

基于双插值 FFT 算法的间谐波分析

蒋春芳¹, 刘敏²

(1. 广西电力工业勘察设计研究院, 广西 南宁 530023; 2. 常州工学院电子信息与电气工程学院, 江苏 常州 213002)

摘要: 为了减小频谱泄漏的影响, 提高间谐波分析精度, 提出了加余弦窗双插值 FFT 算法来分析间谐波。该算法通过选取合适的窗函数, 对采样信号进行加窗后, 用 FFT 计算出离散频谱, 再利用多项式逼近的方法得到频率和幅值的修正公式来对谐波分析结果进行修正。修正谐波幅值时, 选择距频点最近的左右两根谱线进行加权, 对两根谱线采用的权重与它们各自的幅值成正比。该算法能够有效地降低泄漏和噪声干扰, 提高了间谐波和谐波分析的准确性。仿真结果证实了算法的正确性与易实现性。

关键词: 电力系统; 间谐波; FFT; 余弦窗函数; 双插值

Inter-harmonics analysis based on double interpolation FFT algorithm

JIANG Chun-fang¹, LIU Min²

(1. Guangxi Electric Industry Investigation Design and Research Institute, Nanning 530023, China;
2. Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

Abstract: To reduce disturbance by the frequency leakage and improve the accuracy of inter-harmonics analysis, the poly-cosine window and double interpolation FFT algorithm is presented. The windowed FFT transform is applied to the sampling signal choosing a suitable window function. Then a further amendment is made to the harmonic analysis results using double interpolation algorithm. The formulae for frequency and amplitude correction are obtained by means of the polynomial approximation method. The double interpolation algorithm uses the weighted average of the recent two spectrum lines of the frequency point to modify the amplitude of the fundamental and the harmonic amplitude. The weights of spectrum lines are proportional to their amplitude. The algorithm effectively reduces leakage and noise, and increases the accuracy of the inter-harmonics and harmonics analysis. The simulation results have verified the effectiveness and practicability of the algorithm.

Key words: power system; inter-harmonic; FFT; cosine window function; double interpolation

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0011-04

0 引言

间谐波现象正受到人们的日益重视^[1-3]。IEC61000-2-1将间谐波定义为: 在电压和电流信号的谐波之间存在着频率与基波频率不成整数倍关系的信号。电焊机、电弧炉等设备是传统的间谐波产生源, 应用越来越广泛的各种电力电子设备, 逐步成为另一重要的间谐波发生源。频率高于基波频率的间谐波会干扰音频设备正常工作, 引起感应电机噪声和振动等, 频率低于基波频率的间谐波会引起电压闪变, 低频继电器的异常运行等等。间谐波的另一严重影响是会导致现有的谐波补偿装置失效, 甚至损坏。

FFT 算法是谐波分析的主要工具。然而 FFT 存在栅栏效应和泄漏现象, 使算出的信号参数即频率、幅值和相位不准, 尤其是相位误差很大, 无法满足

准确的谐波测量要求, 特别在分析含有间谐波信号时, 很难实现同步采样, 从而有可能导致“虚假”的间谐波和谐波, 或实际间谐波和谐波被淹没。插值算法可以消除栅栏效应引起的误差^[4-5], 频谱泄漏引起的误差则需要用加窗函数的方法来消除^[6-8]。文献[9-11]讨论了间谐波的估计方法, 其采用了单插值 FFT 算法, 也就是在修正幅值时, 只用了最强谱线信息, 而次强谱线的信息没有采用, 单插值 FFT 算法易受频谱泄露与噪声干扰。本文详细地讨论了各窗函数的特性, 提出了加余弦窗双插值 FFT 算法分析间谐波, 利用多项式逼近的方法得到频率和幅值的修正公式, 这些改进对间谐波和谐波的分析都有很高的精度。仿真实验验证了该算法的正确性和易实现性。

