

光源调制全光纤电流互感器的研究

刘晔, 陈江波, 束秀梅, 胡卫鹏, 丁巧娅, 马志瀛, 韦兆碧
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 介绍了全光纤电流互感器的结构, 分析了系统输出信号的特点, 指出工频干扰及线性双折射效应是影响系统稳定性的主要问题. 提出并实现了基于光源调制的抑制工频干扰方法. 该方法利用 2000 Hz 的方波光源作为互感器的光驱动, 系统的输出信息由原来的一路变成了两路, 通过两路信息的融合有效地抑制了电路工频干扰. 理论分析及实验结果表明, 在不增加系统复杂性和硬件投入的条件下, 该方法不仅抑制了电路中的低频干扰, 还有效地抑制了工频干扰, 提高了系统的信噪比, 为提高全光纤电流互感器系统的稳定性和可靠性提供了新的方法.

关键词: 全光纤电流互感器; 光源调制; 工频干扰

中图分类号: TP212; TP43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)04-0436-04

Fiber Optical Current Transformers Based on Modulated Light Source

LIU Ye, CHEN Jiangbo, SHU Xiumei, HU Weipeng,
DING Qiaoya, MA Zhiying, WEI Zhaobi
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A structure of an optical current transformer is presented. The output of the system is analyzed theoretically and experimentally. The power-line interference and the linear birefringence effect are pointed out as the key barriers for getting the useful signal from the system, and a way based on modulated light source for depressing the power-line interference is verified, where 2 000 Hz square-wave light is considered as the optic supply. For amelioration, the different information is got from two channels to depress the power-line interference by information fusion. The theoretical analysis and experimental results demonstrate that by the improved method the power-line interference is depressed more efficiently, while the signal-to-noise ratio is enhanced obviously.

Keywords: fiber optical current transformers; light source modulated; power-line interference

按照国际电工委员会制定的 IEC60044-8 电子式电流互感器标准, 电子式电流互感器是指: 在正常使用条件下, 其二次转换器的输出实质上正比于一次电流, 且在联结方向正确时相位差约为零的电流测量装置. 一次电流传感器包括电气、电子、光学或其他类型的装置, 用以传输信息到二次设备, 直接地或采用一次转换器, 产生正比于一次端子电流的信号. 目前已知的在高电压领域中用于测量电流的装置, 其一次和二次回路耦合就有磁的、电的、无线电

的、热的、声的、辐射的等方法. 相比之下, 充分发挥光纤传感技术优势的全光纤电流互感器是具有前途和竞争力的. 光纤介质的物理特性可以满足在高压环境下工作的绝缘要求, 互感器不存在磁饱和现象, 也不像电磁感应式互感器那样动态工作范围受铁芯磁饱和效应的限制可以在比较宽的频带内产生高线性度的响应, 可以用于以监控或测量为目的的高速遥感、遥测系统. 一般来说, 全光纤电流互感器还具有测量装置结构紧凑、体积小、重量轻、价格便宜的

特点,但遗憾的是,全光纤电流互感器由于存在长期稳定性问题,目前在世界范围还未能取代电磁感应式电流互感器。

全光纤电流互感器是以法拉弟磁光效应为基础、以光纤为介质的电力计量装置。偏振态调制式光纤传感器是通过测量光波在通过磁光材料时其偏振面由于电流产生的磁场的作用而发生旋转的角度来确定被测电流的大小^[1]。相位调制式光纤传感器是通过两束正交的线偏振光分别转化为左右圆偏振光,利用左右圆偏振光在磁场的作用下传播速度不同而形成的相位差,通过光干涉仪检测以确定被测电流的大小^[2]。法拉第磁光效应的本质是:左右圆极化光在磁场中,沿介质传播的速度不同^[2]。线偏振光是左右圆偏振光的合成。本文构建的光纤电流传感器系统采用偏振调制方式,利用方波光源作为互感器的光驱动,为抑制全光纤电流互感器的工频干扰提供了新的途径。

1 理论基础

1.1 工频干扰对系统的影响

全光纤电流互感器的结构如图1所示。光源发出的光经过起偏器后变成线偏振光,其偏振面在被测电流产生的磁场作用下发生旋转,旋转角为

$$\theta = V \int_L H dl = VN i \quad (1)$$

式中: V 是光纤的费尔德常数; L 是光在传感头光纤中传播的距离; H 是磁场强度; N 是围绕载流导体光纤匝数; i 是穿过光纤环的电流。

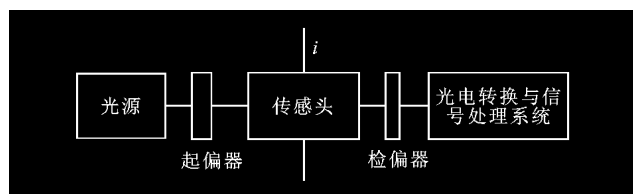
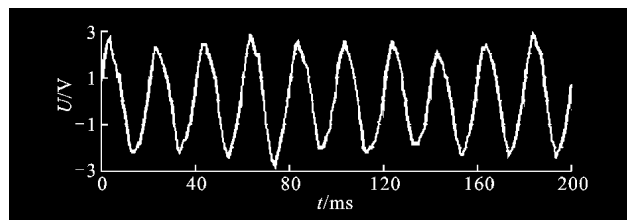


