

DOI: 10.7667/PSPC170068

光学电流互感器关键技术研究

樊占峰^{1,2}, 白申义², 杨智德², 李刚², 田志国², 宋国兵¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 以光学互感器瞬时值测量的“迅捷、同步和高分辨率”为需求, 对光学互感器温度特性、温度补偿技术及光学互感器抗振技术进行了研究, 经过试验和对比测试分析, 提出了对应的改进措施。采用反射式光路结构, 以 HB Spun 光纤为 Faraday 传感材料, 利用柔性支撑工艺技术制成传感光纤环, 设计了全光纤电流互感器的结构方案, 并优化了检测电路设计。研制了高精度、柔性结构暂态全光纤电流互感器。测试结果表明, 全光纤电流互感器在-40~70 °C 全温度范围内准确度达到 0.2 级。

关键词: 全光纤电流互感器; 温度补偿; 抗振技术; 检测电路; 柔性结构; 0.2 级

Research on key technology of optical current transformer

FAN Zhanfeng^{1,2}, BAI Shenyi², YANG Zhide², LI Gang², TIAN Zhiguo², SONG Guobing¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The characteristics of temperature, the temperature compensation technology and the anti-vibration technology of the optical transformer are researched based on the demands of "fast, synchronous and high resolution" which are instantly measured by the optical transformer, the corresponding improvement measures are put forward through test and contrast testing analysis. The reflective optical structure is used, the HB Spun fiber is used for Faraday current material, a current fiber loop is made by using the flexible support technology, the structure of an all-fiber current transformer is designed, and the design of detection circuit is optimized. An all-fiber current transformer with high precision and flexible structure transient is developed. The test results show that the accuracy of all-fiber current transformer reaches to 0.2 class in the whole temperature range of -40~70 °C.

This work is supported by Major Scientific and Technological Achievements Transformation and Cultivation Project of Beijing Municipal Science & Technology Commission (No. Z121100003012018).

Key words: all-fiber current transformer; temperature compensation; anti-vibration technology; detection circuit; flexible structure; 0.2 class

0 引言

国家坚强智能电网的安全可靠、清洁高效、自愈可调的运行目标, 对继电保护的速动性和可靠性提出了更高的要求。同时大规模新能源接入电网、交直流混联电网、柔性输电等给继电保护带来了适应性问题^[1-2]。

高精度的光学互感器能够完全保真地反应电力系统一次电流、电压信息的全息特点, 在故障期间, 光学互感器能利用宽频带信息识别被保护对象拓扑结构改变和参数改变, 进而基于这些改变构造保护

判据实现故障甄别, 解决了目前仅利用工频量的继电保护灵敏度不足的问题和仅利用暂态量的继电保护可靠性不高的问题^[3-8]。

光学电流互感器有很多传统电流互感器无法比拟的优点, 但线性双折射效应会对测量结果产生影响。温度、振动等都会引起线性双折射。光学互感器传感器所受温度影响主要来自于温度变化引起的应力双折射, 在非均匀温度场中, 由于温度的不均匀使得制作传感头的玻璃、光学器件及他们之间发生非均匀的热膨胀, 从而使之产生内应力, 引起附加温度应力双折射, 直接影响线偏振光的偏转角, 导致难以消除的测量误差。振动引入的双折射也是导致光纤输出偏振光噪声的主要原因之一, 由于线性双折射效应与光纤形变、光纤内部应力、光源光

波长、环境温度、振动等许多因素相关，系统输出将会受到这些量的调制，这会使系统的测量灵敏度随上述量而变化。因此，基于全光纤电流互感器的工作原理，对光学互感器温度特性关键技术、温度补偿技术和光学互感器抗振技术进行了研究，并对样机进行了试制和现场试运行。

1 全光纤电流互感器工作原理

全光纤电流互感器是基于 Faraday 磁光效应和安培环路定理，通过测量由被测电流引起的磁场强度的线积分来间接测量电流^[9]。目前全光纤电流互感器数字闭环系统结构如图 1 所示，全光纤电流互感器数字闭环系统由光学系统、传感光纤元件、信号处理系统三部分构成。光学系统实现光信号的产生、转换；传感光纤元件将载流导体中的电流转换为两束相干光的相位差信息；信号处理系统实现对光信号调制与解调，计算待测电流。