1 窗函数

应用FFT算法分析多频率信号频谱时, 若能保证

分析窗宽度等于各频率信号周期的公倍数，就能实现同步采样，得到精确的信号频谱，否则会产生频谱“泄漏”。在实际应用中，信号往往具有一定的时变性，这个条件很难满足，也即采样是非同步的。

电网电压信号中谐波、间谐波分量的幅值一般仅为基波分量幅值的百分之几或更小。当对其进行非同步采样时，基波分量的频谱泄漏将严重影响邻近的间谐波以及2次、3次等谐波分量的频谱，从而导致谐波测量产生很大的误差。若相邻谐波、间谐波之间的幅值相差过大，幅值大的频率分量有可能淹没幅值小的频率分量信号。为了减少信号中各频率分量之间的相互泄漏，可以在对信号加窗之后再进行分析。

为了减少FFT算法应用过程的频谱泄漏，可以选用典型的余弦窗窗函数。余弦窗的一般表达式为^[6,12]：

$$W_k(n) = \sum_{k=1}^K (-1)^k a_k \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \quad (n=0,1,\dots,N-1) \quad (1)$$

式中： k 是余弦窗的系数。 $k=0$ 时就是矩形窗。为了满足插值计算的需要，对 a_k 系数有如下限制：

$$\begin{cases} \sum_{k=0}^K a_k = 1 \\ \sum_{k=1}^K (-1)^k a_k = 0 \end{cases} \quad (2)$$

设幅值为1的矩形窗为

$$W_0(n) = 1 \quad (n=0,1,\dots,N-1) \quad (3)$$

它的离散傅立叶变换 DFT 称为狄里克来核 (Dirichlet) ^[12]：

$$W_0 = D(\theta) = e^{-j\theta \frac{N-1}{N}} \frac{\sin(\pi\theta)}{N \sin(\frac{\pi\theta}{N})} \quad (4)$$

余弦窗的特点是它的 DFT 表达式^[12]，可表示为：

$$W(\theta) = \sum_{k=0}^K (-1)^k \frac{a_k}{2} [D(\theta-k) + D(\theta+k)] \quad (5)$$

不同的 K 值和系数 a_k 决定了不同的窗。当 $K=1$ 时， $a_0 = 0.54, a_1 = 0.46$ ，为哈明窗， $a_0 = a_1 = 0.50$ 为海宁窗； $K=2$ 时， $a_0 = 0.42, a_1 = 0.50, a_2 = 0.08$ 时为布莱克曼窗。图 1、图 2、图 3 分别给出了海宁窗、哈明窗、布莱克曼窗的频谱。

其中，海宁窗的旁瓣最大泄漏为-31 dB，对远隔旁瓣以-6 dB/个的速度下降。哈明窗旁瓣最大泄漏为-42 dB，对远隔旁瓣以-2 dB/个的速度下降。但是这两种窗的主瓣半宽为矩形窗的 2 倍，对邻近一次谐波的泄漏十分严重，为了避免这个缺点，分析窗宽度

