

基于闭环负反馈高精度电流光学传感器技术的研究

季遥遥, 李岩松, 刘君, 孟璐

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 光学电流互感器在实际运行中因易受温漂影响而不能长期稳定工作, 导致这种传感器一直没有得到大范围实用化。为了解决基于 Faraday 磁光效应的光学电流传感器温漂问题, 在系统分析温度因素如何对其数学模型进行影响的基础上, 首次提出引入闭环量, 实现闭环负反馈系统的思路, 来进一步增强系统的测量精度。对其中关键技术高稳定度光源可控直流源控制系统进行了硬件实现, 结果达到了实验预期。验证了通过闭环负反馈来提高光学电流传感器精度方法的可行性。

关键词: 光学电流互感器; 数字化变电站; 温漂; 闭环负反馈; 电力系统

Study on the high precision optical current transformer based on closed loop negative feedback

Ji Yao-yao, Li Yan-song, Liu Jun, Meng Lu

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Susceptible to temperature drift in actual operation, optical current transformer can not work in long-term stable situation, so it has not achieved practical results in a large range. Aiming at the temperature drift problem of optical current transformer based on the Faraday magneto-optical effect, the temperature factor of how it affects the mathematical model has been systematically analyzed and the idea of closed loop negative feedback has been introduced into the system to further enhance the measurement accuracy. The key technology, i.e. high stability DC source control system with controllable light source, has been implemented in hardware. The experimental results have reached the expected target and also verify the feasibility of the method for improving the measurement accuracy of optical current transformer through the closed loop negative feedback.

Key words: optical current transformer; digital substation; temperature drift; closed loop negative feedback; power system

中图分类号: TM452 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)19-0165-05

0 引言

随着现代电力工业的发展, 电力系统的传输容量不断增加, 电网运行电压等级也越来越高, 目前我国电网已将原来的 220 kV 骨干电网提高到了 500 kV。

传统的基于电磁感应原理的电磁式电流传感器 (CT) 结构简单, 经过长期的应用研究, 其测量稳态电流的精度可以达到万分之几的精度甚至更高。然而, 电磁式 CT 逐渐暴露出相当严重的缺陷。短路故障情况下, 电磁式 CT 出现严重的磁饱和现象, 导致二次输出电流波形严重失真, 不能准确描述短路时的过渡过程^[1]。这也是继电保护长期以来误动和拒动的主要原因之一。

基于 Faraday 磁光效应的光学电流传感器 (OCT) 能够有效地克服这些缺点。相比于传统的电流传感器, OCT 具有绝缘性能好、不饱和、抗干

扰、动态范围大、频率响应范围宽等优点^[2-7]。过去的很长一段时间里, 一直是新型电流传感器的主要研究热点。

而基于 Faraday 磁光效应的 OCT 的测量精度由于受到了温漂和不能长期稳定性运行问题的影响^[8], 在世界范围内长达 40 多年的研究中一直没有取得实用化成果。

为了解决 OCT 温漂的问题, 引入闭环系统的思路来增强 OCT 系统的测量精度。

1 闭环负反馈 OCT 系统

1.1 光学电流传感器数学模型分析

基于 Faraday 磁光效应的光学电流传感器的基本原理是磁光材料在外加电场和光波电场共同作用下产生的非线性极化过程, 即磁场方向与线偏振光的传播方向平行时, 线偏振光通过置于磁场中的磁光材料后, 出射后的线偏振光与入射时的偏振平

面之间将产生法拉第旋转角 θ ，如图 1 所示^[9]。

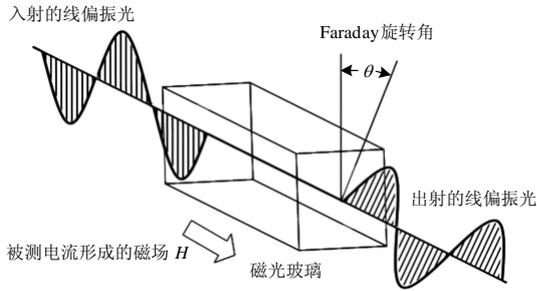


图 1 Faraday 磁光效应光学原理图

Fig.1 Optical schematic diagram based on the Faraday magneto-optical effect

法拉第旋转角 θ 表达式为：

$$\theta = \mu \cdot V \cdot \int_L H \cdot dl \quad (1)$$

式中， μ 为法拉第磁光材料的磁导率； V 为磁光材料的 Verdet 常数，与材料特性、光源波长及外界温度等有关； H 为被测电流所激励的磁场强度； L 为磁场作用下的线偏振光的有效长度； l 为积分矢量^[10]。