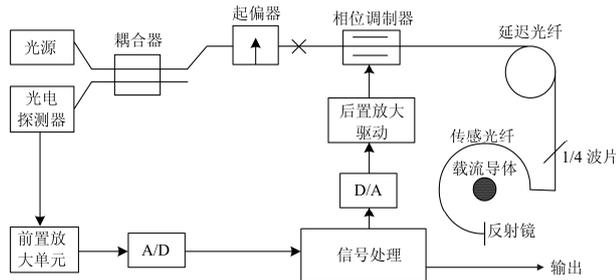


图 1 全光纤电流互感器数字闭环系统结构图

Fig. 1 Structure of digital closed-loop system for all-fiber current transformer

由于携带相位信息的两束光在同一个光路中传输，因此温度、振动等外界因素对两束光的影响相同，则避免了外界因素对测量结果的影响，最终得到了两束光相位差与被测电流之间有着严格的对应关系^[10]。理想情况下，数字闭环全光纤电流互感器输出相移与被测电流之间关系为

$$\varphi_F = 4VNI \tag{1}$$

式中： φ_F 为 Faraday 磁光效应偏转角； V 为传感光纤 Verdet 常数； N 为传感光纤匝数； I 为待测电流。

2 光学互感器温度特性关键技术研究

无源电子式互感器研制过程中采用的光纤、晶体、分束器、光学调制器、光源、探测器、电子元器件以及生产过程中采用的工艺，容易受环境温度影响，从而影响光学电子式互感器的高低温度特性^[11-12]。因此，针对无源电子式互感器的光路和工艺的温度特性进行研究，并提出解决措施。

2.1 光学器件温度特性

无源电子式电流互感器采用的光源为超辐射发光二极管(SLD)，为宽谱光源，多数情况下光谱宽度超过 30 nm。SLD 光源光谱的中心波长对波片、传感光纤等的工作状态都有影响。光谱中心波长改变后，波片的长度无法与之匹配，将对无源电子式电流互感器性能指标带来影响。

当光源驱动电流恒定时，无源电子式互感器采用的 SLD 光源的中心波长随工作温度的变化而改变，为此，提出了光源闭环反馈控制回路。有效地抑制了 SLD 光源中心波长的温度漂移。光源闭环反馈控制回路包括 SLD 光源、Lyot 消偏器、耦合器、探测器、处理电路和驱动电路，如图 2 所示。

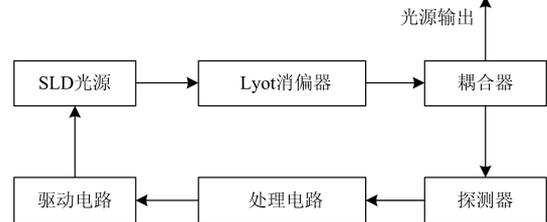


图 2 光源闭环反馈控制回路图

Fig. 2 Feedback control circuit of illuminant closed-loop

采用光源闭环反馈控制技术，可以使 SLD 光源管芯在一个比较恒定的范围内工作，通过测试四个不同光源在 -40~70 °C 范围内的管芯温度，管芯温度波动都小于 0.35 °C。

通过控制光源管芯温度，可以稳定光源的中心波长。分别在 -40 °C、-20 °C、0 °C、20 °C、40 °C、70 °C 等六个温度点进行 SLD 光源的光谱测试，测试光源中心波长随温度变化的漂移。SLD 光谱测试如图 3 所示。

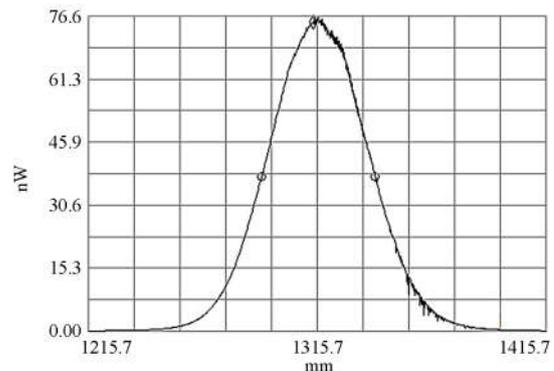


图 3 SLD 光谱测试图

Fig. 3 Test chart of SLD spectrum

记录光谱的中心波长，并计算全温 -40~70 °C 范围内中心波长的变化量，试验数据表明：-40~70 °C 温度范围内，SLD 光源中心波长最大变化量为：1.7

