

基于四阶累积量的多信号分类法间谐波检测研究

张经纬¹, 周念成¹, 杨芳¹, 郭春秀²

(1. 重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆施能电力设备有限公司, 重庆 401120)

摘要: 利用高阶累积量能够完全抑制高斯噪声的特点, 采用四阶累积量定义的矩阵代替传统二阶多信号分类法中的自相关矩阵作特征值分解, 将特征值对应的特征向量空间分为信号子空间和噪声子空间, 利用两空间正交性, 获得谐波源的功率谱和频率, 再用 Prony 方法计算出幅值。仿真结果表明, 该算法能有效地抑制高斯有色噪声, 改善了谱估计性能, 其精度能够满足电力系统间谐波分析的需要。

关键词: 间谐波; 多信号分类法; 四阶累积量; 电能质量; 电力系统

Research on the inter-harmonics measure using fourth-order cumulant based multiple signal classification method

ZHANG Jing-wei¹, ZHOU Nian-cheng¹, YANG Fang¹, GUO Chun-xiu²

(1. The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education,

Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing SHINENG Power Equipment Co., Ltd, Chongqing 401120, China)

Abstract: The high-order cumulant is blind to Gaussian noise. The multiple signal classification(MUSIC) method using fourth-order cumulant is proposed in the paper. The eigen-space of the fourth-order cumulant matrix is decomposed into signal and noise orthogonal sub-spaces. And the power spectrum and frequency of the harmonics and inter-harmonics are calculated. The amplitude value is estimated by Prony method. The simulation results show that the method is effective and accurate to estimation signal frequencies in Gaussian colored noise and can meet the need of measuring accuracy of power system.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Chongqing(No.CSTC,2006BB6220).

Key words: inter-harmonics; multiple signal classification(MUSIC); fourth-order cumulant; power quality; power system

中图分类号: TM714

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)07-0019-05

0 引言

传统的电力系统谐波分析方法FFT由于存在频谱泄漏和栅栏效应, 在检测间谐波时存在局限性, 其改进算法(加窗插值等)可以减轻这些问题^[1,2]。由于间谐波和谐波之间的频率间隔小于一个基波频率, 分析需要较高的频率分辨率, 故FFT分析窗的宽度需要增加, 相应地增加了计算量和计算时间; 另一方面, 对含有间谐波信号的采样很难实现同步采样, FFT算法的频谱泄露现象仍不能完全避免。小波变换具有良好的时频特性, 已有不少学者将其用于电力系统的谐波检测^[3,4], 但不同尺度的小波函数

在频域中存在相互干扰, 当被检测信号中含有频率相近的谐波分量时, 幅值检测方法将失效。基于现代信号处理理论如Pisarenko谐波分解、AR模型、多信号分类MUSIC(Multiple Signal Classification)等方法也应用于间谐波检测^[4-6]。AR谱估计隐含着数据和自相关函数的外推, 使分辨率大大提高, 有利于间谐波的估计, 但AR模型谱估计对噪声相当敏感, 当有噪声存在时, 分辨率降低, 且可能存在谱线分裂情况^[4]。Pisarenko谐波和MUSIC法都是基于信号的自相关估计, 将信号的特征空间划分为信号子空间和向量子空间, 根据子空间正交的原理构建特征多项式和代数方程组, 从而计算出各谐波分量的频率和幅值, 但估计自相关的算法对SNR较敏感^[5,6], 因此在有噪声的情况下, 尤其是信号中含

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2006BB6220)

有低信噪比的高斯噪声时,检测精度受到较大影响。

高阶统计量技术在信号处理方面获得广泛应用。研究表明^[7-10],高阶累积量(或高阶谱)与传统的二阶统计量(或相关函数)相比,一个明显的优点是高斯过程的高阶累积量(阶数大于3)等于零,因而利用高阶累积量可用于从高斯有色噪声环境中提取非高斯信号。本文在多信号分类(MUSIC)法和高阶统计理论基础上,提出了一种基于四阶累积量多信号分类法的电力系统间谐波检测方法,先采用四阶累积量MUSIC法得到信号中谐波和间谐波分量的频率,再用Prony法中的最小二乘法估计谐波的幅值等参数。仿真结果表明,该方法能有效的抑制高斯有色噪声,并有良好的频谱估计性能。

