

电力系统中光电电流互感器研究

王廷云, 罗承沐, 田玉鑫

(清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 电力系统中光电电流测量技术是国内外研究的热点和难点, 光电电流互感器是未来电力工业电流测量发展的趋势。文中基于传统的电流互感器, 利用数字调制和光功率推动技术, 对有源光电电流互感器进行了研究; 基于法拉第效应, 利用相位补偿和传感头组装技术, 研制了块状玻璃式无源光电电流互感器。同时还讨论了几种光电电流互感器的发展状况。

关键词: 电力系统; 电流互感器; 测量

中图分类号: TM 452

0 引言

电流互感器是电力系统中进行电能计量和继电保护的重要设备, 其精度及可靠性与电力系统的安全、可靠和经济运行密切相关。然而随着电力工业的发展, 电力传输系统容量不断增加, 运行电压等级也越来越高, 目前我国电网的最高电压等级已达 500 kV, 下一个电压等级也许是 750 kV 或 1 000 kV。此时, 传统的电磁式电流互感器暴露出一系列严重的缺点: 电流互感器的绝缘结构将非常复杂, 造价也会急剧增加; 由于电磁感应式电流互感器所固有的磁饱和、铁磁谐振、动态范围小、频带窄以及有油易燃易爆等缺点, 已难以满足新一代电力系统在线检测、高精度故障诊断、电力数字网等的发展需要。寻求更理想的新型电流互感器已势在必行, 目前注意力已集中到光学传感技术, 即用光电子学的方法来发展所谓的光电式电流互感器 (optical current transformer, 简称 OCT)^[1]。与传统的电磁式电流互感器相比, 光电式电流互感器具有抗电磁干扰、不饱和、测量范围大、频带宽、数字信号传输、体积小、重量轻等优点。光电式电流互感器从传感头有无电源供电的角度可分为有源 OCT 和无源 OCT 两大类。有源 OCT 又分为频率调制式、脉冲调制式、数字调制式及强度调制式; 无源 OCT 可分为全光纤式、光电混合式、块状玻璃式。尽管 OCT 已研究了 20 多年, 经过了大量的理论分析、实验研究及挂网运行, 但到目前为止还没有一种大批量的商品化产品投放市场^[2]。其根本原因在于: 虽然原理、

技术可行, 但要在高电压、高电磁干扰、高温差变化等环境影响下长期、稳定、可靠地运行还需付出更多的努力。

本文的目的就是针对以上存在的问题, 结合我国的国情, 介绍作者在有源 OCT 和无源 OCT 方面做的一些研究, 以利于加速我国在这方面的研究、开发和实用化进程。

1 有源 OCT

有源 OCT 就是基于传统的电流互感器 (TA), 利用有源器件调制技术, 以光纤作为信号通道, 把高压侧转换的光信号传到地面进行信号处理, 得到被测信号的装置。这种互感器的特点是, 既利用了光纤系统提供的高绝缘性的优点, 显著地降低了电流互感器的制造成本、体积和重量, 又充分发挥了被电力工业界广泛接受的常规 TA 测量装置的优势, 同时还避免了传感头光路的复杂性及全光纤传感头线性双折射、块状玻璃全反射相位差等技术难点。

早在 70 年代清华大学电机系就从事过有源 OCT 的研究, 它在传统 TA 基础上, 使用光辐射内调制的方法实现 OCT, 光纤只用来传递被电流调制的光强信号, 起电位隔离作用。在高压母线上, 串有 2 个 TA, 分别为供电 TA 和取样 TA, 供电 TA 给处于高电位的传感部分提供电源。由于这种方案在高压母线上取供电电源, 而母线电流变化很大, 电源系统的可靠性较低; 另外由于当时光电子器件可靠性低、体积大, 所以试制的样品体积也较大, 并且不适合长期的户外运行。目前, 我们在原来研究、实验的基础上, 对几种有源 OCT 的调制方式进行比较, 采用了一种先进、实用的方案, 它利用光功率推动原理给高压供电, 并在高压侧采用数字调制方式。利用地面的强激光源, 将光能通过光纤传至高电位处, 再由

光电池将光能转换为电能,并用此电能给有关的功能电路部分供电。近年来由于光电子学的迅速发展,高功率的半导体激光器以及光电转换的光电池都达到了很高的指标,给这种方案的实现带来了很大的可能性。原理框图如图 1 所示。

