

基于虚拟仪器的高准确度电子式电流互感器 模拟输出校验系统

徐 波¹, 童 悦²

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 根据测量用电子式电流互感器(ECT)的校验要求, 研制了一种基于虚拟仪器的 ECT 模拟输出校验系统。介绍了该校验系统的整体构成, 针对 IEC 标准规定的 ECT 测量通道正常工作频率范围即 49.5~50.5 Hz, 研究了工作频率变化对信号提取的影响。采用 4 阶三角卷积窗的 FFT 算法来提取被校验的信号, 与 IEC60044-8(ECT)中推荐的 FFT 算法相比, 该算法可以有效减少因非整周期采样造成的频谱泄漏误差, 具有更高的准确度。实验表明: 当频率波动范围为 50 ± 0.5 Hz 以内时, 校验系统比差可达到 10^{-4} , 角差可达到 10^{-2} 分, 满足 0.2 S 级 ECT 的校验要求。

关键词: ECT; 模拟输出; 校验系统; IEC; FFT

中图分类号: TM 932

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)02-0146-03

本文针对电子式电流互感器(ECT)的模拟输出校验系统^[1-2]开展研究。目前电力系统中测量用 ECT 多为 0.2 S 级, 对应的校验系统的准确级应相应高出 2 个等级, 即准确度为 5‰ 以上。IEC60044-8 中规定测量用 ECT 的正常频率范围应为额定频率(f_r)的 99%~101%, 即 49.5~50.5 Hz。需针对 IEC60044-8 中规定的 ECT 的正常工作频率范围, 研制相应的被校验信号提取算法^[3-4]。

1 校验系统的整体构成

校验系统的整体结构如图 1 所示, 标准通道的互感器采用低功率铁心线圈, 在其二次采用一个取样电阻, 将一次电流信号转化为成比例的电压信号。数据采集卡采集标准电压信号和被校验 ECT 的模拟输出信号, 在 Labview 平台下进行信号提取及误差处理, 提取频域中的基波含量, 对电气参数进行高准确度的误差计算。

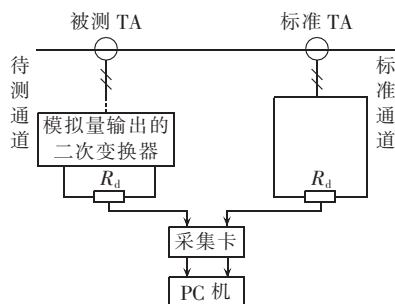


图 1 校验系统的整体结构图

Fig.1 Overall structure of calibration system

2 信号提取算法

电网频率波动造成采样非同步, 从而产生频谱泄漏效应以及栅栏效应, 加窗算法是解决泄漏误差的最有效的方法之一。在周期信号的参数测量中, 衡量窗函数特性的主要标准为: 在频谱中主瓣突出, 旁瓣衰减快^[5-9]。三角窗是最简单的频谱无负瓣的一种窗函数。长度为 M 的三角窗序列为

$$\omega_r(n) = \begin{cases} n & 1 \leq n \leq M/2 \\ M-n & 1+M/2 \leq n \leq M \end{cases} \quad (1)$$

三角自卷积由若干个三角窗进行自卷积运算获得, 即

$$\omega_r^p(m) = \omega_r(n) * \omega_r(n) * \dots * \omega_r(n) \quad (2)$$

其中, p 为参与卷积的三角窗个数, 即窗的阶数, 由 p 个三角窗做 $p-1$ 次卷积, 即可得 p 阶三角自卷积窗。通过补零将 p 阶三角自卷积窗的长度调整为 $N = pM$, 根据离散傅里叶变换, 长度为 M 的三角窗的离散频率响应为^[10-11]

$$\omega_r(k) = \frac{2e^{-jMk\pi/N}}{M} \left| \frac{\sin \frac{Mk\pi}{2N}}{\sin \frac{k\pi}{N}} \right|^2$$

