2006(4):9-12.

[7] 卢明,阎东,杨庆. 均压环安装错误对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器 2010(2):1-3.

[8] 毛凤麟,王雪松,雒峰. 合成绝缘子沿面场强及电位分布试验研究[J]. 西北电力技术 2000(1):6-8.

[9] 武坤,司马文霞,杨庆,等. 分域迭代法计算特高压线路绝缘子电场分布[J]. 高电压技术 2009,35(6):1279-1283.

[10] 汪金刚,何为,陈涛,等. 绝缘子表面电场与紫外脉冲关系以及在劣化绝缘子检测中的应用[J]. 电工技术学报 2008,23(6):137-142.

[11] 张占龙,黄丹梅,魏昱,等. 劣质绝缘子电场正问题优化算法分析[J]. 重庆大学学报 2009,32(11):1296

-1299.

[12] 陈涛. 基于非接触式的劣化绝缘子检测方法的研究[D]. 重庆:重庆大学 2006.

[13] 王黎明,廖永力,关志成. 紧凑型输电线路复合绝缘子轴向电场分布分析[J]. 高电压技术 2009,35(8):1862-1868.

[14] 粟福珩,贾逸梅,王青霞,等. 陡波试验寻找合成绝缘子内部缺陷有效性的检验[J]. 电网技术 2003,27(1):41-43.

[15] 孙豹,陈福深. 用于测量工频强电场的集成光学电场传感器[J]. 半导体光电 2010(2):202-204.

[16] 肖悦娱. 光学电压互感器的电场分布对测量的影响[J]. 高电压技术 2007,33(5):37-40.

[17] 霍成文,李伟,李进,等. 光电探测微弱信号放大器设计[J]. 浙江理工大学学报 2005,22(3):259-262.

(收稿日期:2012-12-28)

(上接第20页)

不设隔离开关,这种情况下,系统可靠性最差,用户断电时间长;在第3种情况,增加了供电网变压器备用,缩小了由于变压器检修而产生的停电时间,用户停电持续时间大大降低;第1种情况在第四种的情况下增设了隔离开关,因此缩小了停电范围;第2种情况考虑了断路器的可靠操作率,可以看出,在断路器能够100%动作的情况下系统的可靠性更高。

表3 系统可靠性指标

可靠性指标	第1种情况	第2种情况	第3种情况	第4种情况
SAIFI	1.827	1.746	1.827	1.827
SAIDI	5.348	5.031	4.332	7.317
CAIDI	3.416	3.396	2.371	4.003
ASAI	0.995	0.995	0.994	0.998

因此,可以看出,对于同一网络,不同的接线方式下,其系统可靠性指标有很大的不同。对可靠性较差的网络,可以采取一定的增强措施,如加装主馈线隔离开关、加分支线保护、备用供电变压器、增加备用电源等方式来增加其运行灵活性,从而提高其可靠性指标。

参考文献

[1] 徐纪法. 供电可靠性综述[J]. 大众用电 2003(9):36

-37.

[2] L. G. Monte Carlo Simulation Based Reliability Studies of a Distribution Test system [J]. Electric Power Systems Research 2000,54(1):55-65.

[3] 别朝红,王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性的应用[J]. 电力系统自动化,1997,21(6):68-75.

[4] 霍利民,朱永利,张在玲,等. 贝叶斯网络在供电系统可靠性评估中的应用[J]. 电工技术学报,2004,19(8):113-118.

[5] 卢锦玲,栗然,刘艳,等. 基于状态空间法的地区环式供电网可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2003(11):21-27.

[6] 万国成,任震,田翔. 供电网可靠性评估的网络等值法模型研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(5):48-52.

[7] 周云海,曹小伟,危雪. 基于网络等值法的配电网可靠性研究[J]. 电气开关 2008(2):20-24.

[8] 汪穗峰. 供电网可靠性定量分析研究综述[J]. 继电器 2008,36(3):78-83.

作者简介:

陈嵩峰(1985),男,工学学士,从事业扩及供用电合同管理工作;

宋明玉(1985),女,硕士研究生,四川省电力公司乐山电业局客户服务中心用电信息采集技术专责。

(收稿日期:2012-12-05)