

基于虚拟仪器的谐波检测研究

王 燕,张俊敏,刘开培

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 介绍了基于离散傅里叶变换数字滤波器以及基于重采样理论和均值数字滤波器的瞬时谐波检测方法。运用 Matlab 软件对两种方法进行了仿真研究,结果表明两者既保留了数字滤波器的准确性,又解决了数字滤波器跟随性和实时性差的问题。应用 LabVIEW 软件和数据采集卡在 PC 机上对两种谐波检测系统的动态性能进行实验,验证了仿真结果的正确性。还采用快速傅里叶变换的谐波测量方法,在 LabVIEW 软件平台上开发了虚拟谐波测量仪,为谐波分析与谐波抑制提供了依据。

关键词: 有源滤波器; 瞬时谐波电流检测; 谐波测量; 虚拟仪器; LabVIEW

中图分类号: TM 93

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)03-0030-04

0 引言

从电网中实时准确地提取谐波电流^[1]是电网谐波治理的关键问题之一。本文介绍两种新的谐波检测方法:基于重采样理论和均值滤波的三相电路谐波检测方法和基于离散傅里叶变换 DFT(Discrete Fourier Transform)数字滤波器的谐波检测方法。两种方法都不受电网电压的影响,在克服了模拟低通滤波器所带来的误差的同时,也解决了长期以来数字滤波器的跟随性和实时性差的问题,有利于补偿系统的数字化。

在对谐波检测算法仿真的基础上,本文采用虚拟仪器的思想利用 LabVIEW 开发平台对两种谐波检测系统的跟随性能进行了实验,并设计了电力系统谐波测量仪。该仪器提供电压谐波、电流谐波畸变率及每次谐波含量等的测量,为谐波分析评估和治理提供依据。实验结果证明了谐波检测方法的正确性及谐波测量仪的可行性。

1 基于重采样和均值滤波的谐波检测方法

1.1 瞬时无功功率理论谐波检测原理^[2]

基于重采样的瞬时无功功率理论原理如图 1 所示。

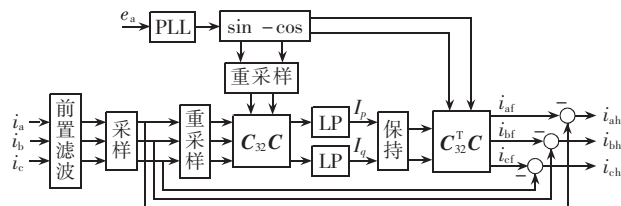


图 1 谐波检测原理图

Fig.1 The principle of harmonic measuring

图 1 中,前置滤波器为模拟滤波器,用于滤除该系统分析不到的谐波。采样应尽量保存电网电流所含信息,因此该处采样频率的设置应较高;而重采样的目的是提取基波,因此要考虑准确性并兼顾实时性,根据采样理论要求^[3],在保证基波频谱不产生混叠的情况下,尽量降低采样频率。图 1 中有

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = C C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$$

所以,

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos[(n \mp 1)\omega t + \varphi_n] \\ -\sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin[(n \mp 1)\omega t + \varphi_n] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $n = 3k \pm 1, k$ 为正整数;当 $k = 0$ 时, $n = 1; n = 3k + 1$ 时取上符号, $n = 3k - 1$ 时取下符号。

1.2 重采样方法

在图 1 中,引入了两次采样过程,分别被称为第一次采样和重采样。下面介绍重采样理论。为分析方便,设一次采样频率为 w_1 ,每周期采样点数为 N_1 ;重采样的频率为 w_2 ,每周期采样点数为 N_2 ;设模拟滤波器后的电流中所含最高谐波次数为 N' ,基波频率为 w_0 。

定理^[4] 若带限周期信号基频为 w_0 ,最高频率为 $N'w_0$,则对该信号重采样,使得 $nw_0(n = 0 \sim N')$ 频率处不混叠的最小采样频率为

$$w_{\min} = (N' + 1 + n) w_0 \quad (3)$$

直流分量不允许混叠,设 $N' = N_1 / 4 - 1$,将 $n = 0$ (对应直流分量)代入式(3)可得 $w_{\min} = (N_1 / 4) w_0$ 。

