

# 电能质量谐波间谐波在线快速检测方法研究

李加升<sup>1,2</sup>, 柴世杰<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 益阳职业技术学院, 湖南 益阳 413049)

**摘要:** 电能质量中谐波和间谐波在线快速检测方法越来越受关注, 采用基于加窗插值理论快速傅立叶变换进行频谱分析, 根据电力系统中谐波和间谐波的特点, 提出“消去法”进行谐波间谐波检测。此方法容易在 DSP 中实现, 适合在线快速检测装置中应用, 仿真结果表明了该方法的准确性和实用性。

**关键词:** 电能质量; 谐波; 间谐波; 消去法

## Research of online rapid detection method about harmonic and inter-harmonic of power quality

LI Jia-sheng<sup>1,2</sup>, CHAI Shi-jie<sup>2</sup>

(1. Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Yiyang Professional Technology Institute, Yiyang 413049, China)

**Abstract:** Harmonic and inter-harmonic online rapid detection methods of power quality become increasingly concerned. By using window interpolation theory based fast Fourier transform spectrum analysis and according to the power system harmonics and inter-harmonic characteristics, the "elimination" of harmonic and inter harmonic detection is proposed. This method is easy to be achieved in DSP for rapid detection devices in the online application. Simulation results indicate the accuracy and practicability of this method.

**Key words:** power quality; harmonic; inter-harmonics; elimination

中图分类号: TM930.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)18-0062-03

## 0 引言

随着电子技术和电力电子器件的发展, 电力电子设备的应用越来越广泛, 这些非线性电力设备使电网中产生了大量的谐波和间谐波, 导致电能质量下降。以微处理器为核心的各种控制设备、自动化设备对电能质量十分敏感, 瞬间的电能恶化, 有可能导致程序混乱, 从而产生重大的质量事故, 显然电网参数的快速、准确监测对电能质量的治理具有十分重要的意义。本文分析了现有谐波和间谐波检测方法, 根据谐波与间谐波的特点, 采用基于加窗插值理论快速傅立叶变换进行频谱分析, 提出“消去法”进行谐波间谐波检测。由于主要应用快速傅立叶变换, 容易在 DSP 中实现; 与文献[1,2]提出的方法相比可以大大减少检测周期, 提高了实时性, 非常适合在线电能检测装置中应用。在 Matlab 里进行了仿真, 结果表明本文方法的准确性和实用性。

## 1 谐波和间谐波检测算法

基金项目: 湖南省自然科学基金(05JJ40001); 湖南省高等学校科学研究项目(08D118)

传统的 FFT 算法是分析谐波的主要工具, 然而该方法在信号中含有间谐波的情况下, 很难实现信号的同步采样, 因而在分析时存在着严重的频谱泄漏, 导致结果具有很大误差。针对 FFT 存在的问题, 国内外的学者提出了加窗插值修正算法及其改进算法<sup>[2-5]</sup>, 有效地抑制了频谱泄漏以及栅栏效应造成的误差, 提高了谐波和间谐波检测精度。然而现有加窗插值 FFT 算法检测间谐波通常需要几十个信号周期<sup>[2]</sup>, 当间谐波和谐波之间的距离相接近时, 为了准确分辨间谐波, 分析窗宽度还需进一步增加, 参数估计的实时性将会变差。本文先简介 Matlab 中要用到的加窗插值 FFT 算法——双峰谱线修正算法<sup>[3]</sup>, 然后根据间谐波的特点, 给出本文关于间谐波的处理方法, 最后在 Matlab 中进行仿真比较。

### 1.1 双峰谱线修正算法简介

假设一个频率为  $f_0$ 、幅值为  $A$ 、初相位为  $\theta$  的单一频率信号  $x(t)$ , 在经过采样率为  $f_s$  的模数变换后得到如下形式的离散信号:

$$X_n = A \sin(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \theta)$$

如果所加窗函数的时域形式为  $w(n)$ , 其连续频

谱为  $W(2\pi f)$ , 则加窗后该信号的连续傅立叶变换为:

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n)\omega(n)e^{j2\pi fn} = \frac{1}{2j} [e^{j\theta} W(\frac{2\pi(f-f_0)}{f_s}) - e^{-j\theta} W(\frac{2\pi(f+f_0)}{f_s})]$$