nm, 与光源 49.5 nm 的谱宽相比可以忽略。

由此可见采用光源反馈控制技术后, 光源对无源电子式互感器温度性能的影响基本可以忽略。

2.2 1/4 波片温度特性

传感环光路中的 $\lambda/4$ 波片的延迟量也随温度而变化, Frosio 和 Dandliker 详细分析了 $\lambda/4$ 波片误差产生的影响。他们指出光学互感器的标度因数为 $4/NI \sin(\psi)$, 式中, ψ 为 $\lambda/4$ 波片的相位延迟, 当该波片为理想的 $\lambda/4$ 波片时, $\psi = \pi/2$ 。因此, 较差的波片产生的误差为二阶分量, 并且在较大的温度范围内影响较大。比如, 由于温度的变化, ψ 改变了 $\pm 4.5^\circ$, 标度因数因此改变了 -0.3% 。

通过分析得出, 维尔德常数随温度变化的特性是确定的, 大约为 0.7×10^{-4} , 而 $\lambda/4$ 波片的偏移量随温度变化的曲线与偏置点有关, 通过设定波片工作点就可以得出与维尔德常数的曲线斜率相反的曲线, 如图 4 所示, 从而在光学上抵消敏感光纤维尔德常数的温度变化量, 即实现了光学自补偿, 大大提高了敏感头的温度稳定性。

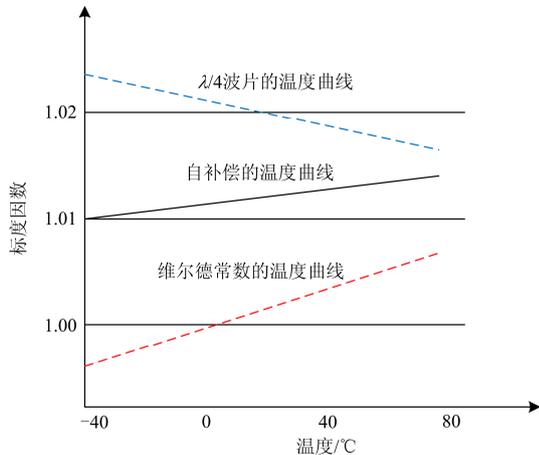


图 4 光路参数自补偿技术示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the auto-compensation technology of optical path parameters

通过 $\lambda/4$ 波片的制备与温度补偿, 将光学互感器全温度范围误差由 1% 提高至 0.2%。补偿效果如图 5 所示, 该补偿方法大大提高了波片的误差容限, 从而有效地提高了光纤电流互感器的标度因数稳定性。

2.3 保偏光纤耦合器温度特性

保偏光纤耦合器耦合区应力会随温度变化, 在 $-40 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度下的分光比变化约为 10%, 对测量精度有较大影响。因此, 提出保偏耦合器研制过程中选用模场匹配光纤, 采用了单模保偏熔结工艺和低应力的耦合器封装工艺技术, 降低温度应力的影响, 图 6 所示为保偏光纤耦合器封装结构图。

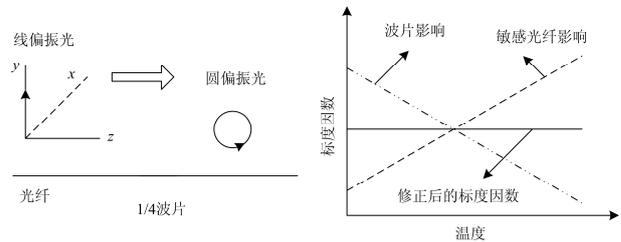


图 5 1/4 波片温度补偿效果示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 1/4 plate temperature compensation effect

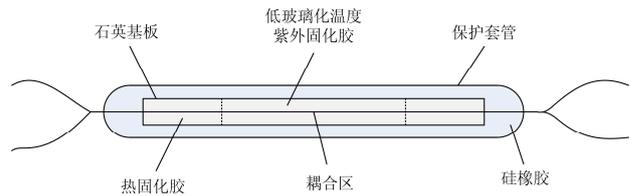


图 6 保偏光纤耦合器封装结构图

Fig. 6 Packaging structure of polarization-maintaining fiber coupler

通过对保偏光纤耦合器分光比高低温测试结果分析, $-40 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度范围内耦合器分光比的变化率为 1.3%, 低于 $-40 \sim 70^\circ\text{C}$ 温度下分光比 10% 的变化率。

