

Rogowski 线圈的 FBG 电流传感器研究

代云洪, 胡明耀, 王 振, 许晓平, 李英娜, 许俊飞, 彭 李, 李 川

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 电流是电力设备进行计量、监控和保护的重要参量, 对其准确测量是电力系统安全、稳定、可靠和经济运行的保证。研制了一种 Rogowski 线圈、叠堆压电陶瓷和光纤 Bragg 光栅组合成的测量大电流的电流传感器。利用 Rogowski 线圈把高压侧大电流线性地转换为低电压, 输出电压加在叠堆压电陶瓷上, 由逆压电效应, 叠堆压电陶瓷伸缩带动光纤 Bragg 光栅伸缩, 将叠堆压电陶瓷的应变线性转换为光纤 Bragg 光栅的中心反射波长的移位, 增加温补光栅消除环境温度的影响, 通过测量光纤 Bragg 光栅中心反射波长的移位来测量电流的大小。测试结果表明, 该电流传感器的灵敏度为 0.0718 pm/A , 非线性误差为 $3.47\% \text{ FS}$, 滞后误差为 $4.17\% \text{ FS}$, 重复性误差为 $4.17\% \text{ FS}$ 。

关键词: Rogowski 线圈; 光纤 Bragg 光栅; 电流传感器; 叠堆型压电陶瓷; 温度补偿

中图分类号: TP212; TM55 **文献标识码:** A

Research of FBG Current Sensor Based on Rogowski Coil

DAI Yunhong, HU Mingyao, WANG Zhen, XU Xiaoping, LI Yingna, XU Junfei, PENG Li, LI Chuan

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Current intensity is an important parameter of power equipment measurement, monitoring and protection, accurate measurement of the current intensity is the guarantee to the safeness, stableness and reliability of power system and its economic operation. A current sensor for measuring high current was developed, which a Rogowski coil, stacks of piezoelectric ceramic and fiber Bragg grating were combined together. Rogowski coil was used to put high pressure side heavy current into low voltage linearly. The output voltage was added to the stack of piezoelectric ceramic. The combined fiber Bragg grating was telescopic driven by piezoelectric ceramic stack because of the effect of inverse piezoelectric. The linear strain of piezoelectric ceramic stack was converted to the replacement of center reflective wavelength of the optical fiber Bragg grating. Temperature compensation to the fiber Bragg grating was added to eliminate the influence of environment temperature. The measurement of shift of the reflection wavelength of the fiber Bragg grating was used to measure the current. The test results showed that the sensitivity of the current sensor was 0.0718 pm/A , the nonlinear error was $3.47\% \text{ FS}$, the hysteresis was $4.17\% \text{ FS}$ and the repeatability was $4.17\% \text{ FS}$.

Key words: Rogowski coil; fiber Bragg grating; current sensor; stack piezoelectric ceramic; temperature compensation

0 引言

随着电力工业的发展, 大容量、远距离的高压输电已成为我国电网发展的必然趋势。面对高压下的大电流测量, 传统的电磁式传感器存在磁饱和, 动态范围小, 绝缘安全隐患等问题, 使得测量系统的结构

复杂, 成本高^[1-2]。因此需要研制结构简单, 安全可靠, 成本低的高压电流传感器。目前, 国内外的研究热点集中在光纤电流传感器方向^[3-8]。2003年, B. Yi 等将光纤 Bragg 光栅粘贴在磁致伸缩材料上, 利用电流变化产生的磁场来调制光纤光栅, 达到测量

收稿日期: 2013-07-20

基金项目: 云南省自然科学基金资助项目(2007F181M); 昆明理工大学人才培养基金资助项目(KKSY201303044); 云南省应用基础研究计划基金资助项目(2013FZ021)

作者简介: 代云洪(1986-), 男, 四川内江人, 硕士生, 主要从事光纤光栅传感器设计与应用, 信息检测的研究。通信作者: 李川(1971-), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师, 主要从事测控技术的研究。E-mail: boatriver@eyou.com

电流的目的^[9]。2005年,赵红霞等将光纤 Bragg 光栅粘贴在压电陶瓷上,借助压电陶瓷的电致伸缩效应把低电压转换为光纤光栅 Bragg 波长的移位,但受到环境温度的影响较大^[10]。2013年,李川等利用罗氏线圈、叠堆压电陶瓷和光纤 Bragg 光栅组合成的测量大电流的方法来测电流的大小^[11]。

本文利用一次测量元件 Rogowski 线圈和积分器结合叠堆型压电陶瓷的逆压电效应,增加温补光栅消除环境温度的影响,将叠堆压电陶瓷应变线性转换为光纤 Bragg 光栅的中心反射波长的移位,实现对大电流的测量。