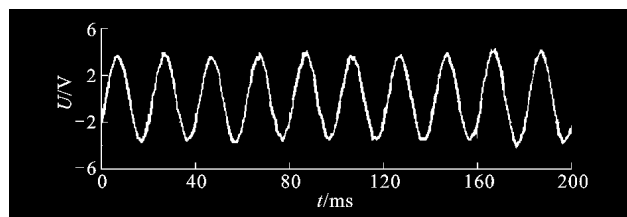
图1 全光纤电流互感器的结构

石英光纤的费尔德常数较小,光纤绕成线圈将产生较强的线性双折射,会使光纤费尔德常数进一步减小。由式(1)可知,电流磁场引起的偏振角度变化与费尔德常数成正比,所以系统输出十分微弱,对信号的放大和滤波处理受到工频干扰的严重影响。图2是实验测得的工频干扰未被抑制条件下,经过放大和滤波处理后的信号。图2a是传感器中无电流通过时的系统输出信号即干扰信号,图2b是通100 A被测电流时系统的输出信号。如果被测电流没有引入新的工频干扰,那么信号是叠加在峰峰值约为

4.4 V的工频信号上,信号的峰峰值约为3.6 V。实际上,在通上100 A电流时,被测电流将引入新的干扰使工频干扰变大,实际信号的峰峰值应比3.6 V小。可见,如果不采取有效的工频抑制措施,信号会淹没在噪声中。



(a)工频干扰



(b)工频干扰未抑制被测电流100 A时系统的输出

图2 工频干扰对系统输出的影响

1.2 线性双折射对系统的影响

由于震动、弯曲、光纤本身结构的不完善(如纤芯的椭圆度、内部残余应力等),输入光纤的线偏振光在光纤中会分解为两个相互垂直的偏振光。它们的场形、传播常数与理想的模式不同,造成了两个相互垂直模式之间的耦合,表现在两个模式由于传播速度的不同,总的偏振将沿光纤长度方向变化^[3]。

Smith给出了既有法拉弟旋光效应,又有线性双折射时的法拉弟传感头的琼斯矩阵,其结论是

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_O = J \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_I = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_I$$

式中: $J = \begin{bmatrix} A & -B \\ B & A^* \end{bmatrix}$ 是传感头的琼斯矩阵; $A =$

$\cos(\Delta/2) + j\cos\phi \sin(\Delta/2)$; $\cos\phi = \delta/\Delta$; $B =$

$\sin\phi \sin(\Delta/2)$; $(\Delta/2)^2 = (\delta/2)^2 + \theta^2$; $\sin\phi = 2\theta/\Delta$;

$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_I$ 为输入光矢量; $\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}_O$ 为输出光矢量; δ 反映了

了由线性双折射在2个偏振本征模之间引入的相位延迟。文献[4]在理论计算分析后指出,线性双折射效应会熄灭旋光效应、破坏系统的线性性质、削弱了系统的鲁棒性,即使系统的测量灵敏度随光纤形变、光纤内部应力、光源光波长、环境温度、弯曲、扭转、震动等许多因素变化^[4-6]。

图3是系统受到震动时的输出信号,显然系统对扰动过敏,即对线性双折射效应过敏。线性双折射

在系统中始终存在.在震动或温度改变时,线性双折射效应对系统的影响将突显^[7],这是影响全光纤电流互感器长期稳定性的主要因素.

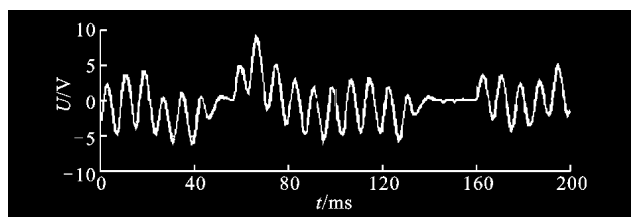


图3 工频抑制但系统受扰动时的输出

2 基于方波光源的噪声抑制方案

全光纤电流互感器的信号提取主要存在两个影响因素,一是工频干扰,二是线性双折射效应.本文采用 2000 Hz 的方波光源(通过对直流光源的斩波来实现).由采样定理可知,2000 Hz 的方波频率足以还原被测的 50 Hz 电流信号.被测信号是低频信号,系统采用方波光源后,相当于测量信号以高频方波为载波的幅度调制,低频被测信号的频谱被搬移到周期方波的各次谐波频率上.