线偏振光在外加磁场的磁光材料中传播时，可以分解为两个相反转动的左、右圆偏振光分量，这两个分量无相互作用地以不同速度 n_-/c 、 n_+/c 进行传播。出射后的两个分量之间仅存在相位差，合成后光仍为线偏振光，但其偏振面对于入射光旋转了一个法拉第旋转角 θ ：

$$\theta = \frac{w}{2c} L(n_+ - n_-) \quad (2)$$

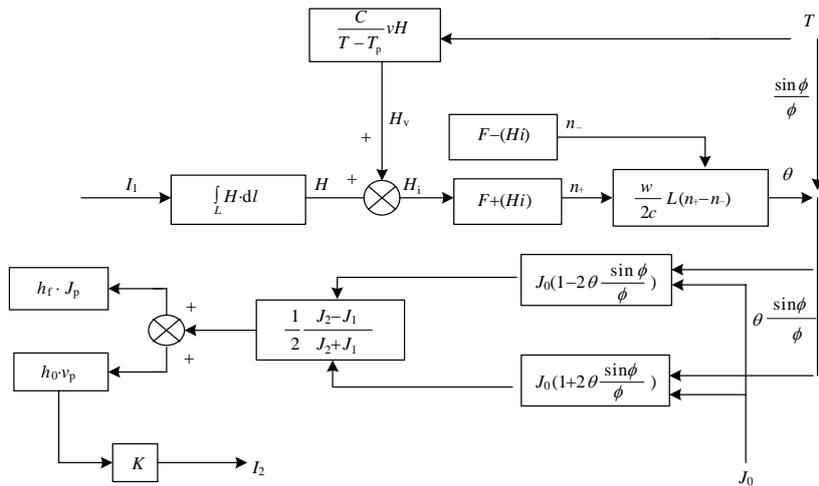


图 2 Faraday 磁光效应原理光学电流传感器系统数学模型

Fig.2 Optical current transformer mathematical model based on the Faraday magneto-optical effect

1.2 闭环负反馈思想的引进

从对整个 OCT 系统数学模型的分析可以看出，

其中： n_+ 和 n_- 分别为左、右旋圆偏振光的折射率，它们是有有效场 H_i 的函数，有效场包括外磁场 H 和温度作用场 H_v ； L 为传播距离。

线偏振光携带着被测磁场的信息进入光电转换器后将光信号转换为电信号才能进一步处理。应用马吕斯定律将不可测的偏转角转化为可测的偏振光的光强，再利用偏振分束器分成两束光，分别入射到两只光电转换器中。两只光电转换器所接收的光强分别为：

$$P_{1,2} = P_0(1 \pm 2\theta) \quad (3)$$

其中， P_0 为光源发出的基本光强。

外界温度对光学电流传感器的影响除引起了磁光材料 Verdet 常数的变化外，主要是温度变化在磁光材料中产生了线性双折射，使得原来的线偏振光转变为椭圆偏振光^[4]，从而产生了误差，反映在两只光电转换器所接收的光强上为：

