

文章编号: 1005-5630(2013)01-0060-05

数字式全光纤电流互感器系统 建模与仿真技术研究*

宋曼, 张辉

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 利用数字式全光纤电流检测系统抗干扰能力强、完全电气隔离等优点, 在光纤电流传感器原理的基础上, 研究了一种小巧的、适用于高压端大电流检测的基于法拉第磁光效应偏振态调制的数字式全光纤电流检测系统, 改进了目前电力系统中使用的传统电磁式电流互感器。该研究应用保偏光纤有效抑制光纤中固有的线性双折射, 使用琼斯矩阵对光纤系统进行分析, 利用MATLAB仿真软件进行系统仿真, 通过理论分析和系统仿真验证了由数字式全光纤电流互感器测得的电流值与电流的实际大小一致, 所建立的系统数学模型和仿真模型正确可行。

关键词: 电力系统; 数字式; 全光纤; 保偏光纤; 电流互感器; MATLAB仿真

中图分类号: TB 971 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2013.01.012

Research on the modeling and simulation techniques of digital all-fiber current transformer

SONG Man, ZHANG Hui

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A small suitable digital all-optical current measurement system is studied which is presented under the principle of the optic-fiber current sensors, is used by the advantage of the strong anti-interference ability and the complete electrical isolation, aimed to solve the actual technical problems of the existing power system high voltage side current detection system, such as the strong electromagnetic interference, the complicated insulation system and the high cost of the maintenance and so on. This paper will improve the traditional electromagnetic current transformer in the power system. It used polarization maintaining fiber to inhibit the inherent linear birefringence in the fiber effectively, used Jones matrix to analysis of the fiber-optic system and used MATLAB simulation software to simulate the system. The theoretical analysis and system simulation have verified that the digital all-fiber current transformer measured current and the actual current is consistent. Shows that the system established mathematical model and simulation model is correct and feasible.

Key words: power system; digital; all-fiber; polarization maintaining fiber; current transformer; MATLAB simulation

* 收稿日期: 2012-05-28

作者简介: 宋曼(1986-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事现代精度理论及其应用方面的研究。

引言

随着电力系统的不断发展,对互感器的要求越来越高,而传统的电磁式电流互感器在运行中渐渐暴露出一些严重的缺点,已经很难满足数字化电站的要求。目前的市场情况是,电力系统广泛采用的仍是电磁式电流互感器,它有以下特点:(1)一次绕组中的电流完全取决于被测电路的一次电流大小而与二次电流无关;(2)它的二次绕组与测量仪表、继电器等的电流线圈串联。由于测量仪表和继电器等的电流线圈阻抗都很小,因此它的正常工作状态接近于短路;(3)它在运行中不允许二次侧开路。如果二次侧开路,则二次电流值为零,这时电流互感器的一次电流全部用来励磁,铁芯中的磁通密度将会大幅度增加,从而引起铁芯中的有功损耗增大、铁芯过热,最终导致电流互感器损坏。同时由于铁芯磁通密度剧烈增加,故互感器的二次绕组中的感应电压峰值可达到数千伏之高^[1]。如此高的电压必将对设备绝缘和运行人员的安全都造成危险。为了有效防止电流互感器的二次侧开路,对运行中的电流互感器,当需要拆开所连接的仪表和继电器时,必须先短接其二次绕组,进行泄放电。上述电磁式电流互感器的特点表明:传统式电流互感器绝缘结构复杂、尺寸大、运行成本高、造价高,最重要的是测量准确度无法保证。因此,研究新型的数字全光纤式电流互感器以取代传统电磁式电流互感器已成为社会发展的一个必然趋势,所研究的系统是基于法拉第效应偏振态调制的全光纤电流检测系统,采用的传感元件为保偏光纤制作的电流传感头。

