

光纤电流传感技术研究进展

王志 初凤红

上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090

摘要 电力系统计量和继电保护对电流传感器技术的要求越来越高,传统的电磁式互感器已经不能满足要求。自从光纤电流传感器问世以来,主要研究集中在如何减小双折射和温度对传感器性能的影响。从光纤电流传感技术的原理着手分别阐述了光纤电流传感领域的研究现状、新技术、新发现以及发展前景等内容,并进行了综合分析、归纳整理,详细介绍了光纤电流传感器的研究进展。

关键词 光纤光学; 光纤电流传感; 磁光效应; 磁致伸缩效应; 超磁致伸缩材料; 光纤布拉格光栅

中图分类号 TM452 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.100002

Research Advances in Optical Fiber Current Sensor Technology

Wang Zhi Chu Fenghong

College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power,
Shanghai 200090, China

Abstract Power system protection for current measurement and sensor technology have become increasingly demanding. The traditional electromagnetic transformer is unable to meet the requirements. Since the advent of fiber-optic current sensors, researches have focused on how to reduce the influence of birefringence and temperature. Based on the research status of the existing literature on the field of fiber-optic current sensors, new developments, new technologies, nearest discoveries and development prospects, a comprehensive collation and analysis is given, and the progress of fiber-optic current sensors is shown in detail.

Key words fiber optics; fiber-optic current sensor; magneto-optical effect; magnetostrictive effect; giant magnetostrictive material; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.2370; 060.3735

1 引言

电力系统计量和继电保护对电流传感器技术的要求越来越高,目前普遍应用的基于电磁感应的电流传感器存在着磁饱和、铁磁谐振、频带窄、动态范围小、有油易燃易爆等问题^[1],特别是随着电压等级的提高和IEC60044-8-200标准的提出,这些问题愈显突出,制造成本也愈加昂贵。因此,迫切需要一种高性能高性价比的电流传感器。

光纤电流传感器具有绝缘性好、抗电磁干扰、频带宽等优点,并在对高压系统的测量与监控方面有取代传统电磁式电流互感器的趋势^[2-3]。按照传感原理光纤电流传感器主要分为基于法拉第磁光效应和基于磁致伸缩效应两大类。本文搜集了光纤电流传感器领域的最新研究进展及其相应的成果,并在此基础上做出了总结和展望。

2 基于法拉第磁光效应的光纤电流传感器

2.1 测量原理

当一束线偏振光通过置于磁场中的磁光材料时,偏振方向将发生一定角度的旋转。旋转角可表示为

收稿日期: 2014-03-07; 收到修改稿日期: 2014-04-17; 网络出版日期: 2014-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(61205081)、上海市自然科学基金(11ZR1414400)

作者简介: 王志(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤电流传感器方面的研究。E-mail: wa209z@163.com

导师简介: 初凤红(1979—),女,教授,硕士生导师,主要从事光纤传感技术和光纤通信技术等方面的研究。

E-mail: 346427253@qq.com

$$\theta = \nu \int H dl, \quad (1)$$

式中 ν 是材料的费尔德常数, H 是磁场强度, l 是光在磁光材料中通过的长度。因此测量出 θ 角, 即可求出场强 H , 进而求解出产生磁场 H 的电流 I 。目前探测法拉第效应偏转角的方法有两种: 光强探测和光能相位探测^[4]。

光强探测如图 1 所示, 光源发出的光经光纤传送, 由起偏器变成线偏振光, 经过磁光材料时, 待测电流产生的磁场对线偏振光进行磁光调制, 然后由检偏器检出偏转角度, 最后由探测器转变成电信号进行信号处理。

