

光学电流互感器中微弱信号检测的仿真与分析

周浩, 李岩松, 刘君, 赵吴鹏

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 根据光学电流互感器的结构和原理可知, 通过缩短传感部分磁光材料的长度可以提高 OCT 的长期运行稳定性, 但在这种情况下, 反映电流信息的微弱光电信号将会淹没在强噪声背景中, 降低了光学电流互感器的测量精度。针对该问题, 提出了采用数字式锁定放大器在该光学电流互感器中进行微弱电流信号的检测, 并在 Labview 平台的基础上进行了仿真, 仿真结果证明, 本论文所提出的方法极大地提高了 OCT 的测量精度。

关键词: 光学电流互感器; 数字式锁定放大器; 信号; Labview

Simulation and analysis of weak signal detection in OCT

ZHOU Hao, LI Yan-song, LIU Jun, ZHAO Wu-peng

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: According to the structure and principle of Optical Current Transformer, we can improve stability of OCT by shortening the length of magneto-optical materials of sensor parts. But in this situation, slight photo-electric signal reflecting the current information will be submerged in background noise in serious instances, measurement precision of OCT will be reduced. Aiming at this problem, this paper proposes using lock-in amplifier to detect weak signal in this kind of OCT, meanwhile simulates the lock-in amplifier detecting weak signal based on the platform of LABVIEW and analyzes the simulation results. The results of simulation indicate that the metering accuracy of OCT can be improved immensely.

Key words: optical current transducers; digital lock-in amplifier; signal; Labview

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)22-0001-03

0 引言

电流互感器是电力系统中的电能计量和保护控制的重要设备, 其测量精度和可靠稳定运行关系到电力系统的安全和经济运行。目前, 随着电力系统电压等级的不断升高和电力传输容量的不断增加, 传统 CT 暴露出越来越多的问题, 而光学电流互感器 (OCT) 以其无饱和、测量范围宽、反应速度快、抗电磁干扰能力强等诸多优点, 在电力系统中有广阔的应用前景。但是与传统 CT 相比, 因 OCT 本身具有的开环系统特性^[1], 在温度、压力等外界因素的影响下, 尤其是温度的影响, 使得 OCT 的稳态测量精度很差, 这是影响 OCT 实用化进程的两大难题之一。本文的思想是传感头采用稳定性比较高的螺线管聚磁光路结构^[1], 通过缩短传感部分的磁光材料来降低外界温度干扰的影响, 提高 OCT 的长期运行稳定性, 但在这种情况下 OCT 在

测量小电流时, 测得的光电信号主要被 OCT 内部固有噪声影响, 严重时将会被淹没, 其读数不能正确反映被测电流的信息, 因此如何有效地去除噪声的影响同时得到高精度的数据是我们面临的问题。由于 OCT 内部的噪声基本与被测电流信号所在的频段相重叠, 采用传统的滤波和放大不能滤除, 此时需要微弱信号检测的方法将信号从噪声中提取出来^[4]。本文将数字式锁定放大器用于光学电流互感器中的微弱信号检测, 通过 Labview 对其进行了仿真, 并分析了仿真结果。

1 具有数字式锁定放大器的 OCT 的基本组成

数字式锁定放大器对微弱信号的检测是基于相关检测原理, 应用信号周期性和噪声随机性的特点, 通过自相关和互相关运算来滤除噪声^[6]。本文采用的是互相关器和互相关函数进行的互相关检测。锁定放大器在 OCT 中的位置以及其基本组成如图 1 所示:

基金项目: 华北电力大学校内博士学位教师基金

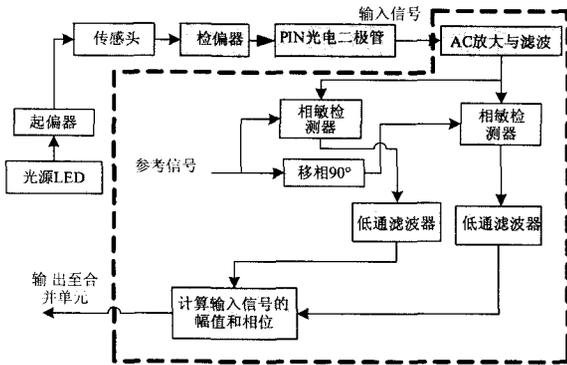


图 1 具有数字式锁定放大器的 OCT 框图

Fig.1 Diagram of digital lock-in amplifier in OCT

由图 1 可知通过锁定放大器的输出可以得到被测电流的相位和幅值信息。虽然磁光材料的缩短会使得 OCT 输入信噪比降低，但 OCT 所受外界温度干扰的影响也大为降低，使得其长期运行稳定性大为提高，从而提高了 OCT 的输出信噪比和稳态测量精度。