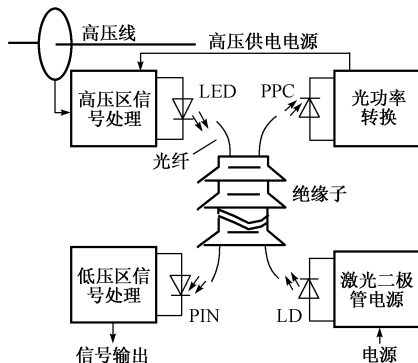


图 1 有源 OCT 原理图

Fig. 1 Scheme diagram of active OCT

在此系统中,被测高压电流信号经一个特制的 TA 变换为适当的电信号;再把电信号输入调制器,用调制器的输出驱动光源,以便用数字方法调制作为载波的光波。在光源处实现电-光变换,把电信号变为携带信息的光信号。光源采用发光二极管 LED。光信号通过光纤传到接收部分,在此,光纤作为传输媒介。在接收部分,先由光电探测器实现光-电转换,把带有信息的光信号变为电信号,光电探测器采用 PIN 光电二极管。然后把光电探测器输出的信号经放大后再进行解调,以得到和原始信息相近的信号。图中高压侧的供电电源由地面 500 mW 的半导体激光二极管 LD 用光纤把能量推动到高压侧,经过高转换效率(40%左右)的光电池 PPC 把光能变为电能,通过 DC/DC 变换电路处理、整定后,可得到稳定的约 80 mW 供电电源功率,传感头的后级电路都采用 CMOS 器件,以降低电路的功耗。经过实验测试,传感头部分的电路消耗功率约为 50 mW。

在低压区的接收部分是一个信号解调电路,它先将光信号转换成电信号,经过前级放大和解调后,一路送入 D/A 转换器进行模拟信号的还原,另一路直接送入计算机或数字信号处理器件进行信号的处理和计算,并采用软件方法对信号进行误差矫正。这样,系统的不稳定性和误差将大大减小。另外,随着近年来对继电保护设备要求的不断提高,提供数字化的电流信号已经成为大势所趋,接收部分的数字通道正是适应这种发展的产物。

2 无源 OCT

无源 OCT 就是传感头部位没有电源供电的光电电流测量装置。无源 OCT 多采用法拉第磁光效应和干涉原理,以前者为主。无源 OCT 的特点是:整个系统的线性度比较好,灵敏度可以做得较高;绝缘性能好。它的难点是精度和稳定性易受温度、振动的影响。利用法拉第磁光效应实现的无源 OCT 有全光纤式、光电混合式和块状玻璃式。全光纤式的 OCT,光纤本身就是传感元件,结构比较简单,但光纤线性双折射的问题一直是困扰着它的主要难点;光电混合式的精度受到一定的限制。目前使用最为普遍的是块状玻璃式无源 OCT,国外挂网实验运行也都是此类型,它是最有实用化可能的类型之一,故而我们也采用此方案。

采用法拉第磁光效应进行电流测量的原理是磁光材料在外加磁场和光波电场共同作用下产生的非线性极化过程。当一束线偏振光通过置于磁场中的磁光材料时,线偏振光的偏振面就会线性地随着平行于光线方向的磁场大小发生旋转;通过测量通流导体周围线偏振光偏振面的变化,就可间接地测量出导体中的电流值。用算式表示为:

$$\theta = V \int_l H dl \quad (1)$$

式中 θ 为线偏振光偏振面的旋转角度; V 为磁光材料的 Verdet 常数; l 为磁光材料中的通光路径; H 为电流 I 在光路上产生的磁场强度。

由于磁场强度 H 由电流 I 产生,式(1)右边的积分只跟电流 I 及磁光材料中的通光路径与通流导体的相对位置有关,故式(1)可表示为:

$$\theta = VKI \quad (2)$$

式中 K 为只跟磁光材料中的通光路径和通流导体的相对位置有关的常数,当通光路径为围绕通流导体 1 周时, $K = 1$,故只要测定 θ 的大小就可测出通流导体中的电流。

由于目前尚无高精度测量偏振面旋转的检测器,通常将线偏振光的偏振面角度变化的信息转化为光强变化的信息,然后通过光电探测器将光信号变为电信号,并进行放大、处理,以正确反映最初的电流信息。一般采用检偏器来实现将角度信息转化为光强信息。