如果忽略负频点  $-f_0$  处频峰的旁瓣影响, 在正频点  $f_0$  附近的连续频谱函数可以表达为

$$\tilde{X}(f) = \frac{A}{2j} e^{j\theta} W(\frac{2\pi(f-f_0)}{f_s})$$

对上式进行离散抽样, 即可得到它的离散傅立叶变换的表达式为

$$\tilde{X}(k\Delta f) = (A/2j) e^{j\theta} W(2\pi(k\Delta f - f_0)/f_s)$$

式中: 离散频率间隔为  $\Delta f = f_s/N$ ,  $N$  是数据截断长度。

峰值频率  $\Delta f_0 = k_0 f$  很难正好位于离散谱线频点上, 也就是说,  $k_0$  一般不是整数, 设峰值点左右两侧的谱线分别为第  $k_1$  和  $k_2$  条谱线, 这两条谱线也应该是峰值点附近幅值最大和次最大的谱线, 显然,  $k_1 \leq k_0 \leq k_2 = k_1 + 1$ , 令这两条谱线幅值分别是  $y_1 = |X(k_1 \Delta f)|$ ,  $y_2 = |X(k_2 \Delta f)|$ , 由于  $0 \leq k_0 - k_1 \leq 1$ , 所以可以引入一个辅助参数  $a = k_0 - k_1 - 0.5$ 。显然,  $a$  的数值范围是  $[-0.5, 0.5]$ , 这样

$$\frac{y_2 - y_1}{y_2 + y_1} = \frac{|W(2\pi(-a+0.5)/N)| - |W(2\pi(-a-0.5)/N)|}{|W(2\pi(-a+0.5)/N)| + |W(2\pi(-a-0.5)/N)|}$$

令  $\beta = (y_2 - y_1)/(y_2 + y_1)$ , 文献[4]通过多项式逼近的方法得到不同窗函数所对应的修正公式。本文根据文献[5]对各种窗函数的分析, 采用 Blackman 窗对采样数据进行加窗处理, 因为 Blackman 窗旁瓣最大泄漏为  $-58$  dB, 对远隔旁瓣以  $-6$  dB 个的速度下降。在采样较少的情况下能最大程度的减少谐波对邻近间谐波的频谱泄漏。本文对修正公式摘录如下:

$$w(n) = 0.42 - 0.5 \cos(2\pi n/N) + 0.08 \cos(4\pi n/N) \quad (n = 0, 1, \dots, N-1)$$

$$a = 1.96043163\beta + 0.15277325\beta^3 + 0.07425838\beta^5 + 0.04998548\beta^7$$

$$\theta = \arg[\tilde{X}(k_i \Delta f)] + \frac{\pi}{2} - \pi(a - (-1)^i 0.5) \quad (i = 1, 2)$$

$$A = (y_1 + y_2)(2.70205774 + 1.07115106a^2 + 0.23361915a^4 + 0.04017668a^6)/N$$

其中:  $w(n)$  为 Blackman 窗函数;  $a$ ,  $\beta$  为辅助参数;  $\theta$  为估测的相角;  $A$  为估测的幅值。

## 1.2 间谐波特点及检测

测量中非同步引起的频率泄漏和栅栏效应造成的误差是不可避免的, 并且间谐波的幅值往往远小于基波与谐波分量的幅值, 这意味着间谐波分量对频谱泄漏具有很高的灵敏度。谐波分量的频谱泄漏有可能淹没真实的间谐波, 或者产生虚假的间谐波而难以分辨。当间谐波与基波、谐波分量的频率接近时, 这种影响就更加明显。对于频谱泄漏, 我们通常采用加窗的方法来处理, 窗的长度越长, 频谱泄漏越低。文献[1,2]算法中窗宽一般要达几十个信号周期, 当间谐波和谐波之间的距离相接近时, 为了准确分辨间谐波, 分析窗宽度还需进一步增加, 参数估计的实时性将会变差。为减少谐波分量对间谐波测量的影响, 文献[6,7]中提出了一种两步测量技术, 它是利用频域插值法做到准确测量谐波参数, 再在时域或频域中减去谐波分量, 尽可能减少或消除谐波非同步泄漏对间谐波测量的影响, 但该方法并没有具体测量出各离散间谐波的参数, 它是按照 IEC 中规定的间谐波“族”的概念估计间谐波分量, 不适合在在线快速检测装置中应用, 本文对此方法进行了改进从而适合实际检测装置中的应用。由于间谐波对谐波的频谱泄漏很小, 本文采用加窗插值的 FFT 进行谐波参数的检测<sup>[8]</sup>。然后在时域中减去谐波分量, 这样可以大大减少谐波对间谐波的频谱泄漏, 而且不必像文献[1,2]那样要几十个周期检测间谐波。减少了采样周期可以提高计算的实时性, 本文称此检测方法为“消去法”检测间谐波, 其它文献中的方法为“一步法”(仿真时用到的是双峰谱线修正算法)。