$$P_{1,2} = P_0(1 \pm 2\theta \frac{\sin \phi}{\phi}) \quad (4)$$

其中， ϕ 是线性双折射。

此外，光电转换器将携带有被测电流信号的光信号转换为计算机可测的电信号。根据光电转换器的特性，其输出方程可以用式 (5) 表示：

$$i_p = h_f P_p + h_0 v_p \quad (5)$$

按照 Farady 磁光效应原理的光学电流传感器的基本原理和构成，以及考虑到温度因素的影响，可以得到图 2 数学模型方框图^[9]。

原有的 OCT 在本质上是开环系统，若要实现 OCT 的高精度测量，就必须构成闭环系统，才能彻底解

决 OCT 测量温漂的难题。

温度对 OCT 的影响最终作用于直流光强和交流光强中, 只要将与交流光强一同输出的直流光强稳定于一个设定值就可以消除温度的影响。

为此, 在原有光学电流互感器的基本组成结构上, 将光电转换后的电信号进行高精度微弱信号处理, 以抑制光电转换器中噪声的影响; 再进行高精度交直流信号的分离, 交流信号输出反映为被测电流; 直流信号与光源设定电源输出的基本光强信号进行比较, 将比较值输入高稳定度光源可控直流源中, 直流源的电流提供给光学电流互感器的光源。由此而形成闭环, 构成光学电流互感器的反馈自校正控制系统。

闭环负反馈系统原理图如图 3 所示。

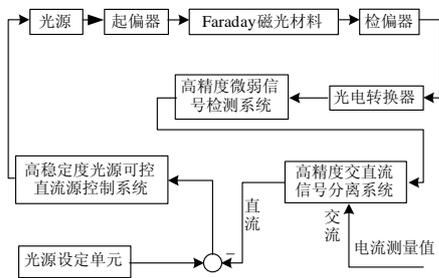


图 3 高精度电流光学传感器闭环负反馈系统

Fig.3 High precision optical current transformer closed loop negative feedback system

图 3 中, 输入至高稳定度光源可控直流源中的信号是设定值与反馈值之间的比较量。

2 高稳定度光源可控直流源控制系统设计

不管是温度的影响还是输入电流的波动, 都最终反映在光源发出的光的强度上。为此, 在光源的输出口增加一个分束器, 将光源的输出光分成 1:99 的比例, 将 1% 的光强反馈回直流源的一个光电转换器上, 根据反馈光强的波动来按照一定的控制规律调整输入电流的大小, 原理图如图 4 所示。

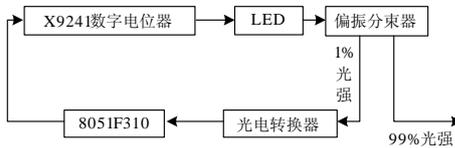


图 4 高稳定度光源反馈自校正系统

Fig.4 High stability light source feedback self-turning system

为了实时调整输入电流的大小以达到跟随反馈光强波动的目的, 就必须能很好的对 X9241 数字电位器实现控制。

2.1 X9241 数字电位器分辨率扩展

X9241 型数字电位器是由四个数字电位器集合而成, 每个数字电位器都有 63 个抽头, 为了实现对输入电流的良好控制, 就必须对数字电位器实现分辨率扩展。

X9241 数字电位器扩展思路如图 5 所示。

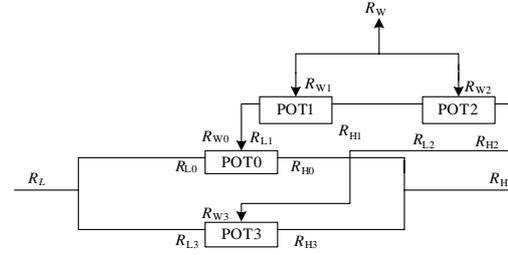


图 5 X9241 数字电位器分辨率扩展

Fig.5 X9241 digital potentiometer resolution extension

数字电位器分辨率扩展推导:

$$\begin{cases} U_{0w} = \frac{X_0}{63} U \\ U_{3w} = \frac{X_3}{63} U \end{cases}$$

$$U_w = \frac{y}{127} (U_{3w} - U_{0w}) + U_{0w} =$$

$$\left[\frac{y}{127 \cdot 63} (X_3 - X_0) + \frac{X_0}{63} \right] U \quad (6)$$

将式 (6) 变形为:

$$\frac{U_w}{U} = \left[\frac{y}{127 \cdot 63} (X_3 - X_0) + \frac{X_0}{63} \right] = \frac{R_w}{R}$$