2.4 相位调制器温度特性

图 7 所示为条形波导连接光路。将条形波导放入高低温箱中, 对条形波导输出光的中心波长和消光比的变化进行监测。测试结果如表 1 所示。



图 7 条形波导温度特性测试光路

Fig. 7 Testing path of strip waveguide temperature measurement

从测试结果可知, 条形波导在全温范围内中心波长变化 0.7 nm, 因光源为宽谱光源, 谱宽超过 40 nm, 因此中心波长的变化对系统整体特性的影响可以忽略; 全温范围内消光比变化 0.4 dB, 经测试, 这样幅度的消光比变化基本不会对系统特性产生影响。因此在全温范围内条形波导的技术指标满足暂态光学互感器的使用要求。

2.5 光纤环温度特性

传感光纤中的线性双折射同电流产生的法拉第磁致旋光效应一样, 会造成偏振光偏振面的旋转, 产生一个与法拉第磁致旋光效应无法区分的误差信号, 从而造成光纤电流互感器的测量误差。光纤敏感环的线性双折射是影响全光纤电流互感器高低温

下的测量性能的主要因素。

表 1 温度循环准确度试验测试结果

Table 1 Testing results of temperature cycling accuracy test

温度/℃	中心波长/nm	消光比/dB
+25	1312.2	23.6
+10	1311.8	23.7
0	1312.1	23.5
-10	1311.9	23.6
-30	1311.9	23.6
-20	1311.7	23.3
-40	1312.0	23.4
-30	1312.0	23.5
-20	1312.2	23.3
-10	1312.1	23.5
0	1312.2	23.5
+10	1312.2	23.5
+20	1312.3	23.5
+30	1312.2	23.6
+40	1312.3	23.6
+50	1312.3	23.7
+60	1312.2	23.6
+70	1312.2	23.6
+40	1312.2	23.6
+25	1312.1	23.6
均值	1312.1	23.5
变化	0.7	0.4

研究全温范围内通过光纤环后的光谱特性和偏振特性的变化情况，将 SLD 光源、耦合器、波导器件顺序焊接好，光纤环一端焊接波导，另一端插入适配器中，将光纤环放入高低温内，测量插入适配器一端的光纤在全温范围内光谱和偏振度的变化。对比两种光纤环的测试结果，如图 8 和图 9 所示。

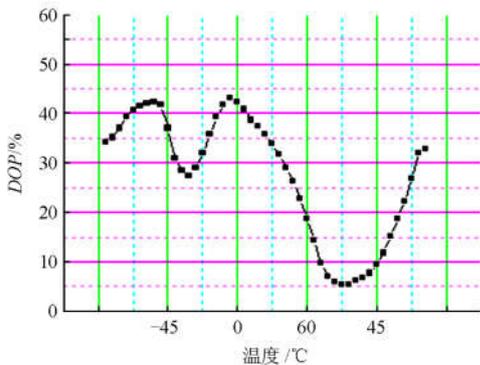


图 8 光纤环 1 的偏振度变化

Fig. 8 Polarization variation of fiber loop 1

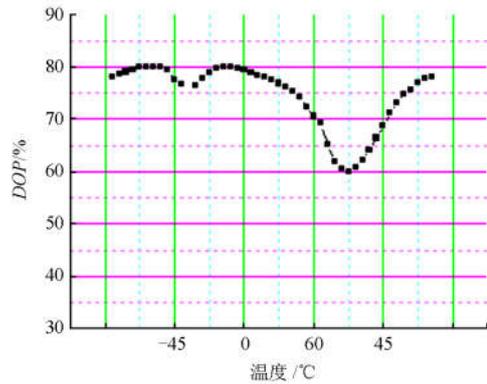


图 9 光纤环 2 的偏振度变化

Fig. 9 Polarization variation of fiber loop 2

分析可知，高低温对经过光纤环的光的光谱有一定影响，基本上光纤长度越长，影响越大；对经过光纤环的光的偏振度影响很大，尤其是高温(70 °C)环境下，光纤长度越长所受影响也越大，因此，适当选取光纤环的长度对于光学电流互感器温度稳定性具有重要作用。此外，在光纤环的绕制时选用高强度、低热膨胀系数、高尺寸稳定性的材料来提高结构的刚度，防止结构变形，从而提高光纤环在高低温下的稳定性能。