图 4 给出了采用方波光源抑制工频干扰的流程,其中 a 是系统输出的调制波形.方波高电平的调制波形是在有光时(即光源未被斩断时)对光路上检测到的信息进行调制后与电路上工频干扰信息叠加得到的经放大滤波输出的波形,包含了 3 方面信息:①有光时,光强随被测电流信号的变化;②有光时,光强随线性双折射效应的变化;③工频干扰.方波低电平的调制波形是在无光时(即光源被斩断时)由光路输出的信号叠加电路上工频干扰信息得到的,经放大滤波输出的波形,仅反映工频干扰一个信息.经过电平抬高、精密整流和检波分离出上下两路信号如图 4 中 e 和 f 所示.环境的一致性使两路信号中的工频干扰信息相似,两路信号相减即可有效地抑制工频干扰.

采用方波光源使系统被测信号的频谱搬移到了高频,提高了系统抗低频干扰的能力,在不增加硬件投入的条件下使信息由原来的单路变成了双路,通过两路信息的融合有效地抑制了电路工频干扰.

3 实验

光路输出信息经光电转换后得到对应的电信号,对该信号放大、抬高、整流、检波后得到 2 000 Hz 方波高低电平分别携带的两路信息,两路信号进行减法运算得以抑制工频干扰.图 5a 是不加测量电

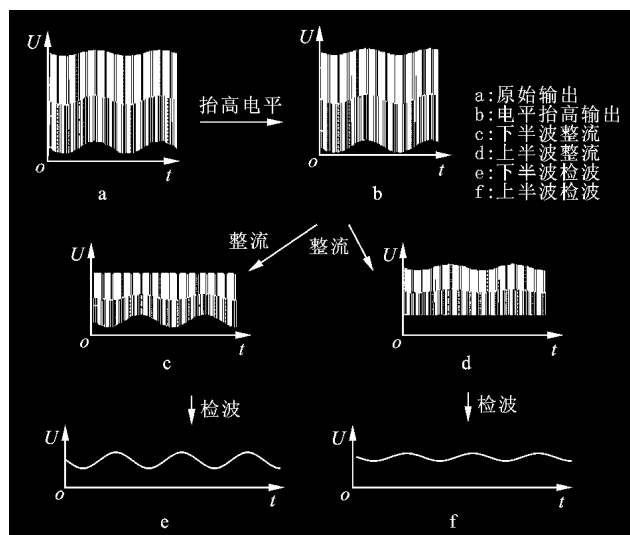
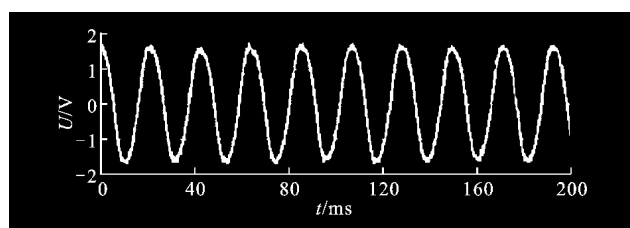


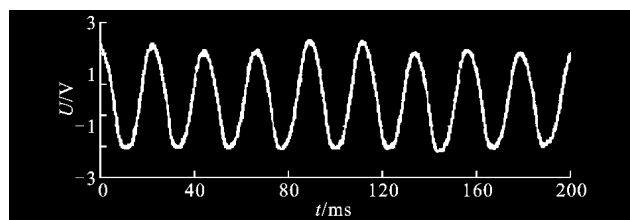
图4 方波光源抑制工频干扰的流程

流时,由方波低电平分离出的信号,反映工频干扰.图 5b 是由方波高电平分离出的信号,既反映了工频干扰又反映了线性双折射的影响.由于线性双折射信息量的存在及上下调制波分离电路的不完全对称,图 5a 与图 5b 反映出来的信号只是逼近.图 5c 是被测量电流为零时两路信号通过减法运算后的信号,可见工频干扰被大大抑制.

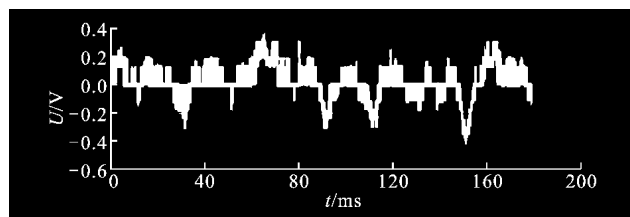
当加上被测电流时,工频干扰的值因被测电流发生变化,图 5a 中信号的波形将叠加干扰增量,同时图 5b 信号也将叠加相同的干扰增量,不同的是图 5b 信号还要叠加被测电流产生的电信号变