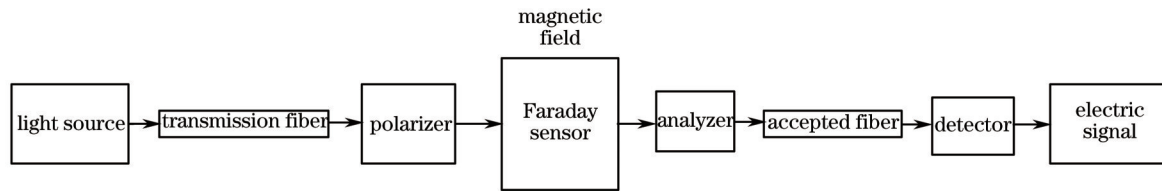


图 1 光强探测的基本结构

Fig.1 Basic structure of light intensity detection

设光源光强为 P_0 , 起偏器与检偏器偏振轴夹角为 45° , 则由马吕斯定律可得

$$P = P_0 \cos^2(45^\circ - \theta) = \frac{P_0}{2}(1 + \sin 2\theta). \quad (2)$$

相位探测原理中起偏器的偏振轴以 $\Delta\omega/2$ 的角速度旋转, 根据法拉第磁光效应原理, 从磁光材料中出射的是偏离了 θ_F 的旋转着的线偏振光, 由光电管转变成电信号后, 出射信号 P_s 是被 $2\theta_F$ 调制的正弦信号, 其表达式为

$$P_s = \alpha P_0 [1 - \sin(\Delta\omega t + 2\theta_F)], \quad (3)$$

式中 α 为小于 1 的常数。从光源中选出参考信号为

$$P_r = \sin \Delta\omega t, \quad (4)$$

则法拉第旋转角为

$$\theta = (\Delta\omega t + 2\theta_F) - \Delta\omega t = 2\theta_F. \quad (5)$$

显然, 这种方法使法拉第旋转角在 $\theta \leq 180^\circ$ 内能被线性探测。

2.2 法拉第磁光效应光纤电流传感器的进展

法拉第磁光效应电流传感器包括全光纤电流传感器和块状玻璃光学电流传感器两种。其中全光纤电流传感器光路简单, 便于加工, 但其输出灵敏度受外界温度、光纤本身的双折射及入射偏振面的影响极大^[5]。截止目前, 基于法拉第磁光效应的全光纤电流传感器在实际应用中还受到多种因素的制约, 主要是光纤线性双折射问题和环境温度的影响问题。光纤的线性双折射引起的偏振扰动会严重影响偏振模的法拉第旋转, 使法拉第效应湮没其中。线双折射对温度、压力等因素十分敏感, 使系统易受环境因素变化的扰动, 降低了系统的稳定性和可靠性。因此, 光纤中的线性双折射、温度引起的精度问题和传感头老化问题一直是此类电流传感器实用化的最大障碍。

线性双折射主要有固有双折射、应力双折射和温度引起的双折射等, 温度除了产生双折射以外, 还会影响介质的费尔德常数、折射率等, 它们相互影响, 关系随机而且复杂。所以, 在设计全光纤电流传感器时, 如何抑制线性双折射就尤为重要, 一般采用以下几种方法来研究^[6]: 1) 新光纤材料的研究; 2) 新光纤结构研究; 3) 新光纤处理技术研究; 4) 新型传感头的结构设计。

在这些方案的引导下, 国内外学者做了大量的研究。Kim 等^[7-8]提出一种激光型电流传感器, 在法布里-珀罗(F-P)型激光器中加入了法拉第旋转镜, 它的引入不仅可以抵消互易的双折射的干扰, 而且还保证了输出端处的本征偏振态为圆偏振, 使传感光纤处于发挥磁光效应的最佳状态, 有利于提高系统的稳定性。但同时, 法拉第旋转镜的旋转角度随温度而改变, 所以它的引入也导致了系统对温度的敏感性增加。中国科学技术大学的苏觉^[9]在此基础上进行了一些实验分析, 为了使系统处于发挥磁光效应的最佳状态, 从而使系统具有最高的测量灵敏度, 可以将传感区置于输出端。在实验中采用三波长 F-P 腔光纤激光器做实验, 其结构如图 2 所示。