## 2 仿真结果

本文在 Matlab7.0 中进行仿真验证, 假设电网中的波形为:

$$X(t) = \sum_m A_m \cos(2\pi m f_0 t + \varphi_m)$$

设电网基频为 49 Hz, 采样频率为 1 600 Hz, 属于非同步采样。各参数设定如表 1。

表 1 各次谐波的幅值和相位的初始值

参数设定	间谐波	基波	谐波	间谐波	谐波	间谐波	谐波	谐波
频率/Hz	25	50	150	165	350	365	400	450
幅值/V	1.32	220	19.8	1.54	17.6	1.98	4.4	11
初相位/rad	1.5	0.6	0.2	2	0.5	1.3	2.6	3

根据文献[2]对加窗长度的分析, 要基本消除频谱泄漏本文数据需要三十多个周期。分以下三种情况分析比较:

情况 1: 仿真时设采样点数为 1 024 (相当采样 32 个周期), 此时用“一步法”测量谐波和间谐波参数, 检测结果如表 2。

表 2 “一步法”采样点数为 1 024 时各次谐波的幅值和相位的检测值

Tab.2 The measured values of harmonic amplitude and phase when "one-step" for the 1 024 sampling points

参数设定	间谐波	基波	谐波	间谐波	谐波	间谐波	谐波	谐波
频率/Hz	25	50	150	165	350	365	400	450
幅值/V	1.32	220	19.800 2	1.536 9	17.600 2	1.976 8	4.4	11
初相角/rad	1.5	0.6	0.199 9	2.000 2	0.499 9	1.300 2	2.6	3

分析: 采样 32 周期基本消除了谐波对间谐波的频谱泄漏, 间谐波的参量可以比较准确地测量出来。

个周期), 此时用“一步法”测量谐波和间谐波参数, 检测结果如表 3。

情况 2: 仿真时设采样点数为 256 (相当采样 8

表 3 “一步法”采样点数为 256 时各次谐波的幅值和相位的检测值

Tab.3 The measured values harmonic amplitude and phase when "one-step" for the 256 sampling points

参数设定	间谐波	基波	谐波	间谐波	谐波	间谐波	谐波	谐波
频率/Hz	25	50	150	165	350	365	400	450
幅值/V	1.32	220	19.7646	19.7817	17.5787	17.5848	4.4012	11.0001
初相位/rad	1.5	0.6	0.2050	-2.807 3	0.5056	-2.499	2.5970	2.9999

分析: 由于采用周期减少, 谐波对间谐波的频谱泄漏严重, 导致 3 次谐波 (150 Hz) 7 次谐波 (350 Hz) 将邻居的间谐波淹没, 最终导致测量结果的错

误。下面应用“消去法”实现在较少的采样周期下间谐波的检测。

表 4 “消去法”采样点数为 256 时各次谐波的幅值和相位的检测值

Tab.4 The measured values harmonic amplitude and phase when "elimination" for the 256 sampling points

参数设定	间谐波	基波	谐波	间谐波	谐波	间谐波	谐波	谐波
频率/Hz	25	50	150	165	350	365	400	450
幅值/V	1.32	220	19.764 6	1.556 6	17.578 7	2.027 4	4.012	11.000 1
初相角/rad	1.5	0.6	0.205 0	1.901 3	0.505 6	1.191 8	2.597 0	2.999 9

情况 3: 仿真时设采样点数为 256 (相当采样 8 个周期), 此时“消去法”测量谐波和间谐波参数, 检测结果如表 4。

减少采用周期而且 Matlab 中的仿真结果也表明其准确度很高, 又因为本文方法主要应用快速傅立叶变换, 容易在 DSP 中实现, 非常适合在线电能检测装置中应用。

分析: 一般情况下, 检测出电信号中的间谐波需要更高的频率分辨率, 更长的周期数, 如“情况 1”中的仿真。由于在时域中减去了谐波分量, 基本消除了谐波对间谐波的频谱泄漏, 从而可以用“消去法”在减去了谐波分量的数据中计算出间谐波分量及其相关参数。这样即使在检测周期比“一步法”要少的多 (相当于原来的四分之一), 依然能够比较准确的检测间谐波。

参考文献

[1] Don H, Ken R, Ralph M. An Efficient Algorithm For High Resolution, Power Quality Measurements of Sparsely [Z]. Distributed Power System Harmonics and Inter Harmonics [Z]. IEEE WESCANX 95 Proceeding.

[2] 祁才君, 王小海. 基于插值 FFT 算法的间谐波参数估计 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(1).  
QI Cai-jun, WANG Xiao-hai. Interharmonics Estimation Based on Interpolation FFT Algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(1).

[3] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进型算法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.