根据卷积定理, 时域中做卷积相当于频域做乘法。因此 p 阶三角自卷积窗的频率响应为

$$\omega_r^p(k) = \frac{2^p e^{-jk\pi}}{M^p} \left| \frac{\sin \frac{k\pi}{N}}{\sin \frac{k\pi}{N}} \right|^{2p}$$

3 校验软件设计

校验系统以 PC 机代替传统的校验仪, 其设计分

为前面板和后面板 2 部分,实现采集和数据处理功能。前面板包括信号采集系统设置和结果显示,后面板主要实现信号采集和数据处理 2 个功能,信号采集选用了动态数据采集卡(DSA)PCI4474,可以对微弱信号实现精确采样,具有很宽的动态范围(几十微伏到几伏)及很高的分辨率^[12-13]。4 个模拟通道可实现同步采样,ADC 分辨率达 24 bit,通道采样率达到 1.0~102.4 kS/s,可编程设定。采用循环采样方式,采样率设定为 6.4 kS/s。数据处理部分是整个系统的核心,本文用 Labview 编程实现 4 阶三角卷积窗的 FFT 算法,具体程序流程图如图 2 所示。

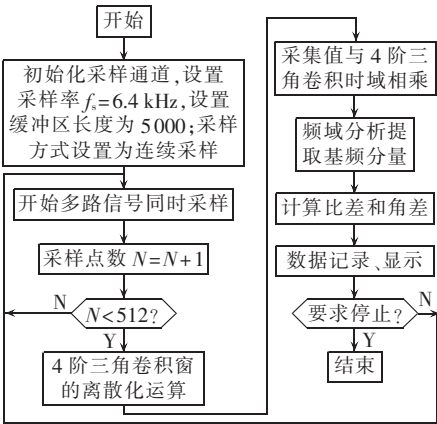


图 2 用 Labview 编程实现 4 阶三角卷积窗的 FFT 算法程序流程

Fig.2 Flowchart of fourth-order triangle convolution windowed FFT algorithm by Labview

4 实验结果

实验目的是为了验证三角卷积窗算法能有效抑制非同步采样所引起的测量误差。以信号发生器模拟 ECT 的输出,在 49.5~50.5 Hz 频率范围内变化调节输出信号频率^[14-15]。观察并记录频率在 49.5~50.5 Hz 频率范围内变化时校验平台的比值差、相位差,从而比较和验证三角卷积窗的 FFT 算法与传统 FFT 算法对非同步采样的抑制作用。

采用传统 FFT 算法和 4 阶三角卷积窗 FFT 算法的对比实测数据如表 1 所示。

实验数据表明,采用 4 阶三角卷积窗的 FFT 算法后,本校验系统比差可以达到 10⁻⁴,角差可以达到 10⁻² 分。因此,该算法与传统 FFT 算法相比,能有效

提高校验系统的准确度,尤其是在频率有偏差的情况下,改善效果显著。

5 结论

以虚拟仪器为平台实现的 4 阶三角卷积窗的 FFT 算法可以有效地减少非整周期采样带来的误差,基于虚拟仪器的电子式互感器校验系统,避免了硬件中可能混入的噪声,减少了误差的来源,增强了数字信号处理的灵活性,提高了运算速度,实现了高准确度的测量。另一方面,软件的开发、调试和改进相对于硬件电路方便得多,从而大幅降低了开发的成本,同时缩短了开发周期。

参考文献:

[1] 罗苏南,田朝勃,赵希才. 空心线圈电流互感器性能分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(3):108-113.
LUO Sunan,TIAN Zhaobo,ZHAO Xicai. Performance analysis of air-core current transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(3):108-113.

[2] 张可畏,王宁,段雄英,等. 用于电子式电流互感器的数字积分器[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):104-107.
ZHANG Kewei,WANG Ning,DUAN Xiongying,et al. A digital integrator for electronic current transducer[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(12):104-107.

[3] 国家高电压计量站. JJG 313-1994 测量用电流互感器检定规程[S]. 北京:中国计量出版社,2004.