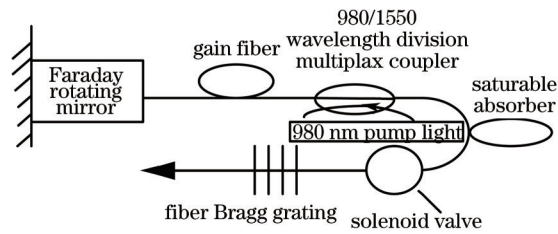


图2 三波长 F-P 腔光纤激光器传感系统图

Fig.2 Three wavelength F-P cavity fiber laser sensor system diagram

激光腔的一端放置法拉第旋转镜[中心波长为 (1550 ± 20) nm、插入损耗为 0.66 dB;旋转角度为 $90^\circ \pm 1^\circ$;工作温度为 $-5^\circ\text{C} \sim +65^\circ\text{C}$],另一端为光纤光栅(中心波长为 1549.942 nm、反射率为 10.04 dB、3 dB 带宽为 0.218 nm、边模左/右为 24.7 dB/24.8 dB),通电螺线管内约 20 cm 的光纤作为传感光纤,线圈匝数约为 150 圈。在靠近光纤光栅附近一段约 20 cm 的平直光纤上加入螺线管作为感应区,线圈匝数约为 150 圈,保持光腔内光纤原有的曲率半径。控制光纤固有的线性双折射参数和单模双折射光纤的长度使得纤维强化金属(FRM)随温度变化产生的零漂最小,在线圈中通入直流电,适当调节腔内的一段光纤的线双折射直到法拉第偏差角产生的影响最小,测得拍频随电流大小变化的数据。实验结果表明:当线性系数为 3.05 kHz/A,线性度较好,降低了由温度变化引起的频率零漂产生的影响。

在提高直通式传感头的灵敏度时,华北电力大学的尚秋峰^[10]提出,可以从采用具有高费尔德常数的光学材料[如钇铁石榴石(YIG)晶体^[11-14]],或者进行磁屏蔽减少干扰或者提高磁场强度的角度出发,增加磁场搜集环节,如集磁环式光学电流传感器(OCS),但是前一种方法所用光学材料在我国不易获得,而集磁式 OCS 受磁环非线性的影响。因此,采用如图 3 所示的螺线管聚磁方式既可以提高传感灵敏度,同时还具有好的线性度,文献[15]提出采用差分式螺线管聚磁结构具有很好的抗干扰能力和线性度,在灵敏度方面也有一定的提高。

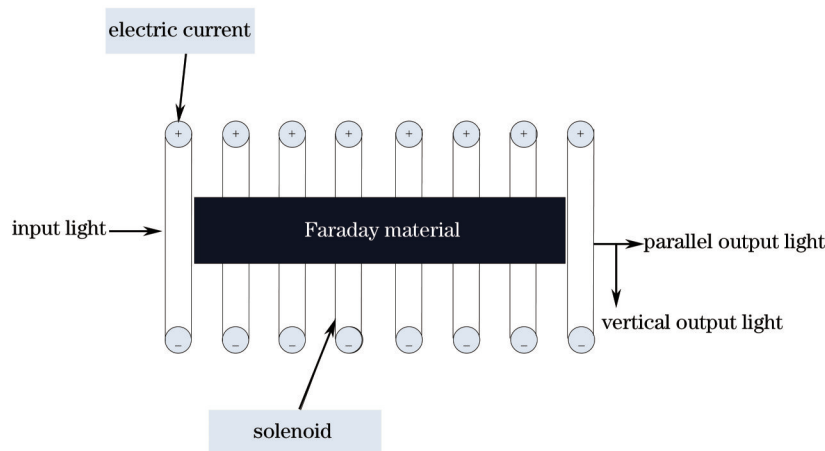


图3 螺线管聚磁光学传感头

Fig.3 Solenoid magnetic optical sensing head

3 基于磁致伸缩效应的光纤电流传感器

3.1 原理

处在外磁场中的铁磁体被磁化后,其长度以及体积会发生变化,这种现象称之为磁致伸缩效应。基于磁致伸缩效应的光纤电流传感器起初用三种方式制作传感头:1) 在由磁致伸缩材料制成的圆柱体圆周上绕以光纤;2) 直接将磁致伸缩材料粘贴在光纤上;3) 在光纤表面上镀上一层均匀的磁致伸缩材料金属膜,并结合相应的解调技术实现对电流的测量。