1 电流传感器的结构和工作原理

基于 Rogowski 线圈的光纤 Bragg 光栅电流传感器主体结构包括 Rogowski 线圈、积分器、叠堆型压电陶瓷、测量用光纤 Bragg 光栅、温度补偿光纤 Bragg 光栅和外接光纤;Rogowski 线圈挂接在高压导线上,Rogowski 线圈的输出信号连接积分器的输入端,积分器需要提供直流电源且有接地端子,积分器输出导线正极和输出导线负极分别连接至叠堆型压电陶瓷上下的正负极端子,叠堆型压电陶瓷由若干片压电陶瓷片物理串联组成,叠堆型压电陶瓷右端固定设置在长方筒内,测量用光纤 Bragg 光栅贯穿长方筒右端中心通孔进入长方筒内且固定设置在叠堆型压电陶瓷左端,温度补偿光纤 Bragg 光栅连接测量用光纤 Bragg 光栅通过外接光纤与解调仪相连,如图 1 所示。

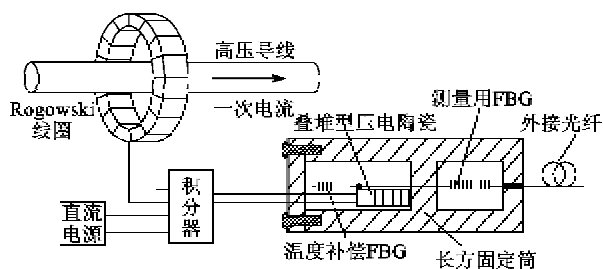


图1 光纤 Bragg 光栅电流传感器结构图

光纤 Bragg 光栅均匀轴向应变引起的波长移位^[12]为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\Delta\epsilon \quad (1)$$

式中: λ_B 为光纤 Bragg 光栅的中心波长; $\Delta\lambda_B$ 为波长移位量; P_e 为光纤材料的有效弹-光系数, $P_e = 0.216$; $\Delta\epsilon$ 为轴向应变变量,即

$$\Delta\epsilon = \Delta l / l \quad (2)$$

式中: l 为光纤 Bragg 光栅的长度; Δl 为光纤 Bragg

光栅的轴向伸缩长度。

当被测电流沿轴线穿过 Rogowski 线圈时,在线圈上产生感生电动势:

$$V(t) = M \frac{dI(t)}{dt} \quad (3)$$

式中: $I(t)$ 为回路中电流; M 为轴线与 Rogowski 线圈之间的互感系数。

通过对线圈上的感应电动势进行积分可得到回路中电流,即

$$I(t) = \alpha V(t) \quad (4)$$

式中 α 为回路实际电流与 Rogowski 线圈感应电动势的标准比。

最后得线圈上产生的电动势为

$$V(t) = I(t) / \alpha \quad (5)$$

感生电动势加在叠堆压电陶瓷上,叠堆压电陶瓷的伸长量 Δc 与所加电压的关系为

$$\Delta c = KV(t) \quad (6)$$

式中 K 为与叠堆压电陶瓷的压电系数和拉伸结构有关的常量。

叠堆压电陶瓷的微应变为

$$\Delta\epsilon_c = \frac{\Delta c}{c} \quad (7)$$

式中 c 为叠堆压电陶瓷的长度。

测量用光纤 Bragg 光栅的中心波长移位量受到温度变化和叠堆型压电陶瓷伸缩变化的影响,其关系式为

$$\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} = (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\epsilon = S_T\Delta T + S_e\Delta\epsilon \quad (8)$$

式中: λ_{B1} 为中心波长; $\Delta\lambda_{B1}$ 为波长移位量; ΔT 为温度变化量; S_T 为温度敏感系数; S_e 为应变敏感系数; α_A 为光纤的热膨胀系数; α_n 为光纤材料的热-光系数。

温度补偿光纤 Bragg 光栅的中心波长移位量只受到温度变化的影响,其关系式为

$$\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} = (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T = S_T\Delta T \quad (9)$$

测量用光纤 Bragg 光栅的波长变化量减去温度补偿光纤 Bragg 光栅的波长变化量,即可消除环境温度的影响。测量用光纤 Bragg 光栅的波长移位量只受叠堆型压电陶瓷伸缩变化量影响的关系式为

$$\Delta\lambda_{B1,2} = \Delta\lambda_{B1} - \Delta\lambda_{B2} = \lambda_{B1} S_e \Delta\epsilon \quad (10)$$