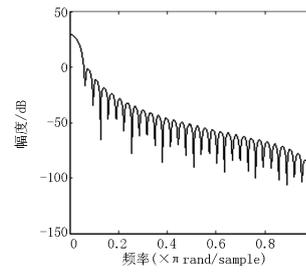


图 1 海宁窗

Fig.1 Hanning Window

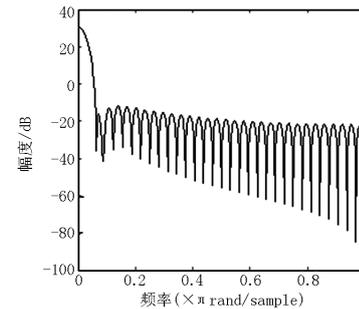


图 2 哈明窗

Fig.2 Hamming Window

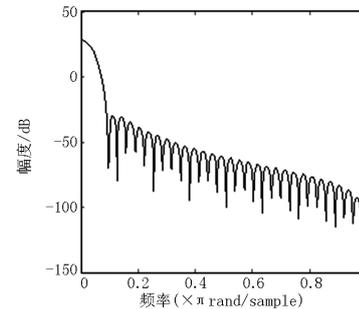


图 3 布莱克曼窗

Fig.3 Blackman Window

至少必须是信号周期的 2 倍以上。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。但是，该窗的主瓣半宽为矩形窗的 3 倍，对邻近一、二次谐波的泄漏十分严重，为了避免这个缺点，分析窗宽度至少必须是信号周期的 3 倍以上。若进一步考虑间谐波，其分析窗宽度还需增加。但窗宽度增加时，采样点数增多，使计算量加大，所以选窗函数时的原则是： K 值要适中，使能量尽量集中在主瓣上，同时兼顾旁瓣衰减要快。

2 双插值算法

对连续信号 $x(t)$ 用采样频率 f_s 进行等间隔均匀

采样得到的离散序列 $\{x(n)\}$, 再用长度为 N 的窗序列 $\{w(n)\}$ 加权截断, 得到的一组新序列 $x_w(n) = x(n)w(n)$, 其对应的频谱:

$$X_w(f) = \frac{1}{2\pi} X(f) \cdot W(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(f) W(f-y) dy \quad (6)$$

式中:

$$f = \lambda \frac{f_s}{N} = \lambda \cdot \Delta f \quad (7)$$

$$X(f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

$$W(f) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n) e^{-j2\pi n \frac{f_s}{N}} \quad (9)$$

为了讨论简单, 设连续信号 $x(t) = A_0 \sin(2\pi f_0 t + \phi_0)$, 加窗后由式 (7) (8) (9) 可得:

$$X_w(f) = \frac{\pi A_0}{j} \left\{ e^{j\phi_0} W \left[\frac{2\pi(f-f_0)}{f_s} \right] - e^{-j\phi_0} W \left[\frac{2\pi(f+f_0)}{f_s} \right] \right\} \quad (10)$$

如果选择优良的窗函数, 我们就可以忽略负频点 $-f_0$ 处频峰的旁瓣影响, 那么正频点 f_0 附近的连续频谱函数可以表示为:

$$X_w^+(f) = \frac{A_0}{2j} e^{j\phi_0} W \left[\frac{2\pi(f-f_0)}{f_s} \right] \quad (11)$$

对式(11) 离散化, 即可得到离散傅里叶变换的表达式为:

$$X_w^+(\lambda \Delta f) = \frac{A_0}{2j} e^{j\phi_0} W \left[\frac{2\pi(\lambda \Delta f - f_0)}{f_s} \right] \quad (12)$$

在频率 $f_0 = \lambda_0 \Delta f$ 是峰值, 但由于很难达到采样同步, λ_0 一般都不是整数。设在 λ_0 左右的谱线分别是第 λ_1 和 λ_2 条谱线, 它们是峰值点附近幅值最大与次最大的谱线。 $\lambda_1 \leq \lambda_0 \leq \lambda_2 = \lambda_1 + 1$, 设这两条谱线对应的幅值分别是 $Y_1 = |X_w(\lambda_1 \Delta f)|$ 与 $Y_2 = |X_w(\lambda_2 \Delta f)|$, 引入参数 $\delta = \lambda_0 - \lambda_1 - 0.5$, δ 的数值范围在 $[-0.5, 0.5]$ 。引入参数 γ 又由式 (12) 可知:

$$\gamma = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1} = \frac{\left| W \left[\frac{2\pi(-\delta+0.5)}{N} \right] \right| - \left| W \left[\frac{2\pi(-\delta-0.5)}{N} \right] \right|}{\left| W \left[\frac{2\pi(-\delta+0.5)}{N} \right] \right| + \left| W \left[\frac{2\pi(-\delta-0.5)}{N} \right] \right|} \quad (13)$$