3 温度补偿技术研究

无源电子式电流互感器的输出可表示为

$$I(T, i) = K(T)f(i) \quad (2)$$

式中： T 为环境温度； i 为一次电流值； $K(T)$ 为温度系数，可表示为式(3)。

$$K(T) = \frac{1}{1 + \varepsilon(T)} \quad (3)$$

式中， $\varepsilon(T)$ 为无源电子式电流互感器不同温度下比差测试结果。

通过测试不同温度下无源电子式电流互感器的比差数据，便可解算出该互感器的温度系数，从而建立该互感器的温度模型，然后通过软件的方法实现对无源电子式电流互感器的温度补偿。同理，该方法也适用于角差数据的温度补偿。

无源电子式电流互感器温度建模试验条件如下：

- (1) 温度为 -40~70 °C；
- (2) 温变率为 20 K/h。

温度建模试验过程中，每 10 min 记录一次互感器的准确度和温度数据，试验完成后，用最小二乘法将测试数据拟合成无源电子式电流互感器的温度模型。并将温度模型写入无源电子式电流互感器电气单元软件，实现对互感器的温度补偿。

无源电子式电流互感器温度补偿前后的准确度测试数据如图 10 和图 11 所示。

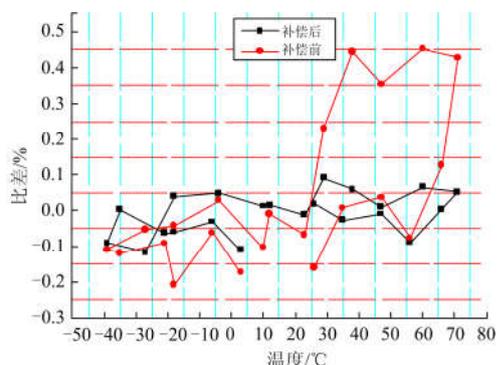


图 10 光学电流互感器温度补偿前后比差测试结果
Fig. 10 Ratio error testing results of the optical fiber current transformer before and after temperature compensation

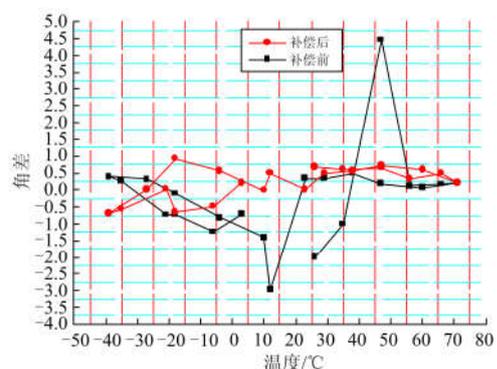


图 11 光学电流互感器温度补偿前后角差测试结果
Fig. 11 Angle difference testing results of optical current transformer before and after temperature compensation

图 10 中, 在温度补偿前, 比差数据在-40~70 °C 温度范围内的波动范围为: -0.25 %~0.45 %, 只能满足国标 GB/T 20840.8 中 0.5 级的准确度要求; 温度补偿后, 比差数据在-40~70 °C 温度范围内的波动范围为: -0.15 %~0.1%, 满足国标 GB/T 20840.8 中 0.2 级的准确度要求。

图 11 中, 在温度补偿前后, 角差数据在-40~70 °C 温度范围内均能满足国标 GB/T 20840.8 中 0.2 级的准确度要求, 但补偿后角差数据的波动范围明显优于补偿前。

因此, 无源电子式电流互感器采用温度补偿技术之后, 在-40~70 °C 温度范围内, 准确度性能指标有了明显改善。

4 光学互感器抗振技术研究

传统的光学互感器中, 传感光纤是缠绕在特制的骨架上的, 骨架的振动和热胀冷缩等效应会影响

传感光纤的性能, 导致电流互感器易受到温度和振动的影响。同时光纤在缠绕时会产生应力, 长时间运行的过程中, 应力可能会逐渐释放, 对互感器的测量结果产生影响。因此通过改善光纤缠绕工艺, 减少光纤在骨架上所受的应力影响, 开发了一种新的柔性支撑缠绕技术。如图 12 所示, 在缠绕骨架的外围均匀涂抹一层柔性材料对光纤进行支撑, 此柔性支撑材料可以是凝胶或其他低弹态材料, 传感光纤相当于浸没在柔性材料中, 并不与缠绕骨架紧密结合, 因此不会受到骨架热胀冷缩的影响, 同时有振动时, 光纤会受到柔性材料的约束, 不会产生摆动, 采用此工艺的互感器可以基本不受到振动的影响。光纤和柔性材料的膨胀系数近似相等为 $5.5 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 。此种采用柔性支撑缠绕工艺的传感环结构用于光纤互感器支柱式安装结构。