当 Bragg 光栅的轴向长度小于叠堆型压电陶瓷

的伸缩方向长度时,光纤 Bragg 光栅的微应变与叠堆型压电陶瓷的微应变相同,即

$$\Delta\epsilon = \Delta\epsilon_c \quad (11)$$

把式(5)~(7)代入式(11)可得光纤 Bragg 光栅轴向应变变量 $\Delta\epsilon$ 与被测电流的关系:

$$\Delta\epsilon = \frac{KI(t)}{\alpha c} \quad (12)$$

把式(11)代入式(10)得

$$\Delta\lambda_{\text{Bragg}} = \lambda_{\text{Bragg}} K(1 - P_e) \frac{I(t)}{\alpha c} \quad (13)$$

式(13)表明了电流传感器实际测量电流与光纤 Bragg 光栅的 Bragg 波长移位之间的数学模型,通过测量光纤 Bragg 光栅的 Bragg 波长移位^[13]可计算出电流传感器实测电流。

2 电流传感器的组装

根据电流传感器的结构图,对电流传感器进行组装。选择带宽为 8 nm,反射率为 10 dB,边模抑制为 16 dB, Bragg 光栅长度波长为 13 mm 的光纤 Bragg 光栅作为测量用和温度补偿光纤 Bragg 光栅,其中测量用光纤 Bragg 光栅波长为 1 549 nm,温度补偿光纤 Bragg 光栅波长为 1 524 nm。选择哈尔滨芯明天科技有限公司生产的相对介电常数为 5 400,居里温度为 150 ℃,密度为 8 g/cm³,弹性柔顺常数为 18×10⁻¹² m²/N 的叠堆型压电裸陶瓷(型号:XP 6×6/18)作为压电驱动元件。

首先,将制作好的 Rogowski 线圈的正负输出信号导线分别连接积分器的输入端口的正负极,并用绝缘胶带粘接,将积分器的输出端口、±12 V 直流电源端口和共同的接地端口分别安装合适的导线,以方便其他设备的接入。其次,整理准备好已经封装过的光纤 Bragg 光栅与叠堆型压电陶瓷,将叠堆型压电陶瓷的正极和负极分别连接积分器输出端的正极和负极,并用绝缘胶带粘接。最后,检查各部件的连接是否正确,如图 2 所示。

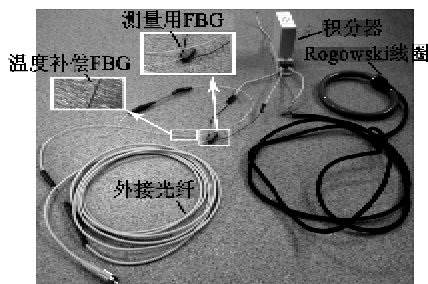
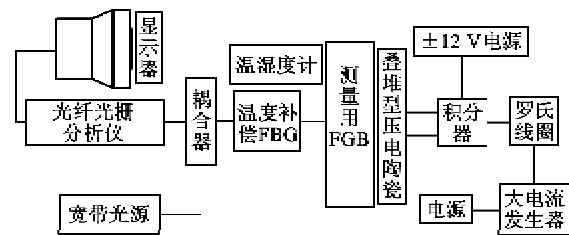


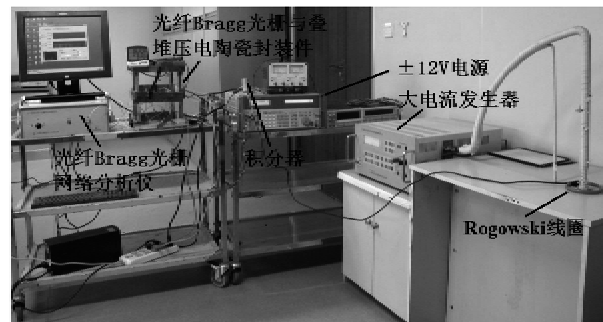
图2 光纤 Bragg 光栅电流传感器实物图

3 电流传感器的测试

为了实现对组装完成的基于 Rogowski 线圈的光纤 Bragg 光栅电流传感器测试,需要根据实验室条件,搭建能满足测试要求的测试系统。测试系统原理图如图 3 所示,主要有交流大电流发生装置、±12 V 直流电源、数据采集装置(宽带光源、光纤光栅分析仪)、显示器、温湿度计等组成。



(a) 测试系统原理图



(b) 测试系统实物图
图3 测试系统图

按照测试系统原理图,配置相应的设备仪器如下:

交流大电流发生装置:TQS-3000A 型钳形表检定装置,准确度等级 0.1 级。

光纤 Bragg 光栅网络分析仪(包括宽带光源): Osafe1000-XX 型光纤光栅解调仪。

本测试系统的工作原理:钳形表检定装置输出可调节的一次被测大电流(0~1 000 A), Rogowski 线圈和积分器组成的一次测量元件把大电流线性的转换成直流低电压,由于逆压电效应,叠堆型压电陶瓷伸缩带动测量用光纤 Bragg 光栅伸缩,测量用光纤 Bragg 光栅和温度补偿光纤 Bragg 光栅串联并通过耦合器连接到光纤 Bragg 光栅网络分析仪,利用分析仪测量光纤 Bragg 光栅的中心反射波长的移位值,并在显示器显示读数。

按照相关规定进行测试,本实验分为两组:一组为逐步升高加载于被测试电流传感器的大电流来记录其中心波长值,二组为逐步降低加载于被测试电流传感器的大电流来记录其中心波长值。

开始实验,打开光纤 Bragg 光栅网络分析仪和显示器,调节直流电源输出分别为 +12 V 和 -12 V,开启钳形表检定装置并设置合适量程的电流。

首先,观测分析仪解调出的测量用光纤 Bragg 光栅和温度补偿光纤 Bragg 光栅的中心波长,零漂 0.5 h 以确保系统处于稳定状态后,分别记录其波长值以及温度和湿度。

其次,把钳形表检定装置的输出电流从 0 调节到 100 A,保持 1 min 使波长值稳定后再记录数据。按此方法,电流每增加 100 A 记录其相关数据,直至电流增加到 1 000 A 为止。

然后,将增加到 1 000 A 的电流逐次降低 100 A,同时记录测量数据,直到降低为 0。一组实验完毕,待电流传感器和测试系统稳定至少 1 h 后进行下一组实验时,重复前面步骤。

经过反复多次实验后得到消除温度后中心波长移位平均变化量与电流关系拟合曲线图和电流测试实验误差棒图,如图 4、5 所示。

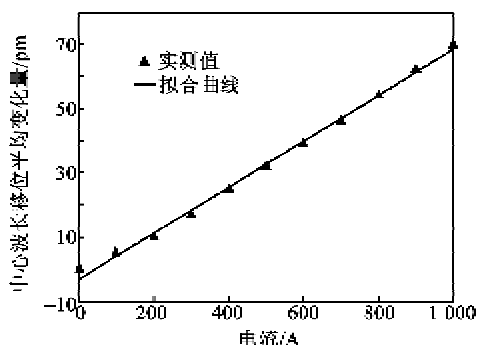


图4 中心波长移位平均变化量与电流关系拟合曲线

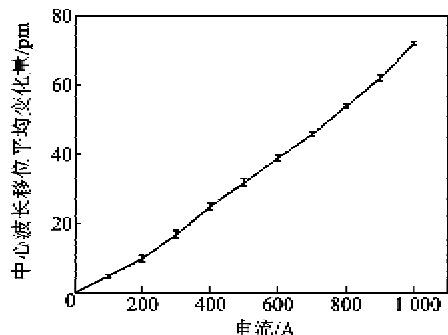


图5 电流测试实验误差棒图

电流传感器所测电流与光纤 Bragg 光栅中心波长移位呈线性关系,对于线性传感器来说,灵敏度即是拟合直线的斜率。因此,由图 4 可知电流传感器的灵敏度为 0.071 8 pm/A。实验测试得到的灵敏度与理论计算的灵敏度有一定差距,产生此差距的

原因可能是由于实验条件的限制,被测大电流只产生到 1 000 A,经过理论推理可知,传感器随着电流变大,测量效果会更好。

电流传感器的非线性误差反映了传感器的实际输入、输出特性曲线对于拟合直线的偏离程度,即

$$e_{\text{NL}} = \pm \frac{\Delta\lambda_{\text{max}}}{y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (14)$$

由图 4 可知,增加、降低电流过程中与拟合直线的最大波长偏差值为 $\Delta\lambda_{\text{max}} = 2.5 \text{ pm}$, $y_{\text{FS}} = 72 \text{ pm}$, 因此电流传感器的非线性误差为 3.47%FS。

电流传感器的滞后误差反映了传感器迟滞是传感器在输入电流从小变大并从大到小变化的过程中输入和输出曲线的不重合的程度,即

$$e_{\text{H}} = \pm \frac{\Delta H_{\text{max}}}{y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (15)$$

由图 5 可知,增加电流和降低电流过程中最大波长偏差值为 $\Delta H_{\text{max}} = 3 \text{ pm}$, 因此电流传感器的滞后误差为 4.17%FS。