Y_1 与 Y_2 的值通过传统 FFT 算法获得, 幅值比 γ 就可以确定, 关键点是求出 δ 。而 δ 就是 γ 的函数,

对于给定的窗函数, 式 (13) 可以化简成 $\gamma = f(\delta)$, 其反函数为 $\delta = f^{-1}(\gamma)$ 。计算 $\delta = f^{-1}(\gamma)$ 采用多项式逼近的方法可以解出, 基本的窗函数的求解公式是^[4]:

$$\text{矩形窗: } \delta = 0.5\gamma \quad (14)$$

$$\text{海宁窗: } \delta = -1.5\gamma \quad (15)$$

$$\text{哈明窗: } \delta = 1.21874943\gamma + 0.13349531\gamma^3 + 0.05301420\gamma^5 + 0.03656014\gamma^7 \quad (16)$$

布莱克曼窗:

$$\delta = 1.96043163\gamma + 0.15277325\gamma^3 + 0.07425838\gamma^5 + 0.04998548\gamma^7 \quad (17)$$

修正幅值时, 为了克服单峰谱线修正算法易受到频谱泄露与噪声干扰的缺点, 次强谱线的信息也可以用于修正幅值^[4,6], 即就是采用两根谱线的加权平均来修正幅值:

$$A = \frac{A_1 \left| W \left(\frac{2\pi(\lambda_1 - \lambda_0)}{N} \right) \right| + A_2 \left| W \left(\frac{2\pi(\lambda_2 - \lambda_0)}{N} \right) \right|}{\left| W \left(\frac{2\pi(\lambda_1 - \lambda_0)}{N} \right) \right| + \left| W \left(\frac{2\pi(\lambda_2 - \lambda_0)}{N} \right) \right|} = \frac{2(Y_1 + Y_2)}{\left| W \left(\frac{2\pi(-\delta+0.5)}{N} \right) \right| + \left| W \left(\frac{2\pi(-\delta-0.5)}{N} \right) \right|} \quad (18)$$

对两根谱线采用的权重与它们各自的幅值成正比。

相角与频率的修正公式为:

$$\theta = \arg \left[\bar{X}(\lambda_i \cdot \Delta f) \right] + \frac{\pi}{2} - \arg \left[W \left(\frac{2\pi(\lambda_i - \lambda_0)}{N} \right) \right] \quad (19)$$

$$f_0 = (\lambda_1 + \delta + 0.5) \cdot \Delta f \quad (20)$$

这一加窗插值算法的具体处理方法是对采样信号加窗, 用 FFT 计算出离散频谱 $X_w^+(\lambda_i \cdot \Delta f)$; 再用双插值算法先计算基波频率 f_1 , 而间谐波和整数次谐波的频率直接用 $i \cdot f_1$ ($i > 0$) 代替, 在计算基波和各次谐波幅值时, 双插值修正算法则选择距频点 $i \cdot f$ 最近的左右两根谱线, 按照式 (18) 计算, 相位、频率按照式(19)、(20)计算。

3 仿真算例

设采样信号为含间谐波的多频信号:

$$x(t) = 0.4 \sin(0.5 \times 2\pi ft + 20) + 10.0 \sin(2\pi ft + 10) + 0.15 \sin(2.3 \times 2\pi ft + 40) + 0.5 \sin(3.5 \times 2\pi ft + 50) + 0.35 \sin(5.5 \times 2\pi ft + 60) + 1.0 \sin(7 \times 2\pi ft + 80) + 0.85 \sin(9 \times 2\pi ft + 120)$$

其中: f 是基波频率, 取值 50.1 Hz (电力系统正常频率偏差允许值为 50 ± 0.2 Hz), 相位的单位是 ($^\circ$), 幅值是无单位数值。

采样频率 1 500 Hz ,采样点数 1024 ,加海宁窗后 ,基于加海宁窗 FFT 算法和基于加海宁窗双插值 FFT 算法的谐波参数估计结果和误差如表 1。

从仿真结果表 1 中可看出 ,双插值 FFT 算法的谐波、间谐波参数分析对频率的估计相当准确 ,对

于幅值和相位 ,分析精度也控制在 0.29 % 以内 ,精度很高 ,有效地减小频谱泄漏的影响 ,提高间谐波分析精度 ,尤其是改进了相位估计不正确的问题 ;能够有效地抑制谐波之间 ,以及杂波和噪声的干扰 ,从而有利于电力系统中谐波参数的准确获得。