[4] IEC. IEC60044-8 Instrument transducers(part eight):electronic current transducers[S]. Geneva,Switzerland:IEC,2002.

[5] 张介秋,陈砚圃,梁昌洪. 基于卷积窗的电力系统谐波误差估计与数值模拟[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):34-37.
ZHANG Jieqiu,CHEN Yanpu,LIANG Changhong. Power system harmonic error estimation and simulation based on convolution window[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(12):34-37.

[6] 潘文,钱俞寿,周鹗. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论(I)窗函数研究[J]. 电工技术学报,1994,9(1):50-54.
PAN Wen,QIAN Yushou,ZHOU E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT(I) study of windows[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1994,9(1):50-54.

[7] 潘文,钱俞寿,周鹗. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论(II)双插值 FFT 理论[J]. 电工技术学报,1994,9(2):53-56.
PAN Wen,QIAN Yushou,ZHOU E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT(II) dual interpolated FFT algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,1994,9(2):53-56.

[8] 温和,滕召胜,卿柏元. Hanning 自卷积窗及其在谐波分析中的应用[J]. 电工技术学报,2009,24(2):164-169.
WEN He,TENG Zhaosheng,QING Baiyuan. Hanning self-convolution windows and its application to harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(2):164-169.

[9] 杨鹏,赵伟,黄松岭,等. 铁心开气隙电流互感器原理表述新探[J]. 电测与仪表,2007,44(10):44-47.
YANG Peng,ZHAO Wei,HUANG Songling,et al. New study on the principle of air gapped core current transformer[J]. Electrical Measurement and Instrumentation,2007,44(10):44-47.

[10] 黄纯,何怡刚,江亚群,等. 交流采样同步方法的分析与改进[J]. 中国电机工程学报,2002,22(9):39-42.

注:A 为 4 阶三角卷积窗 FFT,B 为不加窗 FFT。

- HUANG Chun, HE Yigang, JIANG Yaqun, et al. Analysis and improvement of synchronization technique for AC sampling[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 39-42.
- [11] BILSKI P, WINIECKI W. Virtual spectrum analyzer based on data acquisition card[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(1): 82-87.
- [12] TONG Yue, LI Hongbin, CHENG Lei, et al. A highly accurate ECT calibration system based on virtual instrument technology [C]// Proceedings of the Seventh International Conference on Electronic Measurement & Instruments. Wuhan, China: [s.n.], 2008: 246-248.
- [13] TENG J H, CHAN S Y. A Labview based virtual instrument for power analyzers[J]. IEEE Power System Technology, 2000(1): 179-184.
- [14] 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: 38-42.
- [15] 廖传书, 刘单. 多路时间采集系统的 LabVIEW 设计[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(2): 5-7.
- LIAO Chuanshu, LIU Dan. LabVIEW design on multi-channel time gathering system[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(2): 5-7.

(编辑: 李 玲)

作者简介:

徐 波(1971-), 女, 陕西西安人, 硕士, 从事电力系统自动化方面的研究工作。

High-precision ECT calibration system based on virtual instrument technology

XU Bo¹, TONG Yue²

(1. Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. Huazhong University of Science of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: An ECT(Electronic Current Transducer) calibration system is designed based on virtual instrument technology to test the analog output of high-precision ECT. Its overall structure is introduced and the influence of frequency variation on signal extraction is analyzed for the normal working frequency range of ECT measurement channel, i.e. 49.5~50.5 Hz, stipulated by IEC. The fourth-order triangle convolution window algorithm is used to extract the signal detected. Compared with FFT(Fast Fourier Transform) recommended by IEC60044-8(ECT), it reduces the leakage effect error of non-integer-period sampling, resulting in higher accuracy. Experiment shows that, when the frequency deviation is within 50 ± 0.5 Hz, the ratio error reaches the order of 10^{-4} and the phase error reaches the order of 10^{-2} minutes, meeting the calibration demand of 0.2 S class ECT.

This work is supported by the Scientific Research Foundation of Nanjing Institute of Technology.

Key words: electronic current transducer; analog output; calibration system; IEC; FFT