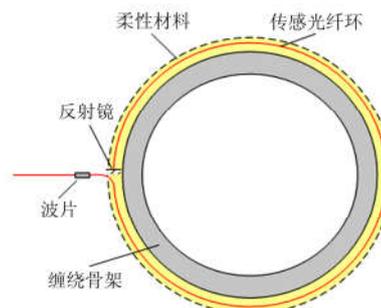


图 12 采用柔性支撑缠绕工艺后的传感环结构
Fig. 12 Sensing loop structure using flexible support winding process

5 外卡式暂态光学互感器样机研制

暂态光学互感器样机采用反射式光路结构, 以 HB Spun 光纤为 Faraday 传感材料, 采用柔性支撑工艺制成传感光纤环, 系统主要部件如图 13 所示。

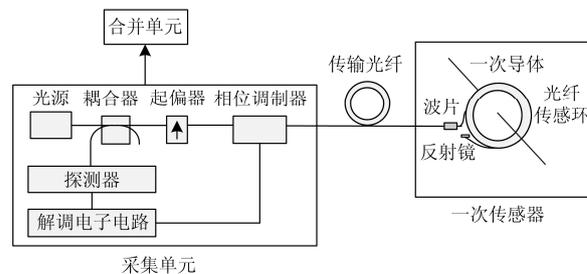


图 13 光学电流互感器系统主要器件

Fig. 13 Main components of optical current transformer system

一次本体为光学电流互感器安装在一次端的部分, 内装光纤电流传感环, 光纤传感环感应一次电流信号, 通过由保偏光纤制成的传输光缆传送到采

集单元中。一套传感光纤环同时感应测量电流和保护电流信号。由于无源光学互感器存在的长期稳定性问题以及装配在 GIS 罐体中需要往外引出传感光纤时的气密性问题,设计了外卡式光学电流互感器,适用于 GIS 一次设备上。GIS 罐体无需拆解,可直接将光学电流互感器壳体卡在 GIS 设备上,安装方便,无需考虑气密性问题,同时也适用于旧站改造。

全光纤电流互感器中用于实现电流检测的核心是光纤传感器,由传感光纤和采集器组成。

5.1 结构方案

全光纤电流互感器方案设计原理图如图 14 所示。

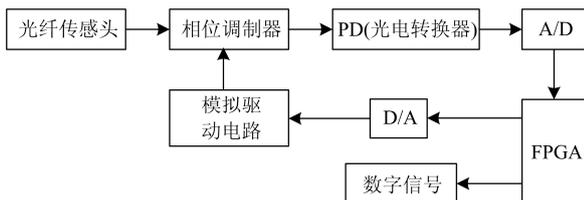


图 14 全光纤电流互感器光路原理图

Fig. 14 Optical path principle diagram of the all-fiber current transformer

根据上述方案图,光纤传感头设计利用专用传感光纤加反射镜制成,传感光纤的作用是将待测电流引起的磁场信号通过法拉第磁光效应转换为光纤中偏振光的相位信号;相位调制器选用直波导相位调制器,实现光信号调制及闭环反馈控制;FPGA 完成数字信号处理及闭环控制,实现对电流信号解调。

采集器为传感光纤提供光源,同时接受返回的光信号,光电转换后采用闭环,从而实现电流的检测与传变。

5.2 检测电路设计

系统选用 FPGA 和 DSP 设计成信号处理单元,利用 FPGA 建立各个时序^[13-14],生成中断信号等;发挥 DSP 的高速运算特点对数据进行处理。两者之间采用中断方式实现通信。检测系统如图 15 所示,检偏器输出的信号经 A/D 转换送到 FPGA 和 DSP 中,运算后通过模拟多路开关形成调制方波,经 D/A 转换形成模拟输出、数字输出和有效值显示。

FPGA 主要建立各个时序,利用锁相环产生基准时钟进行分频,分别得到 A/D 时钟、采样脉冲、调制方波和解调方波等时序。在 FPGA 中进行解调后向 DSP 发送中断请求,DSP 响应中断后,对数据进行积分和滤波处理。处理完成后再把数据送回 FPGA,进行一系列输出。