表1 谐波分析结果

Tab.1 Results of harmonics analysis

波型	频率/Hz				幅度				相位/(°)			
	不插值 FFT		双插值 FFT		不插值 FFT		双插值 FFT		不插值 FFT		双插值 FFT	
	计算值	误差/%	计算值	误差/%	计算值	误差/%	计算值	误差/%	计算值	误差/%	计算值	误差/%
间谐波(25.05 Hz)	26.367 1	-5.257	25.04	0.039	0.397 7	0.575	0.4	0	53.45	-167.25	19.956	0.22
基波(50.1 Hz)	51.269 5	-2.334	50.1	0	9.787 7	2.123	10	0	46.84	-386.4	10.05	-0.5
间谐波(115.23 Hz)	117.187 5	-1.698	115.224	0.005	0.136 9	8.733	0.149 9	0.067	-130.63	426.575	40.106	0.265
间谐波(175.35 Hz)	177.264	-1.091	175.345	0.003	0.460 7	7.86	0.5	0	-104.02	308.04	49.975	0.05
间谐波(275.55 Hz)	276.855 4	-0.474	275.551	0.000 3	0.350 1	0.028	0.35	0	27.62	53.97	60.12	-0.2
谐波(350.7 Hz)	351.562 5	-0.329	350.697	0.000 8	0.947 4	5.26	1	0	116.04	-145.05	80.04	-0.05
谐波(450.9 Hz)	452.636 7	-0.385	450.902	-0.000 4	0.788 3	7.238	0.849 4	0.07	-31.61	126.34	119.65	0.29

4 结论

电网的谐波、间谐波的准确估计对电网的安全运行和谐波补偿装置的设计具有十分重要的意义。虽然目前国标对间谐波 (interharmonics) 的测试标准未做规定 ,但是在实际运用中 ,因为间谐波的数据关系到能否准确找到谐波谐振点 ,从而有效治理谐波 ,目前被治理厂家广泛关注。随着科技的发展 ,我国对电能质量要求的提高 ,相信国标将来会增加对间谐波的要求。

本文通过选取合适的窗函数 ,再对采样信号进行加窗 FFT 变换 ,同时再对谐波分析结果用双插值算法修正 ,能够有效降低泄漏和噪声干扰 ,提高间谐波和谐波分析的准确性。该算法可以方便地移植到基于微处理器的电力系统监控设备中 ,从而实现对电网谐波的精确测量。实验结果证明了加窗双插值算法的有效性和易实现性。

参考文献

[1] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题[J]. 供用电, 2001, 18(3): 6-9.
LIN Hai-xue. Interharmonics in Electrical Power System [J]. Distribution and Utilization, 2001, 18(3): 6-9.

[2] Gunther E W. Inter-harmonics in Power System[A]. in: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. Vancouver(Canada): 2001. 813-817.

[3] Chu R F, Burns J J. Impact of Cycloconverter Harmonics[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1989, 25(3): 427-435.

[4] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波

分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.

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.

[5] 潘文, 钱俞寿, 周鄂. 基于加窗差值 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 Yu-shou, 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.

[6] 潘文, 钱俞寿, 周鄂. 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 Yu-shou, 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] Heydt G T, Fjeld P S, Liu C C, et al. Applications of the Windowed FFT to Electric Power Quality Assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4): 1411-1416.

[8] Andria G, Savino M. Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1999, 38(4): 856-863.

[9] 钱昊, 赵荣祥. 基于插值 FFT 算法的间谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 87-91.
QIAN Hao, ZHAO Rong-xiang. Interharmonics Analysis Based on Inter-polation FFT Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 87-91.