2 基于相关检测的数字式锁定放大器原理

数字锁定放大器是以互相关检测为基础所设计的一种数字化相关检测器，是对被检测信号和同频参考信号进行数字互相关运算实现信号检测的仪器。基本原理图如图 2 所示。

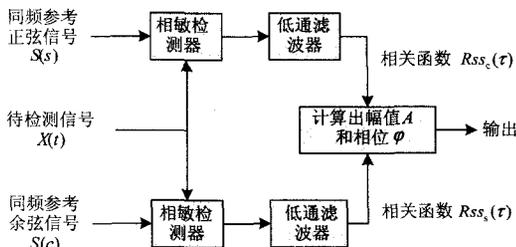


图 2 数字式锁定放大器的原理图

Fig.2 Principle diagram of digital lock-in amplifier

设周期信号 $S(t)$ 伴随有随机噪声 $N(t)$ ，即待检测信号为 $X(t) = S(t) + N(t)$ 。简单情况下，设待测信号 $S(t)$ 和同频参考正弦信号 $S_s(t)$ 、同频参考余弦信号 $S_c(t)$ 分别为：

$$S(t) = A \sin(2\pi f_r t + \varphi) \quad (1)$$

$$S_s(t) = \sin(2\pi f_r t) \quad (2)$$

$$S_c(t) = \cos(2\pi f_r t) \quad (3)$$

其中： A 、 φ 、 f_r 分别为待测信号的幅度、初相位以及频率。

首先通过采样频率 f_s 对待测信号进行离散化处理，则待测信号的每个周期采样次数为 $N = f_s / f_r$ ，采样时间间隔为 $t_s = 1 / (N \cdot f_r)$ ，取待测信号的 q 个周期进行 $M = [q \times N]$ 次采样，得到序列信号：

$$X(k) = A \sin(2\pi f_r \cdot k t_s + \varphi) + N(k t_s) =$$

$$A \sin(2\pi / N + \varphi) + N(k) \quad (4)$$

其中： $k=0, 1, \dots, M-1$ 。

同理生成参考序列：

$$S_s(k) = \sin(2\pi k / N), S_c(k) = \cos(2\pi k / N)$$

对含有噪声的信号和正弦参考信号作无偏互相关运算得 $R x s_s(\tau)$ ，取 $\tau = 0, 1, \dots, M-1$ ：

$$R x s_s(\tau) = \frac{1}{m - \tau} \sum_{k=0}^{m-1-\tau} X(k) \cdot S_s(\tau + k) =$$

$$R s s_s(\tau) + R n s_s(\tau) \quad (5)$$

其中： $R s s_s(\tau)$ 、 $R n s_s(\tau)$ 分别为被测信号、噪声与参考正弦的相关函数。由于噪声的随机、不相关性，噪声与本地参考信号不相关，故相关函数 $R n s_s(\tau) = 0$ ，去除了随机噪声的影响。所以信号与参考正弦相关结果与噪声无关：