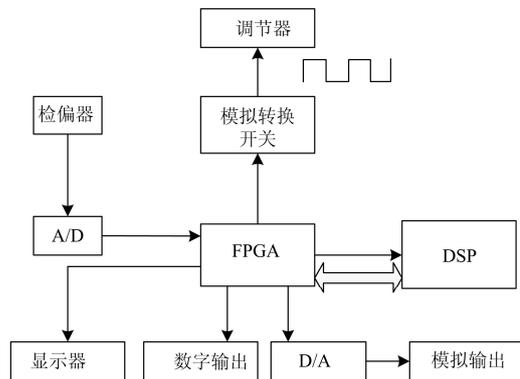


图 15 检测电路

Fig. 15 Detection circuit

5.3 样机研制

基于以上技术方案,设计了外卡式光学电流互感器^[15-16],结构如图 16 所示,整个结构采用对接方式,主要由光纤传感环、壳体、调制电路和光路处理单元组成。壳体分为上、下两部分,传感光纤和光路调制、处理模块放置在壳体内。和支柱式光纤互感器结构不同,外卡式光学电流互感器所用的传感光纤如图 17 所示。光纤在壳体绕制两层,光纤的直径为 13 mm,其中传感光纤内部采用工艺技术已加装有柔性材料。

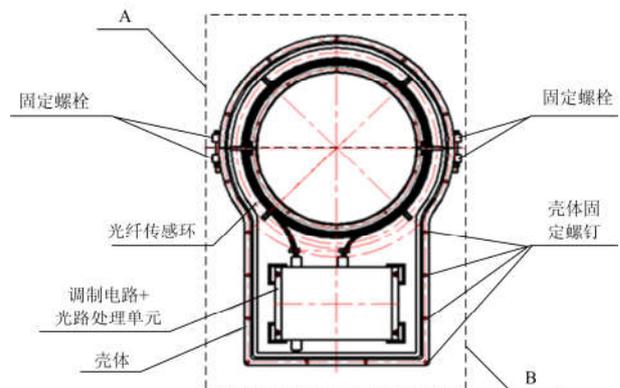


图 16 外卡式光学电流互感器结构

Fig. 16 Card type optical current transformer structure



图 17 传感光纤

Fig. 17 Sensing fiber

对于安装好的 GIS, 在现场只需将图 16 中的壳体固定螺钉拆卸掉, 把壳体上部分拆开, 将绕制的光纤传感环先整体收起来, 然后把左右两边的固定螺栓拆卸掉, 这样外卡式光学电流互感器结构就整体分为 A、B 两部分, GIS 罐体无需拆解, 外卡式光学电流互感器通过 A、B 两部分就很容易套装固定在 GIS 设备上面。通过固定螺栓将 A、B 两部分紧固后, 把传感光纤重新按照原来的绕制方法绕制在壳体内, 光纤周围有固定装置, 可以将光纤可靠地固定, 以免时间长引起光纤脱落。在现场将壳体紧固后, 加上盖板进行密封, 互感器无需充气, 无需考虑绝缘, 安全易操作。光学互感器整机如图 18 所示。



图 18 外卡式光学电流互感器样机

Fig. 18 Card type optical current transformer prototype

6 准确度测试试验

在额定频率下, 连续施加额定电流, 并且测试过程中产品一直处于正常工作状态, 在 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内选择温度点进行测试, 测试结果如表 2 所示。

表 2 准确度试验测试结果

Table 2 Accuracy test results

测试点	试验温度/ $^{\circ}\text{C}$	通道	In%	比差/%	角差/ $^{\circ}$
1	20	3	100	-0.032	-1.121
2	70	3	100	-0.045	-4.356
3	70	3	100	-0.110	+3.622
4	20	3	100	-0.021	-1.132
5	-40	3	100	-0.136	+5.678
6	-40	3	100	-0.138	+5.356
7	20	4	100	+0.107	-0.016
8	70	4	100	+0.097	+5.470
9	70	4	100	+0.046	+5.867
10	20	4	100	+0.010	+4
11	-40	4	100	-0.176	+6.567
12	-40	4	100	+0.188	+5.679

从测试结果可以看出, 研制的全光纤电流互感器样机在 $-40\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全温度范围准确度达到 0.2 级, 相位误差小于 $10'$ 。

7 结论

研制的光学电流互感器已在四川某 500 kV 和 220 kV 站进行了现场安装, 测试一切正常, 并投入试运行, 试运行期间, 设备未发生异常情况, 其准确的暂态测量为控制保护提供了准确的测量依据。从温度、抗振动等方面进行的研究和提出的改进措施, 保证了整机的稳定性及可靠性。