3 结语

减少采样周期在实际测量中具有很重要的意义, 因为 DSP 的 dsplib 库中只提供了 8-1024 点的 FFT 算法, 若采样频率较高时, 采样 30 多个周期便不止 1024 点了, 这样便不能直接调用 DSP 的 FFT 函数给编写程序带来困难。采用本文方法可以大大

(下转第 69 页 continued on page 69)

- [6] 王磊,单永梅,孙鸣,等.发电厂继电保护定值整定计算软件中定值单的生成[J].继电器,2006,(34(5)):21-23.  
WANG Lei, SHAN Yong-mei, SUN Ming, et al. Creation of the Report Form in the Setting Calculation Software of Relay Protection for Power Plant[J]. Relay, 2006,34(5):21-23.
- [7] 王海燕,焦彦军,范凯,等.发电厂定值整定及管理系统[J].电气时代,2005,32(3):100-102.  
WANG Hai-yan, JIAO Yan-jun, FAN Kai, et al. Research on Power Plant Fixed Value Setting Based on Components and Management System[J]. Electric Age, 2005, 32(3):100-102.
- [8] 孔祥敏,焦彦军,柯赫震.通用的发电厂继电保护整定计算及管理软件[J].继电器,2006,34(4):14-16.  
KONG Xiang-min, JIAO Yan-jun, KE He-zhen. University Protective Relaying Setting Calculation and Management System for Power Plant[J]. Relay, 2006,34(4):14-16.
- [9] 刘为雄,蔡泽祥,孔华东,等.发电厂继电保护管理信息系统研究[J].中国电力,2002,85(4):58-61.  
LIU Wei-xiong, CAI Zhe-xiang, KONG Hua-dong, et al. Study on Management Information System of Relay Protection for Power Plant[J]. Electric Power,2002, 85(4):58-61.
- [10] 姜昌华. 插件技术及其应用[J]. 继电器,2005, 33(21):79-83.
- JIANG Chang-hua. About the Theory And Applications of Plug-In[J]. Relays, 2005, 33(21):79-83
- [11] 卓越,吕飞鹏,黄斌,等. Ms. Net 插件技术在继电保护整定计算软件中的应用研究[J]. 继电器,2005,33(21): 55-57.  
ZHUO Yue, Lü Fei-peng, HUANG Bing, et al. Study on the Application of MS.Net Based Plug-in Technology in Relay Protection Setting Calculation Software[J]. Relay. 2005, 33(21): 55-57.
- [12] 高春如.大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [13] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [14] jecshon.Designing Extensible Windows Forms Applications[Z].
- [15] Redth. Plug-ins in C#[M].MSDN Library,2004.
- [16] Jonathan Dick. An Introduction to Plug-ins in C#[M]. MSDN library,2004,

---

收稿日期:2009-01-16

作者简介:

廖小君(1974-),男,硕士,讲师,从事微机继电保护方面研究及信息系统的研究;E-mail:liaoqx\_px@sina.com

吕飞鹏(1968-),男,博士,教授,从事电力系统继电保护和综合信息处理智能系统的研究。

---

(上接第64页 continued from page 64)

- PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al. An Improved Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Using FFT Technique[J].Proceedings of the CSEE, 2003,23(6): 50-54.
- [4] 祁才君,陈隆道,王小海.应用插值 FFT 算法精确估计电网谐波参数[J].浙江大学学报,2003, 37(1):113-116.  
QI Cai-jun,CHEN Long-dao,WANG Xiao-hai.High-accuracy Estimation of Electrical Harmonic Parameters by Using the Interpolated FFT Algorithm[J]. Journal of Zhejiang University,2003,37(1):113-116.
- [5] 王波,杨洪耕.基于 AR 谱估计和插值 FFT 的间谐波检测方法[J].继电器,2006,34(4):49-52,56.  
WANG Bo,YANG Hong-geng. A Method for Interharmonic Measurement based on AR Model Spectral Estimation and Interpolation FFT Algorithm[J]. Relay, 2006,34(4):49-52,56.
- [6] Grandke T. Interpolation Algorithms for Discrete Fourier Transforms of Weighted Signals[J]. IEEE Trans on IM, 1983,32(2): 350-355.
- [7] Daniele Gallo, Roberto Langella, Alfredo Testa, Desynchronized Processing Technique for Harmonic and Interharmonic Analysis[J]. IEEE Trans on Power Del, 2004,19(3).
- [8] 李加升,柴世杰,戴瑜兴.基于插值理论的准同步算法在谐波检测中的应用研究[J].电测与仪表,2008,45(6):1-4,9.  
LI Jia-sheng,CHAI Shi-jie,DAI Yu-xing.The Study of Quasi-simultaneous Algorithm Based on Interpolation in the Application of Harmonic Detection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008,45(6):1-4,9.

---

收稿日期:2008-10-10; 修回日期:2008-11-06

作者简介:

李加升(1965-),男,副教授,工学硕士,主要研究方向为电能质量检测、信号处理;E-mail:lijishenga@163.com

柴世杰(1968-),男,硕士研究生,主要研究方向为电能质量检测、信号处理。