(a) 方波低电平携带的信号



(b) 方波高电平携带的信号

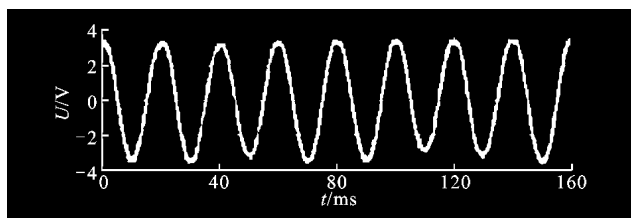


(c) 高低电平携带的两路信号融合

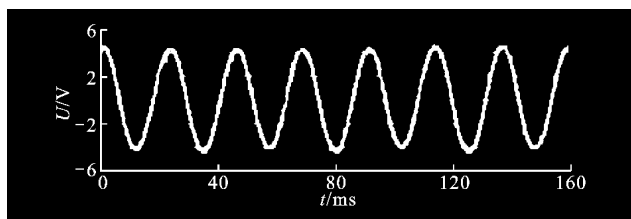
图5 工频干扰抑制实验

化量。通过两路的减法运算后,系统输出将仅包含被测电流产生的电信号。

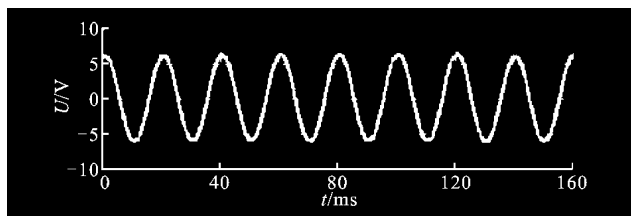
采用前述方法进行了相关实验研究。图6是抑制工频后,被测电流为120、150、210和270 A时系统的输出信号,系统输出正弦波的峰-峰值依次为6.7、8.0、10.4和15.0 V。实测结果表明,被测电流每增加30 A,系统输出正弦波的峰-峰值将增加1.4 V,系统的传输特性具有良好的线性性质。实验数据表明,工频抑制前被测电流为100 A时信噪比约为-4 dB,信号淹没在噪声中,经过工频抑制后,信噪比大于15 dB,得到了大幅度的提高。



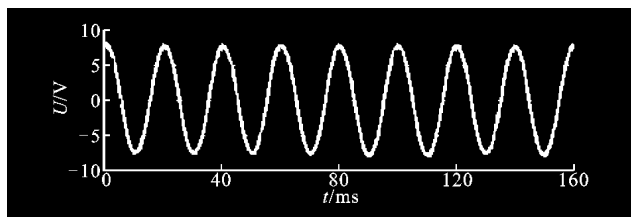
(a)被测电流为120 A



(b)被测电流为150 A



(c)被测电流为210 A



(d)被测电流为270 A

图6 工频干扰抑制后系统的输出

4 结 论

理论分析与实验证明,采用2 000 Hz的方波光源作为光纤电流互感器的光驱动,系统的输出信息由原来的一路变成了两路,在不增加系统复杂性和

硬件投入的条件下,通过两路信息的融合不仅抑制了电路中的低频干扰,还有效地抑制了工频干扰,为提高全光纤电流互感器系统的稳定性和可靠性提供了全新的方法。

参考文献:

- [1] 刘晔,邹建龙,王采堂,等.基于神经网络逆建模的三相光学电流互感器[J].电工电能新技术,2001(4):5-8.
LIU Ye, ZOU Jianlong, WANG Caitang, et al. Three-phase optical current transducer based on neural network inverse modeling[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2001(4):5-8.
- [2] BOHNERT K, BRÄNDLE H, BRUNZEL M G, et al. Highly accurate fiber-optic DC current sensor for the electrowinning industry[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(1):180-187.
- [3] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003:156-160.
- [4] 刘晔,王采堂,苏彦民,等.基于BP网络的三相光学电流互感器的补偿[J].西安交通大学学报,2000,34(6):1-5.
LIU Ye, WANG Caitang, SU Yanmin, et al. BP neural network for linear birefringence of three-phase optical current transducer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(6):1-5.
- [5] 刘晔,王采堂,苏彦民,等.三相光学电流互感器的双折射效应研究[J].西安交通大学学报,2000,34(2):24-27.
LIU Ye, WANG Caitang, SU Yanmin, et al. Birefringence of three-phase optical current transducer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2000, 34(2):24-27.
- [6] 刘晔,王采堂,韦兆碧,等.三相光学电流传感器的实验研究[J].西安交通大学学报,2002,36(2):127-130.
LIU Ye, WANG Caitang, WEI Zhaobi, et al. Experimental research on three-phase optical current transducer system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(2):127-130.
- [7] BOHNERT K, GABUS P, NEHRING J. Temperature and vibration insensitive fiber-optic current sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2):267-276.

(编辑 杜秀杰)