闭环式块状玻璃传感头结构如图 2 所示。经过对多种磁光材料的实验、分析比较^[3],最后选用温度特性好、Verdet 常数较高的 ZF6 重铅玻璃作为传感头磁光材料。在传感头结构设计上主要考虑 2 个问题:一是线偏振光在 2 种不同界面上发生全反射时,电矢量相互垂直的 2 个分量之间产生相位差,即所

谓的“全反射相位差”,影响测量精确度;二是温度、应力等环境因素对互感器的影响。对于第1个问题采用几何相位补偿法^[4],让光在改变光路方向时经过2次全反射,前后2次全反射的人射面相互垂直,使相互垂直的2个分量经过2次全反射后相移的大小相同,而总的相位差恰巧被抵消为零。对于第2个问题采用下列措施解决:①用刚性的热良导体材料封闭玻璃传感头,良导体对外界温度的变化能起到均匀的作用;②在良导体壳体与块状玻璃头之间采用与 ZF6 热膨胀系数相近的材料作为过渡介质,这样既可避免外壳与玻璃传感头膨胀系数不一样带来的应力问题,又可降低传感头与外界的热量交换速度;③选择适当的基准面,采用柔性的固定方法,消除固定形变应力^[5]。

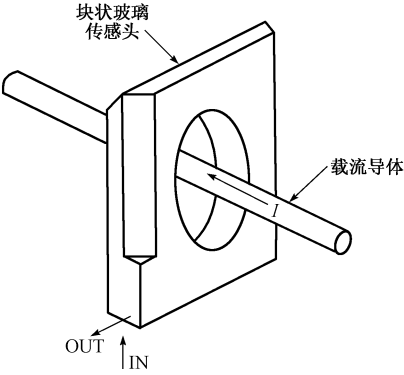


图2 磁光无源 OCT 传感头结构图
Fig.2 Configuration of magnetooptic non-active OCT sensing head

原理图如图3所示,实验结果如图4、图5所示。图中曲线是在额定电流为1200A时与标准0.1级TA比较所得的比差和角差结果。电流在80A~2300A、额定电流为1200A时,比差值在0.2级精度,电流小于80A时比差变差。这主要是噪声及互感器灵敏度所限。同时把传感头放在-20℃~70℃的温度范围内,它的比差变化均小于0.3%。无源磁光式OCT的优点是精度高、线性度好、测量范围大、体积小、重量轻,在220kV电压下整个传感器的重量约为20kg。

3 讨论

经过20多年的努力,人们对全光纤OCT的优点及存在的问题已有了正确的认识,进行了较深入的研究,并尝试了许多方法,解决光纤内双折射给互感器带来的不良影响。尽管3M公司声称已研制成功了无偏光纤,但到目前为止还没有见到真正商品化的全光纤OCT。所以在这个问题没有彻底解决以前,全光纤OCT还很难应用于实际工程。然而,全