1.3 均值滤波器

将 i_p, i_q 表达式展开后可以看出 i_p 和 i_q 中只含 $3n$ 次谐波^[5]。对只含 $3n$ 次谐波的 i_p 和 i_q 重采样, 为了使重采样后的频谱也只会含 $3n$ 次谐波, 则在确定重采样频率的时候, 应该以 3 为等级在 $w_{\min}$ 和采样频率 w_s 之间增加或减少 (如图中的虚线 1, 2), 如图 2 所示^[2] ($X(e^{jw})$ 为频率 w 处的幅值)。

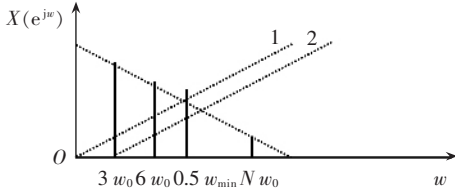


图 2 对 I_p 或 I_q 重采样后的频谱图

Fig.2 The spectrum after re-sampling I_p or I_q

若 N_1 为 3 的倍数, 则 $N'+1=N_1/4$ 为 3 的倍数, 可令被测信号的最高频率分量 N 等于 N_2 , 也为 3 的倍数, 则图 2 中的频谱也只会含 $3n$ 次谐波。

设滤波器的阶次为 k , 电网基频为 w_0 , 采样频率为 w_s , 有 $w_s/w_0=N$, 则滤波器的转移函数为

$$H(z)=\sum_{i=0}^{k-1}h(i)z^{-i} \tag{4}$$

式中 $h(i)$ 为滤波器的单位抽样响应。

令 $h(i)=1/k$, 则

$$H(z)=(1/k)(1-z^{-k})/(1-z^{-1}) \tag{5}$$

显然这是一个均值滤波器, 其幅频特性为

$$|H(e^{jw})|=(1/k)\left|\frac{\sin \frac{k\omega}{2}}{\sin \frac{\omega}{2}}\right| \tag{6}$$

令 $|H(e^{jw})|_{w=3n\omega_0}=0$, 可得:

$$k_{\min}=N/3 \tag{7}$$

2 基于 DFT 的瞬时谐波检测方法^[6]

如果能够设计出一种滤波器, 该滤波器在基频处的幅值无衰减, 相位无延时, 其他次谐波均滤掉, 就能实时检测出基波。

设采样频率为 f_s , 每周期采样点数为 N_s ; 滤波器的单位抽样响应为 $h(n)(n=0,1,\cdots,N-1;N$ 为滤波器长度), 基波频率为 f_0 , 信号的数字域基频为 $w_0=2\pi/N$ 。

将 DFT 看作一组滤波器^[7], 令

$$h(n)=\begin{cases} W_N^{(N-1-n)} & n=0,1,\cdots,N-1 \\ 0 & n<0 \text{ 或 } n\geq N \end{cases} \tag{8}$$

则滤波器的幅频特性和相频特性分别为

$$\theta(\omega)=-2\pi/N+(N-1)(\omega-2\pi/N)/2 \tag{9}$$

$$|H(j\omega)|=\sin\left[\frac{N}{2}\left(\frac{2\pi}{N}-\omega\right)\right]/\sin\left[\frac{N}{2}\left(\frac{2\pi}{N}-\omega\right)\right] \tag{10}$$

对基波信号而言 $\omega=2\pi/N$, 此时

$$\theta=-2\pi/N \tag{11}$$

设滤波器的输出为 $y(N)$, 则

$$y(N-1)=\sum_{n=0}^{N-1}x(n)h(N-1-n) \tag{12}$$

由 DFT 的圆周移位定理可得递推 DFT 计算公式为

$$y(N)=W_N^{-1}[y(N-1)+x(N)-x(0)] \tag{13}$$

式中 $W_N^{-1}=e^{-j2\pi/N}$ 。

根据实际情况, 希望滤波器在基波处的幅值为 1, 则滤波器的实际输出为

$$y'=y(N)/N \tag{14}$$

3 基于 Matlab 的算法仿真

设系统要求补偿到 30 次谐波, 则 30 次以上的谐波被前置滤波器滤除。

3.1 基于重采样和均值滤波算法仿真

根据重采样理论, 一次采样频率设为 6 kHz, 每周期采样 120 个点, 重采样频率为 1.5 kHz, 每周期采样 30 个点。由式(7)可知均值滤波器的最小阶数为 10 阶。令 $i_a=\sin(\omega t)+\sin(2\omega t)+\sin(5\omega t)+\sin(7\omega t)$, 系统的跟随性能如图 3 所示 (以 a 相为例)。