1 全光纤电流互感器系统原理

目前光纤系统主要选用半导体光源,其主要原因是:半导体光源的发光波长在光纤的低损耗窗口中传输,电流注入发光可以进行强度调制;光源体积小,发光面积可以与光纤纤芯匹配,从而提高光源与光纤的耦合效率;可靠性高,高温下可以连续工作;响应速度快,光束的相干性好,适合于高速率、大容量的光纤系统;具有结构紧凑、重量轻、使用方便、工作寿命长,单色性好等优点。全光纤电流互感器是基于法拉第效应偏振态调制的原理来实现对电流的测量的^[2],系统结构框图如图1所示。工作时光源发出的光经过耦合器后由光纤偏振器起偏,起偏之后进入传感光纤即保偏光纤之中。保偏光纤缠绕在通过大电流的导线周围,由于传输中的大电流产生磁场,以及保偏光纤中的法拉第磁光效应偏振态调制作用,偏振光的偏振态发生改变,携带偏振态信息的偏振光经过检偏器之后,进入光电探测器。光电探测器接收到的是电流信号,需要再通过转换电路转换成电压信号,鉴于光电探测器接收到的信号只有微安数量级,所以还必须进行信号放大与电路调理,最终经过比例因子转换得到光纤电流互感器的电流信息。

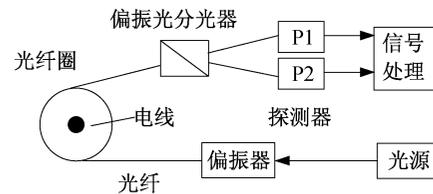


图1 全光纤电流互感器的系统框图

Fig.1 The system block diagram of the all-fiber current transformer

2 全光纤电流互感器系统建模

对利用保偏光纤作为大电流传感头的全光纤电流检测系统进行琼斯矩阵分析^[3],可以得到:

$$\mathbf{E} = \mathbf{J}'_A \mathbf{J}'_F \mathbf{E}_{in} \quad (1)$$

假设检偏器与实验室坐标系的夹角为 γ ,则检偏器渥拉斯顿棱镜的 Jones 矩阵为:

$$\mathbf{J}'_A = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

保偏光纤的 Jones 矩阵和输入的线偏振光 Jones 矩阵分别为:

$$\mathbf{J}'_F = \begin{bmatrix} \cos(\rho L) & \sin(\rho L) \\ -\sin(\rho L) & \cos(\rho L) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 \end{bmatrix} \mathbf{E}_o \quad (4)$$

其中 ρ 表示旋光率, L 表示光在保偏光纤中通过的距离, θ_1 表示偏振方向与 x 轴的夹角, 将式(2)~式(4)代入式(1)得:

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\rho L) & \sin(\rho L) \\ -\sin(\rho L) & \cos(\rho L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \mathbf{E}_0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 - \gamma - \rho' L) \\ \sin(\theta_1 - \gamma - \rho' L) \end{bmatrix} \mathbf{E}_0 \quad (5)$$

则可以得出通过检偏器之后, 光探测器上得到的光强为:

$$\mathbf{I}_v = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta_1 - \gamma - \rho' L) \\ \sin^2(\theta_1 - \gamma - \rho' L) \end{bmatrix} \mathbf{E}_0^2 \quad (6)$$

其中, E_0^2 为光源光功率, $\rho = \left[\left(\frac{\Delta\beta}{2} \right)^2 + r^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, $\Delta\beta$ 表示均匀线双折射, $r = \tau - C$, τ 为光纤的扭转率, C 为常数。若法拉第效应引起的双折射为 $2F$, 则:

$$\rho' = \left[\left(\frac{\Delta\beta}{2} \right)^2 + r'^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中, $r' = \tau - C' + F$, $F = VNI$, V 为 Verdet 常数, $V = 1.086 \times 10^{-16}$, N 为环绕电流的匝数, I 为导线中通过的电流。对于保偏光纤, 通常有 $\tau - C' \gg F$, $2\tau \gg \Delta\beta$, 则:

$$\rho' \approx (\rho + F) \quad (8)$$

$$\varphi_F = FL = VNIL \quad (9)$$

由于全光纤电流检测系统的输出信号受到光源光功率的影响, 因此需要采取相应的措施来消除光源光功率波动对系统产生的影响。系统采用测量臂与参考臂相比较的方法来消除上面的影响, 通常对 I_1 , I_2 进行如下处理^[4]:

$$S = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \cos^2(\theta_1 - \gamma - \rho' L) \quad (10)$$

由式(10)可知, 上述的信号处理方式消除了光源功率的波动对测量输出信号所造成的测量误差。但是, 在实际测量系统中, 这种信号处理方式对于两个探测光路的对称性要求非常高, 而这一点很难做到^[5], 所以会引入一定的误差。还有环境等因素的影响, 受到干扰会比较多, 因此选用了一种改进的光路结构来进行信号处理, 其光路图如图 2 所示。