下一阶段主要的研究工作是高可靠全光纤光学互感器数据采集及调制技术研究, 主要从以下两方面开展: 1) 通过引入可编程增益放大器, 对小信号进行特殊处理, 消除外界小信号时的噪声干扰和 AD 本身的量化误差, 提高小信号采集的精度; 2) 通过分析全光纤电流互感器数字闭环系统的光学系统、传感光纤元件和信号处理系统, 得出传感光纤元件载流导体中两束相干光的相位差信息; 由采集单元信号处理系统实现对光信号调制与解调, 计算待测电流。通过以上两方面的研究, 进一步提高暂态光学互感器的可靠性和精度。

参考文献

- [1] 韩璐, 李凤婷, 王春艳, 等. 风电接入对继电保护的影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 163-169.
HAN Lu, LI Fengting, WANG Chunyan, et al. A survey on impact of wind farm integration on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 163-169.
- [2] 裘愉涛, 潘武略, 倪传坤, 等. 风电场送出线等传变距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 61-66.
QIU Yutao, PAN Wulue, NI Chuankun, et al. Equal transfer process-based distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 61-66.
- [3] 黄江. CT 剩磁对继电保护装置的影响及饱和判据的改进[J]. 电器与能效管理技术, 2016(2): 16-22.
HUANG Jiang. Current transformer remanence effect on protective relaying device and improvement of CT saturation criterion[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(2): 16-22.
- [4] 梁仕斌, 文华, 曹敏, 等. 铁芯剩磁对电流互感器性能的影响[J]. 继电器, 2007, 35(22): 27-32.
LIANG Shibin, WEN Hua, CAO Min, et al. The effects of remanent in CT core[J]. Relay, 2007, 35(22): 27-32.
- [5] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J].

Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.

[6] 宋璇坤, 闫培丽, 肖智宏, 等. 全光纤电流互感器技术应用评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 149-154.
SONG Xuankun, YAN Peili, XIAO Zhihong, et al. Comment on the technology and application of fiber optic current transformer (FOCT)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 149-154.

[7] 肖智宏. 电力系统中光学互感器的研究与评述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 148-154.
XIAO Zhihong. Study and comment of the optical transformers in power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 148-154.

[8] 王夏宵, 王野, 王熙辰, 等. 全光纤电流互感器动态特性实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 9-14.
WANG Xiuxiao, WANG Ye, WANG Xichen, et al. Experimental research on dynamic characteristics of fiber optical current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 9-14.

[9] 张朝阳, 张春熹, 王夏宵, 等. 数字闭环全光纤电流互感器信号处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 42-46.
ZHANG Chaoyang, ZHANG Chunxi, WANG Xiuxiao, et al. Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 42-46.

[10] BLAKE J, TANTASWADI P, DE CARVALHO R T. In-line Sagnac interferometer current sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 116-121.

[11] 李岩松, 郭志忠, 杨以涵, 等. 自适应光学电流互感器的基础理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 21-26.
LI Yansong, GUO Zhizhong, YANG Yihan, et al. Research on the basic theory of adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 21-26.

[12] 徐雁, 叶妙元, 张庆, 等. 光电互感器的应用及接口问题[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 45-48.
XU Yan, YE Miaoyuan, ZHANG Qing, et al. Study on standard interfaces among optical electric transformer measurement and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 45-48.

[13] 任颖新. 基于FPGA的嵌入式系统应用研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
REN Yingxin. Application research of embedded system based on the FPGA[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[14] 王鑫, 许力, 李晓, 等. 基于FPGA的GOOSE报文解析模块设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 101-107.
WANG Xin, XU Li, LI Xiao, et al. Design and realization of GOOSE decoding module based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 101-107.

[15] 刘延冰, 李红斌, 叶国雄, 等. 电子式互感器原理、技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[16] 国家电网公司. 高压电气设备智能化技术导则: Q/GDW Z 410—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
State Grid Corporation of China. Technical guide for high voltage electrical equipment: Q/GDW Z 410—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.

收稿日期: 2017-01-13; 修回日期: 2017-07-05

作者简介:

樊占峰(1974—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事电力系统保护及控制等方面的研究工作;

白中义(1982—), 男, 高级工程师, 从事智能变电站过程层智能设备的研发设计工作; E-mail: bsy-3000@163.com

杨智德(1968—), 男, 高级工程师, 从事嵌入式保护控制软件平台开发工作。

(编辑 张爱琴)