1 基于四阶累积量MUSIC法的间谐波检测

1.1 电力系统间谐波

IEC-61000-2-2 将间谐波定义为:在电压和电流信号的谐波之间存在着的频率与基波频率不成整数倍关系的信号。电力系统中主要的间谐波源是变频器等电力电子设备以及电弧性负载。由于电弧本身的不稳定性及变频装置运行状况的变化,间谐波具有不稳定性及随机性,因此,间谐波分析方法应当具有以下特点:受非同步采样的影响小,采样时间不应太长,以免前后采集的数据不是来自同一信号,具有较高的频率分辨率,能有效地抑制噪声影响。

电力系统谐波及间谐波检测信号可表示为

$$x(n) = s(n) + v(n) =$$

$$\sum_{i=1}^M A_i \cos(2\pi f_i n T_s + \varphi_i) + v(n) \quad (1)$$

式中: $x(n)$ 为采样信号; n 为采样点数; T_s 为采样间隔; M 为所含谐波和间谐波个数; A_i 为第 i 次谐波分量的幅值; f_i 为第 i 次谐波分量的频率; φ_i 为初始相角; $v(n)$ 为噪声项。

由于MUSIC法定义在复信号上,所以将式(1)转换为复频率信号,借助Hilbert变换将上式中的信号转换成复频率表达式:

$$x(n) = \sum_{i=1}^M A_i \exp\{j(2\pi f_i n T_s + \varphi_i)\} + v(n) \quad (2)$$

1.2 基于四阶累积量 MUSIC 法的频率估计

四阶累积量 MUSIC 算法是用四阶累积量定义的矩阵代替传统二阶 MUSIC 算法中的自相关矩阵作特征值分解,将特征值对应的特征向量空间分为

信号子空间和噪声子空间,利用两空间正交性,从而获得信号源的功率谱和频率。

零均值信号 $x(n)$ 的四阶累积量的定义为^[9,10]:

$$\begin{aligned} C_4(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = & cum[x(i), x(i+\tau_1), x(i+\tau_2), x(i+\tau_3)] = \\ & E[x(i)x(i+\tau_1)x(i+\tau_2)x(i+\tau_3)] - \\ & C_2(\tau_1)C_2(\tau_2-\tau_3) - C_2(\tau_2)C_2(\tau_3-\tau_1) - \\ & C_2(\tau_3)C_2(\tau_1-\tau_2) \end{aligned} \quad (3)$$

由样本数据 x_1, \dots, x_N 估计四阶累积量的公式为:

$$\begin{aligned} \hat{C}_4(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [x(k)x(k+\tau_1)x(k+\tau_2)x(k+\tau_3)] - \\ & \hat{C}_2(\tau_1)\hat{C}_2(\tau_2-\tau_3) - \hat{C}_2(\tau_2)\hat{C}_2(\tau_3-\tau_1) - \\ & \hat{C}_2(\tau_3)\hat{C}_2(\tau_1-\tau_2) \end{aligned} \quad (4)$$

其中:

$$\hat{C}_2(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [x(k)x(k+\tau)] \quad (5)$$

$$\hat{C}_2(\tau) = \hat{C}_2(-\tau) \quad (6)$$

文献[9]证明:不计噪声项的情况下,式(2)所给信号的四阶累积量为:

$$C_4(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = - \sum_{k=1}^p A_k^4 \exp\{j\omega_k(-\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)\} \quad (7)$$

对式(2)所给具有 M 个谐波分量的信号,定义 C_{p+1} 为信号的四阶累积量矩阵:

$$C_{p+1} = \begin{bmatrix} C_4(0) & C_4(1) & \cdots & C_4(p) \\ C_4(1) & C_4(0) & \cdots & C_4(p-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_4(p) & C_4(p-1) & \cdots & C_4(0) \end{bmatrix} = C_s + C_v \quad (8)$$