基于磁致伸缩效应的光纤电流传感方案研究已有三十多年。美国的 Nader-Rezvani 等^[16-18]利用马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪基于磁致伸缩效应的电流测量,取得了实验室阶段性的结果。由于 M-Z 干涉原理需要信号传输光纤和信号参考光纤,而实际上两者参数不可能完全相同,因此必然会产生干扰。而光纤布

拉格光栅(FBG)的出现给基于超磁致伸缩效应的光纤电流传感方案带来了曙光。自从FBG被应用以来,国内外在应用FBG电流(磁场)传感方面作了很多有益的探讨^[19-20]。

FBG电流传感原理为宽带光源发出的光从FBG一端入射,由于折射率的周期变化,使纤芯中向前和向后传输的光波耦合,当满足布拉格条件,即

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda, \quad (6)$$

式中 λ_B 为入射光的中心波长(也称布拉格波长), n_{eff} 为栅区的纤芯有效折射率, Λ 为FBG栅格周期,把光纤光栅粘贴在磁致伸缩材料上,则可以利用电流产生的磁场对磁致伸缩材料的作用调制光纤光栅,通过对布拉格波长漂移的测量,确定电流大小。

3.2 超磁致伸缩效应光纤电流传感器研究进展

Fisher等^[21]将传统的电磁式电流传感器的次级输出电压加在 d_{33} 管状结构的压电陶瓷(PZT)上,并将FBG粘贴于PZT管壁上,由M-Z干涉仪解调FBG的波长漂移,达到了一定的传感精度,实现了一种组合式光学电流互感器。这是一种较为廉价的方法,并且不需要复杂的电隔离。2002年,廖帮全等^[22]将光纤光栅FBG用强力胶牢固地沿纵向粘贴在超磁致伸缩材料棒(GMM)上作为传感头,其结构如图4所示。

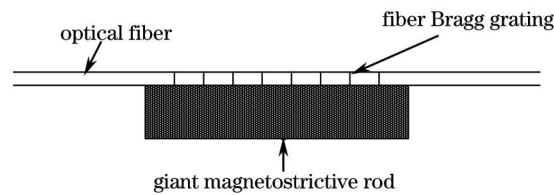


图4 传感头结构示意图

Fig.4 Sensing head structure diagram

利用超磁致伸缩材料棒做变换器构造了FBG交流传感头,与放大自发辐射(ASE)光源共同组成交流电流传感实验系统,进行了交流电流测量,对FBG动态传感解调方法进行了实验验证。2007年,与以往将GMM-FBG系统暴露于螺线管产生的磁场内不同的是,哈尔滨理工大学的熊燕玲^[5]提出GMM和FBG组合的交流电流传感方法,将GMM-FBG暴露在回路外部,其结构如图5所示。

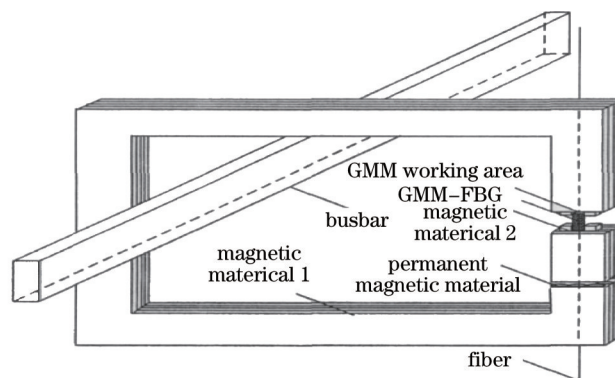


图5 GMM-FBG结合测交流传感示意图

Fig.5 Alternating current measurement sensing diagram by GMM-FBG combination

图5中汇流排为激励电流源。由于将GMM-FBG暴露在回路外部,只要环境温度不变,传感器的应变特性只受磁场影响。在传感头的制作方面,先在GMM棒一侧沿其轴向切割一条V形槽,将传感光栅置于槽内预紧后再粘贴到GMM棒上,其结构如图6所示。