$$R x s_s(\tau) = R s s_s(\tau) \quad (6)$$

同理对信号与参考余弦相关，可以得到：

$$R x s_c(\tau) = R s s_c(\tau) \quad (7)$$

将信号序列 $S(k)$ 和参考序列 $S_s(k)$ 、 $S_c(k)$ 分别代入式 (6) 和式 (7)，可得：

$$R x s_s(\tau) = \frac{A}{2} \cos(2\pi f_r \cdot \tau + \varphi) \quad (8)$$

$$R x s_c(\tau) = \frac{A}{2} \sin(2\pi f_r \cdot \tau + \varphi) \quad (9)$$

当 $\tau = 0$ 时，对 $R x s_s(\tau)$ 、 $R x s_c(\tau)$ 作如下运算，得到信号幅度 A ，相位 φ ：

$$A(0) = 2 \sqrt{R x s_s(0)^2 + R x s_c(0)^2} \quad (10)$$

$$\varphi(0) = \arctan\left(\frac{R x s_c}{R x s_s}\right) \quad (11)$$

即实现了待检测信号的幅度 A 和初始相位 φ 的检测。当信号中含有强噪声时，要想获得理想的检测结果，就要以牺牲时间为代价，也即延长系统积分时间以抑制噪声。

3 基于 Labview 平台的数字式锁定放大器的仿真与分析

基于以上原理，通过 Labview 仿真，仿真图

如图 3 所示。

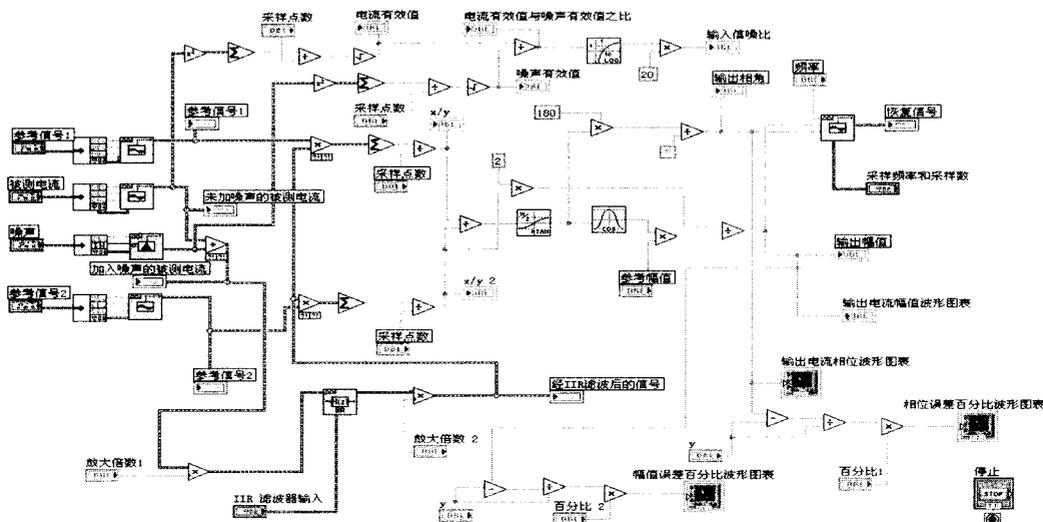


图 3 以 Labview 为平台的仿真设计图

Fig.3 Simulation figure based on Labview

当输入信号和参考信号频率为 50 Hz, 幅值均为 1, 初始相位为 60° , 信号采样频率为 100 k, 采样数为 $10E5$, 加入噪声后输入信号信噪比 $SNR = -3$ db, 输出的相位相对误差百分比和幅值相对误差

百分比图形如图 4 所示, 当输入信噪比 SNR 为 -20 db 的时候, 输出的相位相对误差百分比和幅值相对误差百分比图形如图 5 所示。

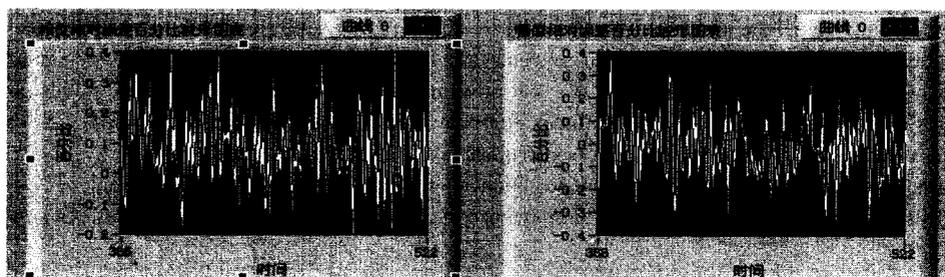


图 4 $SNR = -3$ db 时的相位和幅值相对误差百分比波形图

Fig.4 Relative error wave pattern of phase and amplitude when $SNR = -3$ db

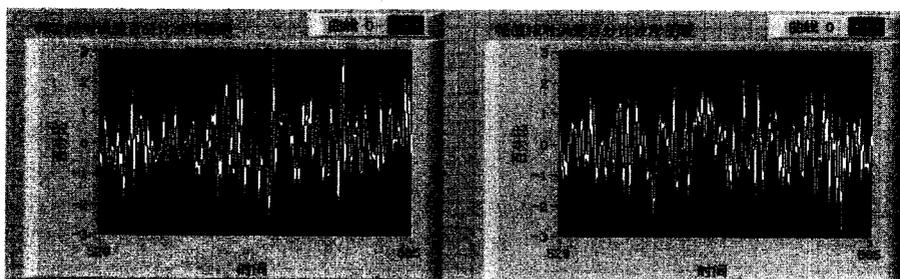


图 5 $SNR = -20$ db 时的相位和幅值相对误差百分比波形图

Fig.5 Relative error wave pattern of phase and amplitude when $SNR = -20$ db

由图 4 可见, 当输入信号信噪比 $SNR = -3$ db 时, 可以准确测得输入信号的相位和幅值, 其相对误差在 0.4% 以内, 从图 5 中可知, 即使当输入信号信噪比 $SNR = -20$ db 时, 仍然可使测得的

相位和幅值相对误差在 3% 以内, 即实现了强噪声中的微弱信号检测。

(下转第 8 页 continued on page 8)