式中: $0 \leq \tau \leq p+1$, $M < p+1$, C_s 为信号矩阵, C_v 为噪声矩阵。

1) $v(n)$ 为高斯噪声

由于四阶累积量对高斯噪声的抑制性, $C_v = 0$, $C_{p+1} = C_s$, C_{p+1} 为共轭对称的 Toeplitz 矩阵。rank C_s

$=M, C_s$ 进行特征值分解, 得到:

$$C_s = \sum_{i=1}^{p+1} \lambda_i e_i e_i^H \quad (9)$$

e_i 是对应于特征值 λ_i 的特征向量, 且特征向量之间正交。将特征向量 e_1, \dots, e_{p+1} 形成的 $p+1$ 维向量空间分为两个子空间, 由于 $\text{rank} C_s = M$, 必有 M 个非零特征值和 $p+1-M$ 个零特征值。由非零特征值对应的特征向量 e_1, \dots, e_m 张成信号空间:

$$C_{ss} = \{S: S = \sum_{i=1}^M a_i e_i\} \quad (10)$$

式中: a_i 为常数。而由零特征值对应的特征向量 e_{M+1}, \dots, e_{p+1} 张成噪声空间:

$$C_{sv} = \{G: G = \sum_{k=M+1}^{p+1} \beta_k e_k\} \quad (11)$$

式中: β_k 为常数。由于信号空间和噪声空间的各个向量都是正交的, 因此, 它们的线性组合也是正交的, 即:

$$e_i^H \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} \beta_k e_k \right) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

令 $e(\omega) = [1, e^{i\omega}, \dots, e^{i\omega M}]$, 则 $e(\omega_i) = e_i$, 由式 (12), 有

$$e^H(\omega) \left[\sum_{k=M+1}^{p+1} \beta_k e_k e_k^H \right] e(\omega) = \sum_{k=M+1}^{p+1} \beta_k |e^H(\omega) e_k|^2 \quad (13)$$

上式在 $\omega = \omega_i$ 处应为 0, 令 $\beta_k = 1$, 即可估计出功率谱

$$\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega) = \frac{1}{e^H(\omega) \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} e_k e_k^H \right) e(\omega)} \quad (14)$$

由上式可知 $\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega)$ 在 $\omega = \omega_i$ 处应为无穷大, 但由于四阶累积量矩阵是估计值, 必然存在误差, 因此 $\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega)$ 为有限值, 但呈现出很尖的峰

值。

2) $v(n)$ 为非高斯噪声

式(8)中 $C_v \neq 0, \text{rank} C_s = M, \text{rank} C_v = p+1$ 。同样, 将 C_s 对应的 M 个特征向量张成信号空间, 将 C_v 对应的 $p+1-M$ 个特征值张成噪声空间:

$$C_{sv} = \{G: G = \sum_{k=1}^{p+1} \beta_k V_k\} \quad (15)$$

式中: β_k 为常数。由特征向量的正交性, 可得:

$$e_i^H \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} \beta_k V_k \right) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (16)$$

同理, 信号 (2) 的功率谱可由下式估出:

$$\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega) = \frac{1}{e^H(\omega) \left(\sum_{k=M+1}^{p+1} V_k V_k^H \right) e(\omega)} \quad (17)$$

同样, 在 $\omega = \omega_i$ 处, $\hat{P}_{\text{MUSIC}}(\omega)$ 的谱图呈现很尖的峰值。

由以上分析可知, 四阶 MUSIC 法的频率估计精度一方面与四阶累积量矩阵的估计精度有关, 另一方面与信号和噪声矩阵的分解有关。为了得到准确而有效的四阶累积量矩阵估计, 可以加大样本个数 N , 也可以改变采样频率提高估计精度。在矩阵分解时, 理论上由判断四阶累积量矩阵最小特征值重复个数, 可以确定信号子空间维数 M , 但是由于四阶累积量矩阵是由有限长数据估计出来的, 其特征值不可能完全相等, 因此无法按照上述思路判断出 M 。在实际计算中可采用借助信息论准则 AIC (Akaike's Information Criterion) [10] 来估计。