该磁路系统结构简单、紧凑,但是此系统在温度变化较大的环境中使用时会有较大的噪声。西北工业大学的周王民等^[23]设计了一种基于超磁致伸缩材料的温度不敏感光纤光栅大电流传感器,其传感头结构如图7所示。

两块石英玻璃固定在一块长度为 L 的GMM 1两端,两块GMM 2各自固定在两块石英玻璃的内侧,GMM 2的长度分别为 l_1 和 l_2 ,且满足 $l_1+l_2=L$ 。左侧的石英玻璃与GMM 2之间固定一个不受磁场影响的温度补偿材料,补偿材料的热膨胀系数为 α ,长度为 l' 。两块GMM 2之间留有一间距,间距宽度为 l ,长度与光纤

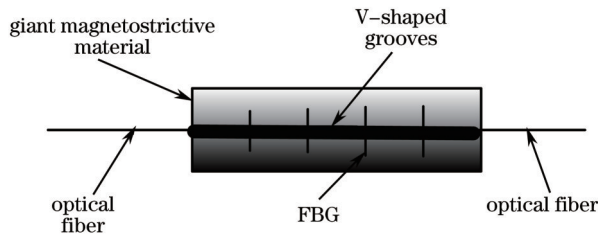


图6 文献[5]中传感头示意图

Fig.6 Sensing head diagram of Ref.[5]

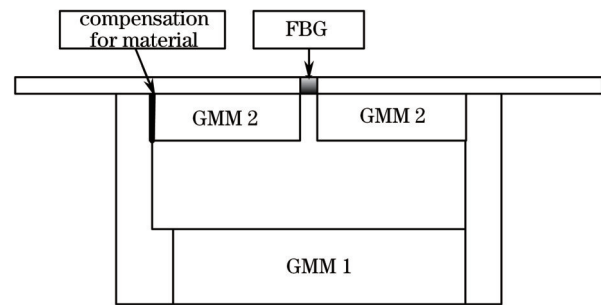


图7 温度不敏感传感器传感头结构图

Fig.7 Temperature non-sensitive sensing head structure diagram

光栅的栅长相等,左侧L形石英玻璃凸出部分的长度为 $l+l'$ 。当温度上升时,超磁致伸缩材料发生膨胀,GMM 1向两端延展,伸长量为 ΔL ,GMM 2的延伸方与之相反,向内侧延伸,伸长量为 $\Delta l_1 + \Delta l_2$,因为GMM 1和GMM 2为同一种材料,膨胀系数相同,又因为 $L=l_1+l_2$,所以 $\Delta L = \Delta l_1 + \Delta l_2$,故温度变化引起超磁致伸缩材料GMM的热胀冷缩不会引起两块GMM 2之间间距的变化,即不会引起光栅长度 l 的变化,从而温度变化导致的超磁致伸缩材料热膨胀对传感器的影响可消除。结果表明,在 $-10\text{ }^\circ\text{C}\sim 70\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化范围内,补偿后光纤光栅的温度系数约为 $4.38\times 10^{-4}\text{ nm}/^\circ\text{C}$,约为补偿前的1/23。传感器的布拉格波长漂移与电流变化具有较好的线性度,温度变化影响很小。螺线管电流灵敏度为 $1.9127\text{ nm}/\text{A}$,与理论值的相对误差为0.26%。