在光源半导体激光器处增加 50:50 的光耦合器, 将光源发出的光分成相同的两束光, 并分别进入测量臂和参考臂^[6]。其中参考臂的光信号通过光纤直接进入光电探测器, 与保偏光纤的测量信号进行对比, 以此来消除光源光功率波动对测量造成的不良影响。另外要使检偏器远离被测电流, 减少大电流电线附近的不良干扰, 同时保持保偏光纤输出的偏振状态^[7]。

3 全光纤电流互感器的系统仿真

为了简化仿真模型, 将全光纤电流互感器系统的每个建模部分用简化模型来代替, 如图 3 所示的即为全光纤电流互感器系统的仿真模型^[8]。

各主要部分的仿真模型如下: 图 4 是光源的简化模型; 图 5 和图 6 分别为起偏器和检偏器的仿真模型; 图 7 是子系统 3 即保偏光纤传感头的仿真模型, 由子系统 1 和子系统 2 构成; 图 8 为光电探测器的仿真模型。

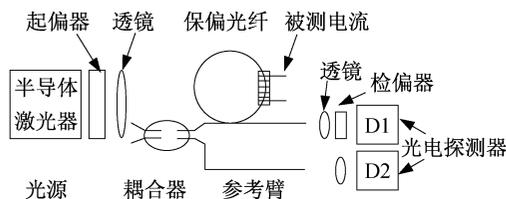


图 2 改进型全光纤电流互感器光路图

Fig. 2 The optical path of the improved all-fiber current transformer

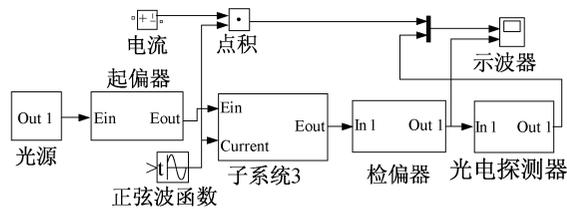


图 3 全光纤电流互感器系统仿真模型

Fig. 3 The system simulation model of the all-fiber current transformer

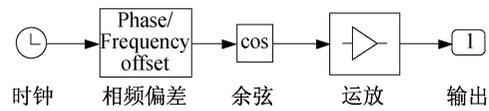


图 4 光源的仿真模型

Fig. 4 The simulation model of the light source

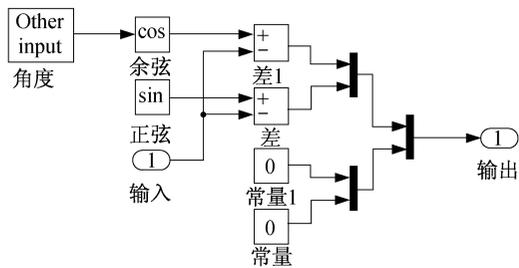


图 5 起偏器的仿真模型

Fig. 5 The simulation model of the partial device

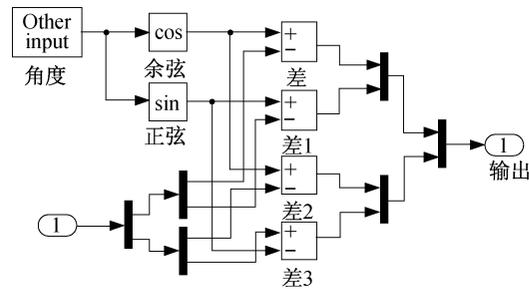


图 6 检偏器的仿真模型

Fig. 6 The simulation model of the polarizer device

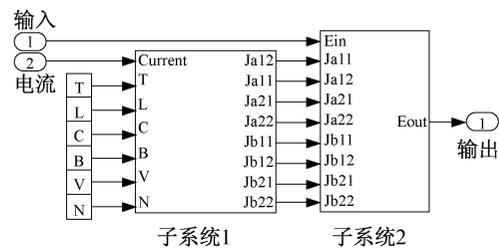


图 7 保偏光纤传感头的仿真模型

Fig. 7 The simulation model of the polarization-maintaining fiber sensor-head

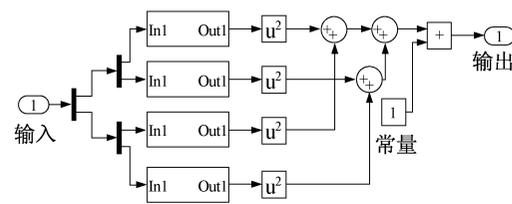


图 8 光电探测器的仿真模型

Fig. 8 The simulation model of the photoelectric detector

4 仿真结果及结论

在该仿真模型的输入端输入正弦电流 $i(t) = 2\sin(\omega t)^{[9]}$, 该信号作为被检测电流, 通过上面的仿真模型进行仿真, 得到输出波形如图 9 和图 10 所示。