由于 X_0 、 X_3 均只能取整数, 故为了得到最大的分辨率, 令 $X_3 = X_0 + 1$ 、 $X_0 = x$

$$\frac{R_w}{R} = \frac{y}{8001} + \frac{x}{63}$$

$$8001 \frac{R_w}{R} = 127x + y$$

假定 $z = 8001 \frac{R_w}{R}$, z 相当于等效后的滑动头的位置。因为 $\frac{R_w}{R} \in (0, 1]$, 则 $z \in (0, 8001]$, 中间抽头增加到 8 001 个, 分辨率大大提高。

$$z = 127x + y \quad (7)$$

其中, $x \in (0, 63]$, $y \in (0, 127]$, 且 x 、 y 均取正整数。

对式 (7) 进行分析可知, 给定 z 值即可求得 x 、 y 的值:

$$\begin{cases} x = \text{INT} \left[\frac{z}{127} \right] \\ y = z - 127x \end{cases}$$

各滑动分接头的取值策略为：

$$\begin{cases} X_0 = x \\ X_3 = x + 1 \\ X_1 = \begin{cases} y, y \in (0, 63] \\ 0, y \in [64, 127] \end{cases} \\ X_2 = \begin{cases} 0, y \in (0, 63] \\ y - 63, y \in [64, 127] \end{cases} \end{cases}$$

2.2 X9241 数字电位器控制策略分析

从数字电位器分辨率的扩展推导过程可知，数字电位器 POT0、POT3 作为粗调部分，数字电位器 POT1、POT2 作为微调部分。微调部分控制分析策略如图 6 所示。

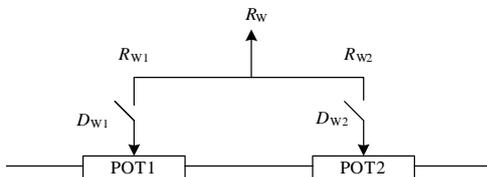


图 6 X9241 数字电位器微调控制

Fig.6 X9241 digital potentiometer vernier control

禁止滑动端 D_{W1} 、 D_{W2} 的实现：

$$\begin{cases} D_{W1} = \begin{cases} 0, y \in (0, 63] \\ 1, y \in [64, 127] \end{cases} \\ D_{W2} = \begin{cases} 1, y \in (0, 63] \\ 0, y \in [64, 127] \end{cases} \end{cases}$$

控制策略的软件实现流程图如图 7 所示。

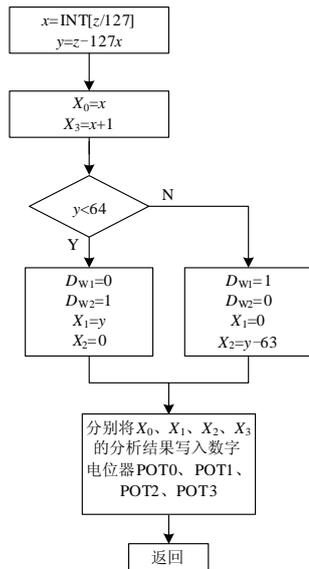


图 7 X9241 数字电位器控制策略软件流程图

Fig.7 X9241 digital potentiometer control strategy software flowchart

2.3 高稳定度光源可控直流源控制结果分析

由 C8051F310 控制下的 X9241 数字电位器，在完成高分辨率扩展后，嵌入整个 OCT 系统中进行实验。实验结果如表 1 所示，其中扩展后的数字电位器各端口之间为电压测量值，单位为 V。

表 1 高稳定度光源可控直流源输出

Tab.1 High stability DC source control system output with controllable light source

理论输入	R_L-R_H	R_H-R_W	R_L-R_W	控制输出
500	2.38	0.15	2.23	504
1 000	2.37	0.29	2.07	984
3 000	2.35	0.86	1.49	2 928
5 000	2.33	1.43	0.90	4 911
7 000	2.31	2.02	0.29	6 997
8 000	2.29	2.29	0.00	8 000