这个临界点时,则会造成每减排一单位的污染,其经济损失的比率大于增加一单位污染所产生的经济收益的比率。此时,若再减少污染排放,就会产生过度激励问题,影响社会总体福利。这些临界点对于制定排污总量具有参考意义。(3) 给定排污总量,对于初始排污权分配,可能采用电力交易市场中成交量最大时各个发电企业所拥有的排污权数量。在竞争环境,成交量最大时,市场价格最低,整个社会的福利也就最大。

参考文献

- [1] 吴亚琼, 赵勇, 吴相林, 等. 初始排污权分配的协商仲裁机制[J]. 系统工程, 2003, 21(5): 70-74.
WU Ya-qiong, ZHAO Yong, WU Xiang-lin, et al. The Bargaining and Arbitration Mechanisms of the Allocation of the Initial Emission Permits[J]. Systems Engineering, 2003, 21(5): 70-74.
- [2] Portney P R, Stavins R N. Public Policies for Environmental Protection [M]. Published in the United States of American, 2002.
- [3] 吴健, 马中. 美国排污权交易政策的演进及其对中国的启示[J]. 环境保护, 2004, 8: 59-64.
WU Jian, MA Zhong. Allonsance Trading Policy of Pollutant Discharged in U.S.A and Its Inspiring to China[J]. Environmental Protection, 2004, 8: 59-64.
- [4] 马中, Dan Dudek, 吴健, 等. 论总量控制与排污权交易[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 89-92.
MA Zhong, DAN Dudek, WU Jian, et al. Discussion on Total Emissions Control and Emission Trading[J]. China Environmental Science, 2002, 22(1): 89-92.
- [5] Ottar Mestad. Allocation of Emission Permits with Leakage Through Capital Market[J]. Resource and Energy Economics, 2007, 29: 40-57.
- [6] Gangadharan L. Transaction Cost in Pollution Markets: an Empirical Study [J]. Land Economics, 2000, (76) : 601- 614.
- [7] 李寿德, 黄桐城. 初始排污权分配的一个多目标决策模型[J]. 中国管理科学, 2003, 12(6): 40-44.
LI Shou-de, HUANG Tong-cheng. A Multi - Objectives Decision Model of Initial Emission Permits Allocation[J]. China Management Science, 2003, (6) : 40-44.
- [8] 施圣炜, 黄桐城. 期权理论在排污权初始分配中的应用[J]. 中国人口·资源与环境, 2005, 15(1): 52-55.
SHI Sheng-wei, HUANG Tong-cheng. Option Theory Used in Initial Emission Permits Allocation[J]. China Population, Resources and Environment, 2005, 29(17): 1-5.
- [9] 夏清, 孙正运. 考虑交易成本的区域市场撮合交易模型[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 1-5.
XIA Qing, SUN Zheng-yun. Application of High-low Match Methods to Regional Electricity Market Considering Transaction Costs[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 1-5.

收稿日期: 2008-11-25; 修回日期: 2009-03-20

作者简介:

刘 贞(1973-), 男, 博士, 研究方向为电力经济、电力市场。E-mail: zhenliu@tsinghua.edu.cn

(上接第 3 页 continued from page 3)

4 结束语

本文将数字式锁定放大器应用到光学电流互感器的微弱光电信号检测中,通过 Labview 仿真了数字式锁定放大器在 OCT 中对微弱信号的检测,由结果可知在小电流情况下,数字式锁定放大器不仅能很好地抑制 OCT 光电探测器中的主要噪声,同时能反映最初的正确电流信息,明显提高了光学电流互感器的稳态测量精度。

参考文献

- [1] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 提高光学电流互感器准确度的组合方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 43-47.
LI Yan-song, ZHANG Guo-qing, YU Wen-bin, et al. Combined Method to Improve the Accuracy of Optical Current Transducer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 43-47.
- [2] 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.
- [3] 王廷云, 罗承沐, 田玉鑫. 电力系统中光电电流互感器研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 38-41.
WANG Ting-yun, LUO Cheng-mu, TIAN Yu-xin. Study on Optical Current Transformer in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 38-41.
- [4] 李岩松, 张国庆, 于文斌, 等. 基于自适应滤波的光学电流互感器的信噪分离[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 64-67.
LI Yan-song, ZHANG Guo-qing, YU Wen-bin, et al. Signal Noise Decomposed in Optical Current Transducer Based on Adaptive Filter[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 64-67.
- [5] 叶嘉雄, 常大定, 陈汝均. 光电系统与信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [6] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] 陈佳圭. 微弱信号检测[M]. 北京: 中央广播电视大学出版社, 1987.
- [8] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.

收稿日期: 2008-11-25; 修回日期: 2008-12-28

作者简介:

周 浩(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制; E-mail: zhouhao1018@163.com

李岩松(1970-), 男, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。