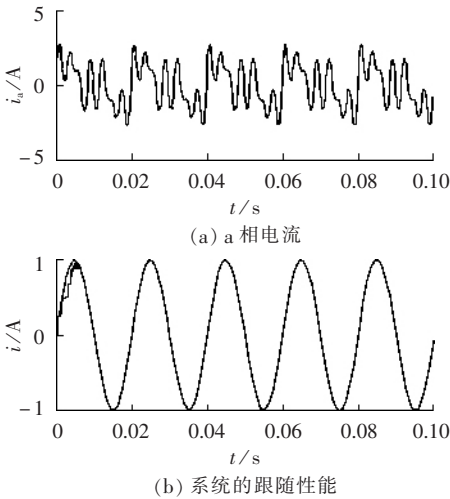


图 3 系统的跟随性能

Fig.3 The following performance of system

由仿真结果可以看出, 采用均值滤波器可使三相谐波补偿系统的跟随性能达到 1/3 个周期, 提高了检测系统的跟随性能。

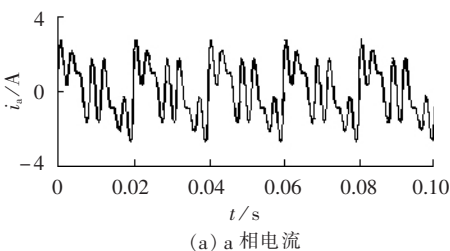
应用重采样方法可减少存储 $\sin, \cos$ 的容量, 计算量减少了 3/4, 软件开销可大大降低。

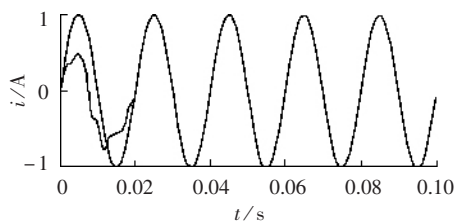
3.2 基于 DFT 的算法仿真

令含有谐波的电流为

$$i_a=\sin(\omega t)+\sin(2\omega t)+\sin(5\omega t)+\sin(7\omega t)$$

基于 DFT 的算法仿真结果如图 4 所示。





(b) 滤波器的跟随性能

图 4 基于 DFT 的滤波器跟随性能

Fig.4 The following performance of digital filter based on DFT

根据仿真结果可以看出,基于 DFT 的数字带通有限长单位冲激响应(FIR)滤波器,在基频处无幅值衰减,无相位延时,无需坐标变换;并且在实现该滤波器时,由式(13)(14)可以看出每输出一个点只须 2 次乘法、2 次加法,计算量大大减少。带通滤波器的动态响应时间为一个整周期。

4 基于虚拟仪器的实验研究

4.1 实验原理

实验原理^[8]如图 5 所示。

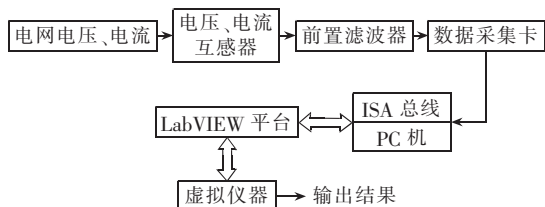


图 5 实验原理框图

Fig.5 The block diagram of experiment

图 5 中电压(电流)互感器将电网高电压、大电流转换成 $-5 \sim +5 \text{ V}$ 的电信号。数据采集卡将经过前置滤波器的信号进行采集、处理后送到计算机总线。基于 LabVIEW 软件平台开发谐波检测与分析程序,对所采集的数据进行分析、计算与显示。