除了添加补偿材料外,文献[24]提出一种新颖的温度补偿方法,其结构如图8所示。

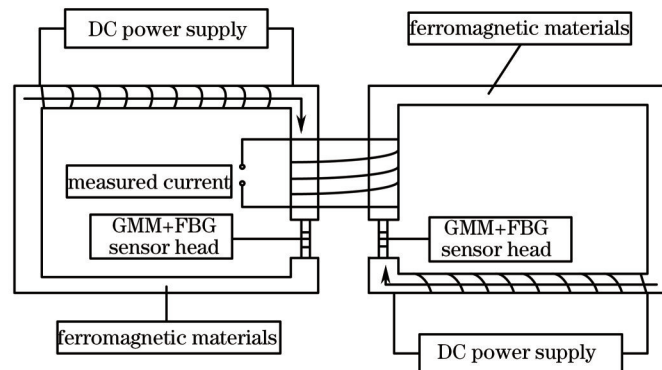


图8 文献[24]中新型传感头结构设计图

Fig.8 Novel sensing head structure diagram of Ref.[24]

上述结构不再单一地将GMM和FBG模块粘在非磁致伸缩的合金材料上,而是将两块GMM+FBG模块放入大小相同方向相反的磁场区域中,因此当被测电流产生的磁场经过两块FBG+GMM模块时,一块FBG的波长将增大而另一块将减小,而当两块FBG拥有相同的初始波长时,温度对布拉格光栅波长具有相同的影响。可以通过检测两块FBG的波长改变数值之和来消除温度的影响,使得在温度变化为 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时仍然有很好的效果。

中北大学的温济霞等^[25]在提高灵敏度方面做了研究。所采用的传感头方案如图9所示。

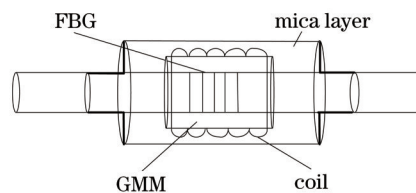


图9 文献[25]中传感头结构图

Fig.9 Sensing head structure head of Ref.[25]

在这种结构中,长度为 L 的磁致伸缩材料管的应变 ε_m 和长度为 l 的光纤光栅的应变 ε_f 之间的关系为

$$\varepsilon_f = \frac{L}{l} \varepsilon_m \quad (7)$$

很显然,灵敏度提高了 L/l 倍。

除了上述方法提高灵敏度外,文献[26]提出了一种传感头设计方法,其结构如图10所示。通过增加反射信号的带宽引入线性调频光信号,使得整个系统扩大了电流测量的范围,提高了系统的灵敏度。通过实验得知,该传感系统在大电流测量领域具有较大的潜力。

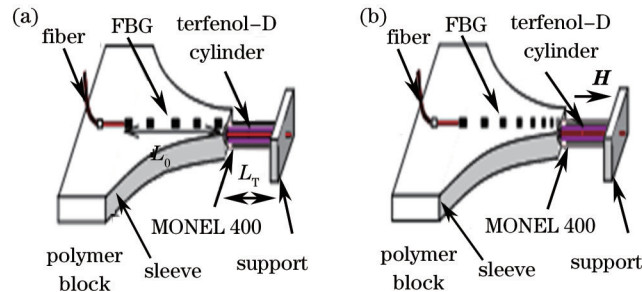


图10 啁啾光纤光学电流传感器在(a) $H=0$ 和(b) $H\neq 0$ 时的传感示意图

Fig.10 Chirped fiber optic current sensor diagram at (a) $H=0$ and (b) $H\neq 0$

上述研究都忽略了漏磁的影响。沈阳工业大学的赵立民等^[27]就漏磁的影响做了研究,提出用软磁性材料做外壳将电磁铁整体包围起来,使得系统的灵敏度得到了提升。为保证尽量少的气隙磁通,衔铁与外壳直径相当,其结构如图11所示。