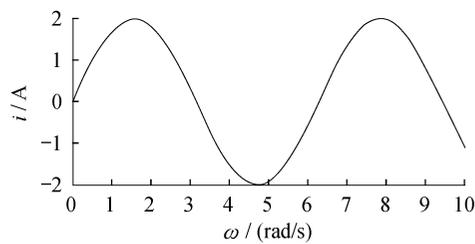


图 9 被测电流的正弦波形

Fig. 9 The sinusoidal waveform of the measured current

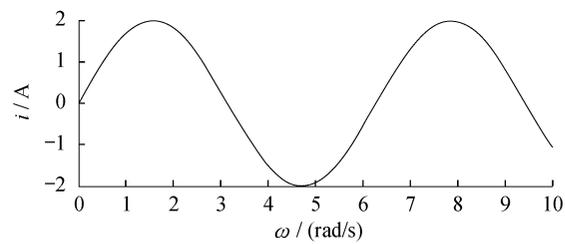


图 10 全光纤电流互感器输出的电流波形

Fig. 10 The output-current waveform of the all-fiber current transformer

比较这两个波形可知,所建立的全光纤电流互感器系统的仿真模型是正确可行的。全光纤电流互感器模型的建立,可以将高压端的被测电流幅值和相位大小真实的反映出来,因此对全光纤电流互感器的特性评估具有实际应用价值。

参考文献:

- [1] 狐晓宇. 光电互感器与电磁互感器的比较[J]. 电力学报, 2005, 20(3): 295—296.
- [2] 梁铨廷. 物理光学[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 101—102.
- [3] 姜雪松. 高压大功率变频器中光纤电流电压检测系统的研究[D]. 辽宁: 沈阳工业大学, 2005: 20—21.
- [4] 王政平, 康 崇, 张雪原, 等. 光学电流互感器的问题与解决对策[J]. 传感器技术, 2005, 24(3): 5—6.
- [5] 徐明远, 邵玉斌. MATLAB 仿真在通信与电子工程中的应用[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 29—43.
- [6] 张广军. 光电测试技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003: 15—16.
- [7] 陈 辉. 虚拟光纤电力互感器测试系统设计及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 12—13.
- [8] ZHANG C Y, ZHANG C X, WANG X X, *et al.* Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2009, 29(30): 42—46.
- [9] WANG L H, YANG Z X, YIN M H, *et al.* Simulation and test of dynamic performances of digital closed-loop fiber optic current transducer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(8): 1890—1895.

=====

(上接第 53 页)

$$\begin{cases} \Delta W_x = a_{01} = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 0 = P_y \lambda \end{cases} \quad (28)$$

从上式可以看出, x 、 y 方向均不会有干涉条纹图出现, 视场内都将是一片亮场, 而且 x 方向视场内光强会随着 a_{01} 的增大而变大。

4. 结 论

在波像差初级像差和二级像差的函数表达式基础上, 根据横向剪切干涉原理, 利用计算机编程仿真了 5 种像差包括初级像差和二级像差分别在 x 方向和 y 方向上的剪切干涉图, 给出了各个像差所对应的典型干涉图样, 并总结分析了条纹特征, 为初步判断被测系统的像差种类提供了依据。

参考文献:

- [1] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 巩 盾, 田铁印, 王 红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1754—1759.
- [3] 刘 克, 李艳秋. 极紫外光刻投影物镜波像差在线检测技术[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 257—262.
- [4] 王之江. 现代光学应用技术手册(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 王 栋, 杨洪波, 陈长征. 光学表面面形的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 298—301.
- [6] 陈 旭. Offner 补偿器的结构与装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 88—93.
- [7] 徐 挺, 朱国强. 基于波像差理论的光学系统评价函数[J]. 光学仪器, 2010, 32(3): 55—59.
- [8] 胡肖彦, 吕丽星. 基于平面对称光学系统像差理论的折反射全景成像系统优化设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(1): 45—49.
- [9] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [10] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1997: 43—44.