由式 (2) 所给信号, 采样长度为 N , 四阶累积量矩阵 C_{p+1} 有 $p+1$ 个特征值, 按次序排列有 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{p+1}$ 。令

$$AIC(m) = -2 \lg \left[\prod_{i=m+1}^{p+1} \lambda_i^{m-p+1} / \frac{1}{p+1-m} \sum_{i=m+1}^p \lambda_i \right]^{(p+1-m)/N} + m(2(p+1)-m) \quad (18)$$

当 m 由 0 增加到 $p+1$ 时, 最小的 $AIC(m)$ 所对应的 m 即是信号子空间维数。

1.3 幅值和相位的求取

利用 MUSIC 法求出信号中谐波和间谐波的个数

和频率之后, 可利用 Prony 法^[7, 10]来估计幅值和相位。

Prony 方法采用的数学模型为一组 M 个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数, 其函数形式为:

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^M b_i z_i^n \quad (19)$$

$$\text{式中: } b_i = A_i \exp(j\varphi_i) \quad (20a)$$

$$z_i = \exp((a_i + j2\pi f_i)\Delta t) \quad (20b)$$

令阻尼因子 $a=0$, 并用 $\hat{x}(n)$ 代替 $x(n)$, 式(2)所示信号即可由式(19)表示。

由估计的功率谱得到信号中谐波和间谐波的频率 f_i 和个数 M 后, z_i 就成为已知量 (z_i 也称为 Prony 极点), 于是指数模型式(19)简化为未知参数 b_i 的线性方程。用矩阵形式表示之, 即为

$$\mathbf{Z}\mathbf{b} = \hat{\mathbf{x}} \quad (21)$$

式中:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \quad (22a)$$

$$\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_p]^T \quad (22b)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}(0), \hat{x}(1), \dots, \hat{x}(N-1)]^T \quad (22c)$$

由于 z_i 各不相同, 矩阵 \mathbf{Z} 是满列秩的, 方程(21)的最小二乘解为

$$\mathbf{b} = [\mathbf{Z}^H \mathbf{Z}]^{-1} \mathbf{Z}^H \hat{\mathbf{x}} \quad (23)$$

求出 b_i 后, 可根据式(24)来计算信号中各频率分量的幅值和相位

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \varphi_i = \arctan \frac{\text{Im}(b_i)}{\text{Re}(b_i)} \end{cases} \quad (24)$$

2 仿真研究

为验证本文所提算法的性能, 采用 Matlab 软件, 对 AR 模型法、二阶 MUSIC 法和本文所述的四阶 MUSIC 法进行仿真分析。电网中干扰噪声的幅值一般

为基波幅值的 0~1%, 在仿真计算中分别加入 30dB 和 15dB 高斯有色噪声。

设基波和间谐波信号为:

$$\begin{aligned} x(t) = & 0.3 \cos(2\pi 40t + \pi/5) + 3 \cos(2\pi 50t) + \\ & 0.4 \cos(2\pi 150t + \pi/4) + \\ & 0.5 \cos(2\pi 195t + \pi/3) + \\ & 0.3 \cos(2\pi 250t) + v(t) \end{aligned} \quad (25)$$

$v(t)$ 为高斯有色噪声, 由高斯白噪声通过一个二阶滤波器产生, 滤波器的传递函数为:

$$H_z = \frac{1}{1 - 1.058z^{-1} + 0.81z^{-2}} \quad (26)$$

在采样频率 $F_s=1000$ Hz, 采样点数 $N=256$ 。由 AIC 方法估计出阶次 $p=13$, 在信噪比为 30dB 和 15dB 的两种情况下对信号分别用 AR 模型、二阶 MUSIC 法、四阶 MUSIC 法的谱估计结果如图 1、图 2 所示。