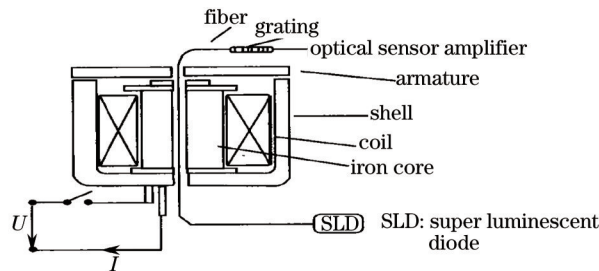


图11 减少气隙磁通结构示意图

Fig.11 Diagram of air gap flux reduction structure

实验表明,测得的传感灵敏度可达 $1.55 \times 10^{-2} \text{ nm/mA}$ 。该技术在対前端大输入电流进行衰减后,可用于电流测量或在线监测。

4 总结与展望

就目前而言,很多方法还仅仅处于理论分析状态,还有待完善以及实验验证。OCS是融多门学科于一体的高新技术,故对理论的研究、新型OCS原理的开发和解决产品实用化问题是第一重要任务,测量方法准确化、测量传输光纤化、测量输出电子化是电子式互感器的三个主要发展趋势,同时要注重以下几个方面^[28]:1) 提高可靠性及稳定性;2) 绝缘系统的改进;3) 智能化的问题;4) 实现功能的多样化;5) 实现OCS与光纤通信技术结合。

参考文献

- 1 He Jian, Cheng Lin, Sun Yangzhang. Optimal control of power system reliability[J]. Chinese Society for Electrical Engineering, 2010, 30(7): 15-21.
何 剑,程 林,孙元章. 电力系统运行可靠性最优控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 15-21.
- 2 Li Rongwei, Li Yongqian. High voltage cable systems with distributed fiber sensing detection[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2010, (1): 38-41.
李荣伟,李永倩. 高压电缆用分布式光纤传感检测系统[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2010, (1): 38-41.
- 3 Fei Ye, Wang Xiaoqi, Wang Benjin, et al.. $\pm 1000 \text{ kV}$ UHVDC transformers selection and development[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2380-2387.