(下转第 19 页 continued on page 19)

- [3] Kanitpanyacharoan W, Premrudeepreechacharn S. Power Quality Problem Classification Using Wavelet Transformation and Artificial Neural Networks[J]. IEEE Power Systems Conference and Exposition, 2004(3):1496-1501.
- [4] HUANG Jian-sheng, Thong N D. A Neural Fuzzy Classifier for Recognition of Power Quality Disturbances [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (2) : 609-616.
- [5] 胡国胜, 钱玲, 张国红. 支持向量机的多分类算法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28 (1) :127-132.
HU Guo-sheng , QIAN Ling, ZHANG Guo-hong. Survey of Multi-classification Algorithms Based on Support Vector Machines[J]. Aerospace Electronics Information Engineering and Control, 2006, 28(1): 127- 132.
- [6] Weston J, Watkins C. Multi-class Support Vector Machines[A]. in: Proceedings of ESANN99[C]. Brussels(Belgium): 1999.
- [7] Hu G S, Chen Y T. Power System Reliability Evaluation Using Support Vector Machine[A]. in: Inter Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications[C]. Hainan(China): 2004.
- [8] Lee J, Lee D. An Improved Cluster Labeling Method for Support Vector Clustering[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27: 461-464.
- [9] Hsu Chih-wei, Lin Chih-jen. A Comparison of Methods for Multi-class Support Vector Machines[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 2002, 13(2).
- [10] 李红莲, 王春花. 针对大规模的支持向量机的学习策略[J]. 计算机学报, 2004, 27(5): 716-718.
LI Hong-lian, WANG Chun-hua. A Learning Strategy of SVM Used to Large Training Set[J]. Chinese Journal of Computers, 2004, 27(5): 716-718.
- [11] 林杨, 刘贵全, 杨立身. 基于改进SVM方法的入侵检测[J]. 计算机工程, 2007, 33(14): 151-153.
LIN Yang, LIU Gui-quan, YANG Li-shen. Intrusion Detection Based on Improved SVM Algorithm[J]. Computer Engineering, 2007, 33(14): 151-153.
- [12] Jelonek J, et al. Rough Set Reduction of Attributes and Their Domains for Neural Networks[J]. Computational Intelligence, 1995, 11(2): 339-347.
- [13] 曾黄麟. 粗糙集理论及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998.
ZENG Huang-lin. Rough Set Theory and Its Application[M]. Chongqing: Publishing House of Chongqing University, 1998.
- [14] Santoso S, Powers J E, Grady M W. Power Quality Disturbance Data Compression Using Wavelet Transform Methods[J]. IEEE Trans on Power Delivery.
- [15] YU Xiao-dong, ZANG Hong-zhi. Transformer Fault Diagnosis Based on Rough Sets Theory and Artificial Neural Networks[A]. in: International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis[C]. Beijing: 2008.

收稿日期: 2009-02-25; 修回日期: 2009-06-14

作者简介:

俞晓冬(1974-), 女, 副教授, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用等; E-mail:xiaodongyu2001@163.com
周荣爱(1973-), 女, 研究方向为电力系统及其自动化等。

(上接第 14 页 continued from page 14)

- [10] 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) :92-95.
QI Cai-jun, WANG Xiao-hai. Interharmonics Estimation Based on Interpolation FFT Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(1): 92-95.
- [11] 邹江锋, 刘涤尘, 谭子求, 等. 基于 FFT 算法的分次谐波测量与分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 29-31.
ZOU Jiang-feng, LIU Di-chen, TAN Zi-qiu, et al. The Analysis and Measurement of Power System Sub-harmonic[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (9): 29-31.
- [12] 俞卞章. 数字信号处理 [M]. 西安:西北工业大学出版社, 2002.
YU Bian-zhang. Digital Signal Processing[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2002.

收稿日期: 2009-02-01; 修回日期: 2009-05-13

作者简介:

蒋春芳(1978-), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统可视化分析与计算、电力系统暂态稳定分析等工作;E-mail:jianglaoli@yahoo.cn
刘敏(1973-), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统保护控制及自动化方向研究。