4.2 虚拟仪器程序设计

4.2.1 谐波检测算法程序设计

算法程序设计主要利用信号处理节点,该节点位于功能模板的 Signal Processing 子模板中。信号节点包括信号产生、时域处理、频域处理、信号测量、数字滤波和窗函数等节点。

4.2.2 虚拟谐波测量仪器程序设计

利用 LabVIEW 提供的一组函数编写虚拟谐波测量程序^[9]。LabVIEW 的 Functions 模板内的自功率谱函数(auto power spectrum.vi)用快速傅里叶变换(FFT)求出采集时域信号的自功率谱。在此基础上谐波分析函数(Harmonic Analyzer.vi)可以对经过前置滤波器后的信号进行谐波成份分析,给出各次谐波的频率和幅值,以及总谐波畸变率。

电流总谐波畸变率 $\text{THD}_i(\%)$ 定义为

$$\text{THD}_i = \frac{I_H}{I_1} \times 100\%, \quad I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (15)$$

式中 I_n 为第 n 次谐波电流有效值; I_1 为基波电流有效值。

电压谐波总畸变率 $\text{THD}_u(\%)$ 定义与电流谐波总畸变率类似,将 I 改成 U 即可。

4.3 实验结果

本实验利用频率为 50 Hz、幅值为 E 的对称方波信号模拟经过电压(电流)互感器转换的电网电压(电流)信号。对称方波信号直流分量等于零,且脉宽等于周期的一半,写成傅里叶级数为

$$f(t) = -\frac{2E}{\pi} \left[\cos(w_1 t) + \frac{1}{3} \cos(3w_1 t + \pi) + \frac{1}{5} \cos(5w_1 t) + \dots \right] \quad (16)$$

其频谱只包含基波和奇次谐波的余弦分量。

4.3.1 谐波检测系统实验结果

基于重采样和均值滤波的瞬时无功功率理论谐波检测系统实验结果如图 6 所示。

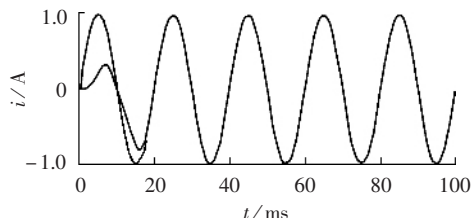


图 6 系统跟随性能

Fig.6 The following performance of system

基于 DFT 数字滤波器的谐波检测系统实验结果如图 7 所示。

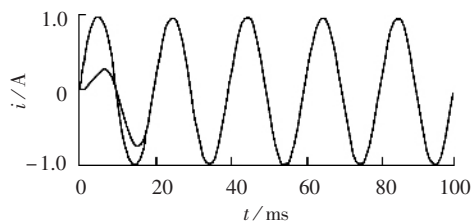


图 7 基于 DFT 的系统跟随性能

Fig.7 The following performance of system based on DFT

4.3.2 虚拟谐波测量仪器实验结果

实验结果如图 8 所示。虚拟谐波测量仪的前面板只显示了基波到 10 次谐波的测量结果,用于验证输入信号的谐波含量。

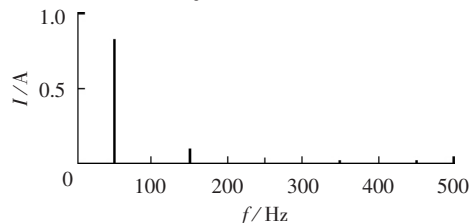


图 8 谐波测量实验结果

Fig.8 Results of harmonics measuring

由幅值频谱及显示的幅值和频率值可看出,该信号不含偶次谐波。这与输入方波信号的特性吻合,

验证了虚拟谐波测量仪的正确性与可行性。此外,还可以知道其总谐波畸变率为 12.27 %。

5 结论

本文在对两种新的谐波检测方法深入研究的同时,重点对其算法进行仿真研究,并在仿真基础上基于 LabVIEW 平台对上述方法进行了实验研究。通过理论推导和实验分析,验证了两种谐波检测方法的可行性。仿真实验也证明了本文所设计的虚拟谐波测量仪的可行性,使用该仪器可清楚地了解电压谐波、电流谐波畸变率及每次谐波含量等。使用虚拟仪器技术开发周期短、仪器成本低、界面友好、使用方便、可靠性高、能共享 PC 机丰富的软硬件资源,是今后测量领域发展的一个重要方向。