- 费 焯, 王晓琪, 汪本进, 等. $\pm 1000\text{kV}$ 特高压直流互感器的选型与研制[J]. 高压技术, 2010, 36(10): 2380-2387.
- 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 Xiong Yanling. Fibre-Based Super-Magnetostrictive Material AC Current Sensing Theory and Technology Research [D]. Harbin: Harbin Polytechnic University, 2007. 1-6.
- 熊燕玲. 基于超磁致伸缩材料的光纤交流电流传感理论与技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007. 1-6.
- 6 Y N Ning, Z P Wang, A W Palmer, *et al.*. Recent progress in optical current sensing techniques[J]. Rev Sci Instrum, 1995, 66(5): 3097-3111.
- 7 H Y Kim, S K Kim, H J Jeong, *et al.*. Polarization properties of a twisted fiber laser[J]. Opt Lett, 1995, 20(4): 386-388.
- 8 J S Palk, S H Yun, S J Ahn, *et al.*. Polarization- and frequency-stable fiber laser for magnetic-field sensing[J]. Opt Lett, 1996, 21(14): 1029-1031.
- 9 Su Jue. Laser-Based Optical Fiber Sensor in the Current Measurement and Fiber Laser Gyro[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.
- 苏 觉. 激光型光纤传感器在电流测量和光纤激光陀螺中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- 10 Shang Qiufeng. Research on Optical Current Transformer Practical Approach[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2004.
- 尚秋峰. 光学电流互感器实用化方法的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2004.
- 11 M N Deeter, G W Day, T J Bcahn, *et al.*. Magneto-optic magnetic field sensor with $1.4\text{Pt}/\sqrt{\text{Hz}}$ minimum detectable field at 1 kHz[J]. Electron Lett, 1993, 29(11): 993-994.
- 12 M N Deeter, A H Rose, G W Day. Fast, sensitive magnetic field sensors based on the Faraday effect in YIG[J]. J Lightwave Technol, 1990, 8(12): 1838-1842.
- 13 N Itoh, H Minemoto, D Ishiko, *et al.*. Optical magnetic field sensors with high linearity using Bi-substituted rare earth iron garnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 3191-3193.
- 14 O Kamada, H Minemoto, N Itoh. Magneto-optical propertie of $(\text{BiGdY})_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ for optical magnetic field sensors[J]. J Appl Phys, 1994, 75(10): 6801-6803.
- 15 Zhang Guoqing. Theoretical and Practical Study of Optical Current Transformer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- 张国庆. 光学电流互感器的理论与实用化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- 16 N Nader-Rezvani, R O Claus, A K Scarraf-Zadeh. Low-frequency fiber optic magnetic field sensors[J]. Opt Engng, 1992, 31(1): 23-27.
- 17 D C Larson, Y W Bibby, S Tyagi. Metallic-glass-coated optical fibers as magnetic field sensors[C]. SPIE, 1991, 1572: 517-522.
- 18 M Sedlar, I Paulicka, M Sayer. Optical fiber magnetic field sensors with ceramic magnetostrictive jackets[J]. Appl Opt, 1996, 35(27): 5340-5344.
- 19 J H Chow, S Cumpston, I C M Littler, *et al.*. Interrogation of a passive fiber bragg grating resonator sensor by current modulation of adiode laser[C]. The 18th Annual Meeting of the IEEE Laser and Electro-Optics Society, 2005. 802-803.
- 20 Zhang Hucheng, Li Yuquan. Research on magnetic field sensing scheme based on FBG[J]. Sensor World, 2004, (5): 23-26.
- 张虎成, 李玉权. 基于 FBG 磁场传感方案的研究[J]. 传感器世界, 2004, (5): 23-26.
- 21 N E Fisher, P J Henderson, D A Jackson. The interrogation of a conventional current transformer using an in-fiber Bragg grating[J]. Meas Sci Technol, 1997, 8(10): 1080-1084.
- 22 Liao Bangquan, Feng Dejun, Zhao Qida, *et al.*. Theoretical and experimental research on fiber Bragg grating electric current sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(9): 1092-1095.
- 廖帮全, 冯德军, 赵启大, 等. 光纤布拉格光栅电流传感的理论和实验研究[J]. 光学学报, 2002, 22(9): 1092-1095.
- 23 Zhou Wangmin, Wei Zhiwu, Li Wenbo, *et al.*. Large temperature insensitive current sensor fiber Bragg grating[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2133-2137.
- 周王民, 魏志武, 李文博, 等. 温度不敏感光纤光栅大电流传感器[J]. 高压电技术, 2009, 35(9): 2133-2137.
- 24 Hong Zhao, Feifei Sun, Yuqiang Yang, *et al.*. A novel temperature-compensated method for FBG-GMM current sensor [J]. Opt Commun, 2013, 308: 64-69.

- 25 Wen Jixia, Pei Dongxin, Zhang Yanbing, *et al.*. Design and research of fiber Bragg grating current sensor[J]. *Servo Control*, 2012, (4): 67-69.
温济霞, 裴东兴, 张艳兵, 等. Bragg 光纤光栅电流传感器的设计与研究[J]. 伺服控制, 2012, (4): 67-69.
- 26 Aaron Mueller, Suha Mubarak Lasassmeh, Chiu Tai Law. Novel chirped fiber optic current sensor[C]. *Frontiers in Optics*, 2012. FM3H.4.
- 27 Zhao Limin, Qin Tianhe. Electromagnet current FBG sensing experiment[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2005, 27(5): 537-539.
赵立民, 秦天鹤. 利用电磁铁的光纤光栅电流传感实验[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(5): 537-539.
- 28 Zhang Tao, Yan Yan, Shen Zhu, *et al.*. Energy laser for fiber-optic current sensors[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2001, (4): 271-276.
张 涛, 颜 研, 申 焯. 激光供能的光纤电流传感器[J]. 传感技术学报, 2001, (4): 271-276.