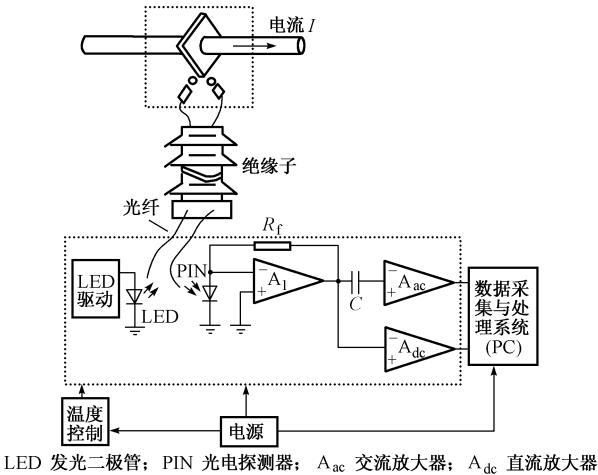


图3 磁光式无源 OCT 原理图
Fig.3 Scheme diagram of magnetooptic non-active OCT

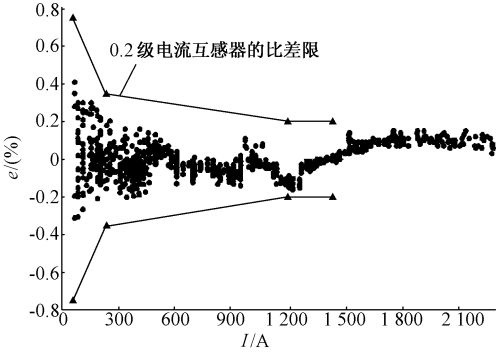


图4 磁光式无源 OCT 的比差
Fig.4 Ratio errors of magnetooptic non-active OCT

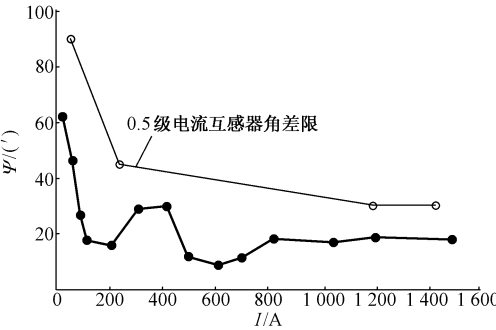


图5 磁光式无源 OCT 相位差
Fig.5 Phase errors of magnetooptic non-active OCT

光纤OCT是光纤电流测量技术的最终发展趋势。块状玻璃OCT经过仔细设计和精密加工,用高Verdet常数、温度特性良好的磁光材料,并利用几何相位补偿技术抵消全反射相位差,同时在光路结构上做进一步的改进,争取使环境影响降为最低,从而具有体积小、重量轻、灵敏度高、价格低、性能稳定的特点,因此,它是全光学电流互感器实用化的首

选产品。

有源 OCT 既利用了现有的实用技术,又利用了光纤的优点,因此它的实用化速度会更快。目前,需要解决的主要任务是:高压侧电子线路在户外长期稳定运行及免维护问题。

电力系统的在线测量、数字化继电保护、控制、故障诊断及电力系统光纤网的发展,需要 OCT。传统 TA 的频带窄、动态测量范围小、故障饱和等缺点已不适应新一代电力系统的发展,这将更加激发人们加快 OCT 商品化生产的热情。

4 结论

本文对电力系统中的光电电流测量技术进行了分析,讨论了作者所从事的数字调制式有源 OCT 和闭环块状玻璃式无源 OCT 的工作原理、实验情况及其主要特点。尽管在研究开发方面,取得了一些成果,但要真正实现实用化商品生产,还需要从原理、工艺、材料方法上做进一步的努力,光电电流互感器的时代一定会到来。

参 考 文 献

- 1 Emerging Technologies Working Group, Fiber Optic Sensors Working Group. Optical Current Transducers

for Power Systems; A Review. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(4):1778~1788

- 2 Ning Y N, Wang Z P, Palmer A W, et al. Recent Progress in Optical Current Sensing Technique. Rev Sci Instrum, 1995, 66(5):3097~3111
- 3 Pai S T, Luo C M, Song J, et al. Magneto-Optical Current Sensors Constructed with ZF Classes. Sensors and Actuators, 1992, A35(2):107~112
- 4 Ulmer E A. A High-Accuracy Optical Current Transducer. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2):892~898
- 5 Ma X, Luo C. A Method to Eliminate Birefringence of a Magneto-Optic AC Current Transducer with Glass Ring Sensor Head. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4):1015~1019

王廷云,男,博士,副教授,现在清华大学电工站做博士后研究工作,主要从事电磁测量、光纤传感和光纤电力通信方面的研究。

罗承沐,男,教授,博士生导师,主要从事光电测量技术、高电压技术、等离子体、气体放电、光纤电力网等方面的研究。

田玉鑫,男,硕士研究生,主要从事光电技术、电表技术方面的课题研究。

STUDY ON OPTICAL CURRENT TRANSFORMER IN POWER SYSTEM

Wang Tingyun, Luo Chengmu, Tian Yuxin

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent years, considerable effort has been devoted to the optical current measurement technology, which is an attractive but difficult subject. The optical current transformer (OCT) will be used to replace the conventional current transformer in the future. Based on the conventional current transformer, the paper presents an active OCT by utilizing A/D data modulation and optical powered technology. Based on Faraday effect, a bulk-glass passive OCT is developed by using phase compensation and sensing head assembly technique. The development of the optical current transformers is also discussed.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 59377326) and Post-Doctoral Science Foundation of China.

Keywords: power systems; current transformer; measurement