电流传感器的重复性误差反映传感器在同一约定负荷且同样条件下反复施加输入量时所获得的随机误差,即

$$R = \frac{\Delta_{\text{max}}}{y_{\text{FS}}} \times 100\% \quad (16)$$

通过反复实验,增加、降低电流实验波长之间的最大偏差,如表 1 所示。

表1 多次实验的最大波长差值

电流/A	增加/pm	降低/pm
0	0	0
100	1	3
200	2	2
300	1	2
400	3	3
500	3	3
600	3	3
700	2	1
800	1	3
900	1	1
1 000	1	1

由表 1 可知, $\Delta_{\text{max}} = 3 \text{ pm}$, 因此电流传感器的重复性误差 $R = 4.17\% \text{FS}$ 。

4 结束语

本文研制的基于 Rogowski 线圈的光纤 Bragg 光栅电流传感器,可测量高压大电流,高压侧无需电源,封装结构的设计使光纤 Bragg 光栅的粘接无需

外加应力且对传感元件保护和增敏、体积小、结构简单。利用 Rogowski 线圈把高压侧大电流线性地转换为低电压,输出电压加在叠堆压电陶瓷上,由逆压电效应,叠堆压电陶瓷伸缩带动光纤 Bragg 光栅伸缩,将叠堆压电陶瓷的应变线性转换为光纤 Bragg 光栅的中心反射波长的移位,增加了温补光栅消除环境温度影响,通过测量光纤 Bragg 光栅中心反射波长的移位来测量电流的大小。同时,对传感器进行了理论推导,建立了电流传感器的测量模型,实现了间接测量电流的方法。通过实验数据的分析,验证了波长变化与电流大小的对应线性关系。测试结果表明,该电流传感器的灵敏度为 0.0718 pm/A ,非线性误差为 $3.47\% \text{ FS}$,滞后误差为 $4.17\% \text{ FS}$,重复性误差为 $4.17\% \text{ FS}$ 。

参考文献:

- [1] 张文亮,吴维宁,胡毅.特高压输电技术的研究与我国电网的发展[J].高电压技术,2003,29(9):16-18.
ZHANG Wenliang, WU Weining, HU Yi. Research on UHV transmission technology and development of power network in China[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 16-18.
- [2] 曾南超. 高压直流输电在我国电网发展中的作用[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 11-12.
ZENG Nanchao. Role of HVDC transmission in the power system development in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 11-12.
- [3] 余有龙,叶红安. 光纤光栅电流传感器[J]. 光学学报, 2001, 21(5): 586-588.
YU Youlong, YE Hong'an. Fiber Bragg grating current sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(5): 586-588.
- [4] WANG Tingyun, LUO Chengmu, ZHENG Shengxuan. A fiber optic current sensor based on a differentiating Sagnac interferometer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(3): 705-708.
- [5] 聂一雄,尹项根,张哲,等. 对光纤电流传感器应用中若干问题的探讨[J]. 高压电器, 2001, 37(1): 27-31.
NIE Yixiong, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Some discussions about the application of optical fiber current transducer[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(1): 27-31.
- [6] 陈钦生,杨淑连. 双光纤布拉格光栅电流传感器[J]. 应用激光, 2007, 27(4): 338-341.
CHEN Qinsheng, YANG Shulian. A novel current sensor based on a couple of fiber Bragg gratings[J]. Applied Laser, 2007, 27(4): 338-341.
- [7] WATEKAR P R, JU S, KIM S. A development of a highly sensitive compact sized optical fiber current sensor[C]//Guangzhou: OSA Optics Express, 2010, 18(16): 17096-17105.
- [8] 孙作彬. 光纤光栅直流大电流传感器研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [9] YI B, CHU C B, CHIANG K S. Temperature compensation for a fiber Bragg grating based magnetostrictive sensor[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 36(3): 211-213.
- [10] 赵洪霞,鲍吉龙. 一种新颖的光纤光栅电流传感器[J]. 量子电子学报, 2005, 22(6): 951-954.
ZHAO Hongxia, BAO Jilong. A novel fiber Bragg grating current sensor[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2005, 22(6): 951-954.
- [11] 李川,王振. 一种基于罗氏线圈的压电驱动式光纤 Bragg 光栅电流传感器及其使用方法: 中国, 201310067212.7[P]. 2013-03-05
- [12] 李川,张以谟,赵永贵. 光纤光栅原理、技术与传感应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] 杨光,黄俊斌,顾宏灿,等. 低频光纤 Bragg 光栅加速度传感器实验[J]. 四川兵工学报, 2011(7): 99-101.
YANG Guang, HUANG Junbin, GU Hongcan, et al. Experimental research of low frequency fiber Bragg grating accelerometer[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011(7): 99-101.