参考文献:

- [1] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 王兆安,李民,卓放. 三相电路瞬时无功功率理论的研究[J]. 电工技术学报,1992,7(3):55-59.
WANG Zhao-an,LI Min,ZHUO Fang. Study theory of instantaneous reactive power in three-phase circuits [J]. **Journal of Electrician Technique**,1992,7(3):55-59.
- [3] 刘开培,李俊娥. 正弦信号干扰下低通带限型频谱信号的采样[J]. 仪器仪表学报,2003,(1):89-91.
LIU Kai-pei,LI Jun-e. Sampling theorem for band-limited lowpass signal with disturbance from a sine signal[J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**,2003,(1):89-91.
- [4] 刘开培,张俊敏,宣扬. 基于重采样理论和均值滤波的三相电路谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):78-82.
LIU Kai-pei,ZHANG Jun-min,XUAN Yang. Harmonic detection for three-phase circuits based on resampling theory and mean filtering[J]. **Proceedings of the CSEE**,2003,23(9):78-82.
- [5] 王群,姚为正,王兆安. 低通滤波器对谐波检测电路的影响[J]. 西安交通大学学报,1999,33(4):5-8.
WANG Qun,YAO Wei-zheng,WANG Zhao-an. Effect of low pass filter on harmonics detection circuit[J]. **Journal of Xi'an Jiaotong University**,1999,33(4):5-8.
- [6] 刘开培,张俊敏. 基于 DFT 的瞬时谐波检测方法[J]. 电力自动化设备[J]. 2003,23(3):8-10.
LIU Kai-pei,ZHANG Jun-min. A new detecting method based on DFT for instantaneous harmonic [J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(3):8-10.
- [7] 王世一. 数字信号处理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997.
- [8] 姜本刚,刘永清,吴今培. 虚拟仪器在电力系统谐波测量中的应用[J]. 计算机自动测量与控制,2000,8(5):28-30.
LOU Ben-gang,LIU Yong-qing,WU Jin-pei. Application of virtual instrument in harmonic measurement in power system [J]. **Computer Automated Measurement & Control**,2000,8(5):28-30.
- [9] 刘兆妍,雷振山. 基于虚拟仪器的谐波检测技术[J]. 电测与仪表,2001,38(9):19-21.
LIU Zhao-yan,LEI Zhen-shan. Techniques of harmonics measurement based on virtual instrument [J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**,2001,38(9):19-21.
- [10] 戴朝波,林海雪,雷林绪. 两种谐波电流检测方法的比较[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):80-84.
DAI Zhao-bo,LIN Hai-xue,LEI Lin-xu. A study on the comparison of two harmonic current detecting methods[J]. **Proceedings of the CSEE**,2002,22(1):80-84.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

王燕(1981-),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事信号处理、电能质量分析与控制方面的研究(E-mail:babyjohnan@163.com);

张俊敏(1977-),女,湖北襄樊人,博士研究生,主要从事信号处理、电能质量分析与控制方面的研究;

刘开培(1962-),男,湖北荆门人,教授,博士研究生导师,博士,从事智能控制和信号检测与处理、电能质量分析与控制等方面的研究。

Research of harmonic measuring based on virtual instrument

WANG Yan,ZHANG Jun-min,LIU Kai-pei
(Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: Two new instantaneous harmonic current measuring methods are introduced,they are the method based on DFT(Discrete Fourier Transform) digital filter and the method based on re-sampling theory and digital mean filter.Both are simulated with Matlab,and results show that the following and real-time performances of digital filter are improved while the veracity is kept.The dynamic performances of both methods are experimented on personal computer with LabVIEW and data acquisition card,which verifies the correctness of the simulative results. Applying the harmonic measuring method based on fast Fourier transform,a virtual harmonic measuring instrument is designed in LabVIEW environment. It may be used in harmonic analysis and suppression.

This project is supported by Natural Science Fund of Hubei Province(2003ABA046).

Key words: active power filter; instantaneous harmonic current detection; harmonic measuring; virtual instrument; LabVIEW