分析可知实验的控制输出结果满足高精度的要求，如图 8 所示。从而实现了输入电流的高分辨率调整，也同时达到了实时跟随反馈光强波动的目的。

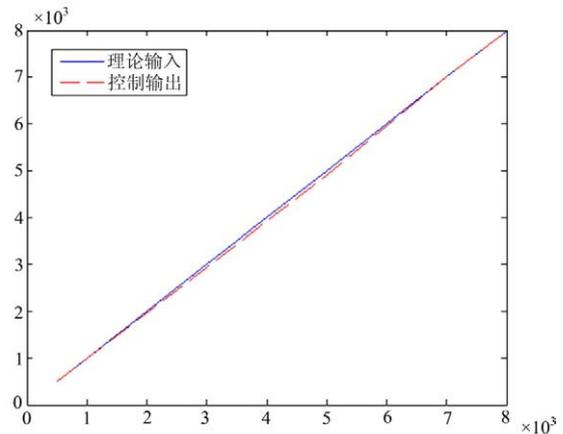


图 8 可控直流源理论输入与控制结果输出

Fig.8 DC source control system theoretical input and control output

3 小结

本文在对基于 Faraday 磁光效应原理的电流传感器数学模型进行分析的基础上，通过将受温漂影响的直流光强与光源设定单元光强进行比较，并将比较值作为高稳定度光源可控直流源的输入，从而引入闭环负反馈控制，补偿了由环境变化给光学电流传感器带来的误差，进一步增强了光学电流传感器的测量精度，大大提高了继电保护装置的稳定性和可靠性。理论分析和硬件实验对其可行性进行了充分的证明，也为下一步实用化奠定了基础。

参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
HE Jia-li, SONG Cong-ju. Electric power system protective relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 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 Yan-song, GUO Zhi-zhong, YANG Yi-han, et al. Research on the basic theory of adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (22): 21-26.
- [3] 刘青, 王增平, 徐岩, 等. 光学电流互感器对继电保护系统的影响研究[J]. 电网技术, 2005, 29 (1): 11-14.
LIU Qing, WANG Zeng-ping, XU Yan, et al. Research on the influence of optical current transducer on protective relaying system[J]. Power System Technology, 2005, 29 (1): 11-14.
- [4] 王政平, 刘晓瑜. 线性双折射对不同类型光学玻璃电流互感器输出特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (14): 77-81.
WANG Zheng-ping, LIU Xiao-yu. Effects of linear birefringence upon performances of different designs of optical glass current transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (14): 77-81.
- [5] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 自适应光学电流互感器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (11): 100-105.
LI Yan-song, ZHANG Guo-qing, YU Wen-bin, et al. Adaptive optical current transducer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (11): 100-105.
- [6] 赵本刚, 徐静, 高翔, 等. 基于微电子机械系统的光学电流传感器原理与设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (3): 89-94.
ZHAO Ben-gang, XU Jing, GAO Xiang, et al. Theory and design of optical current sensor based on MEMS[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (3): 89-94.
- [7] Stephan Mohr, Thomas Bosselman. A high dynamic range magneto-optic current transformer with advanced signal processing[J]. IEEE Sensors Journal, 2003, 3 (6): 744-751.
- [8] Madden W L, Michie W C, Cruden A. Temperature compensation for optical current sensors[J]. Optical Engineering, 1999, 38 (10): 1699-1707.
- [9] 李岩松. 高精度自适应光学电流互感器及其稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
LI Yan-song. Research on high-accuracy adaptive optical current transducer and its operating stability[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [10] Michie W C, Cruden A, Niewczas P. Harmonic analysis of current waveforms using optical current sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51 (5): 1023-1026.

收稿日期: 2010-03-24

作者简介:

季遥遥 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: jisen Yao@126.com

李岩松 (1970-), 男, 副教授, 博士后, 主要研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: liyansong811@126.com

刘君 (1970-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统运行、分析与控制。E-mail: liujunlishu@126.com

(上接第 141 页 continued from page 141)

- CAO Jin-ping, LI Wei, QIN Ying-li, et al. Research on Digital substation process level communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (12): 60-63.
- [8] 刘慧源, 郝后堂, 李延新, 等. 数字化变电站同步方案分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (3): 55-58.
LIU Hui-yuan, HAO Hou-tang, LI Yan-xin, et al. Research on a synchronism scheme for digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems,

2009, 33 (3): 55-58.

收稿日期: 2009-10-23; 修回日期: 2009-11-26

作者简介:

汪祺航 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为变电站自动化; E-mail: blueman1985@126.com

吴在军 (1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为变电站自动化、分布式发电等;

赵上林 (1981-), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式发电和变电站自动化。