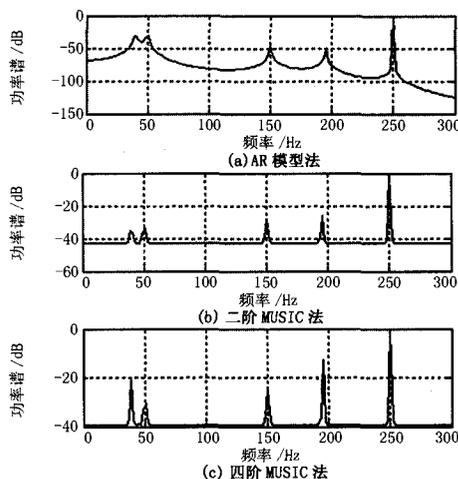


图 1 SNR=30 dB 功率谱估计结果

Fig.1 Results of spectral estimation (SNR=30 dB)

从图 2 可以看出, 即使在低信噪比的情况下, 四阶 MUSIC 法能够准确的检测出信号中所含的谐波分量的个数和频率。而随着信噪比的降低, AR 模型法的分辨精度随之降低, 在 SNR=15 dB 的情况下, 采用同阶次的 AR 模型算法已经不能分辨出与基波相邻的 40 Hz 的间谐波分量。二阶 MUSIC 法在信噪比降低的情况下虽然能够检出谐波和间谐波信号, 但产生了一定的误差, 并开始出现虚假频率。由此表明: 四阶累积量方法比二阶累积量方法具有更好的抗高斯噪声能力。表 1 给出了四阶 MUSIC 法与 AR 模型法和二阶 MUSIC 法在不同信噪比下的频率估计误差比较。

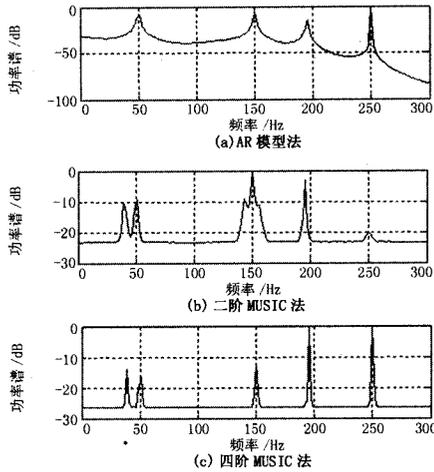


图 2 SNR=15dB 功率谱估计结果

Fig.2 Results of spectral estimation(SNR=15 dB)

表 1 频率的算法误差比较

Tab.1 Comparison of the frequency of algorithms

噪声/dB	频率设定值 /Hz	四阶 MUSIC 法		二阶 MUSIC 法		AR 模型法	
		估计值	估计偏差/(%)	估计值	估计偏差/(%)	估计值	估计偏差/(%)
30	40.00	40.00	0.000	39.95	0.125	40.12	0.300
	50.00	50.00	0.000	50.02	0.040	50.05	0.100
	150.00	150.00	0.000	150.00	0.000	150.00	0.000
	195.00	195.01	0.010	195.01	0.010	195.03	0.015
	250.00	250.00	0.000	250.00	0.000	250.00	0.000
15	40.00	39.98	0.050	39.85	0.375	*	*
	50.00	50.00	0.000	50.10	0.200	50.12	0.240
	150.00	150.00	0.000	149.85	0.100	149.82	0.120
	195.00	195.10	0.050	194.80	0.102	195.23	0.118
	250.00	250.01	0.004	249.86	0.056	250.16	0.064

注:*表示未检测出频谱

表 2 幅值测量误差

Tab.2 Measuring errors of amplitude

噪声 /dB	谐波类型				
	间谐波1	基波	谐波1	间谐波2	谐波2
30	0.51%	0.06%	0.05%	0.62%	0.14%
15	0.60%	0.08%	0.12%	0.75%	0.25%

3 结论

本文研究了基于四阶累积量 MUSIC 法的间谐波检测。研究表明:

(1) 当间谐波频率接近基频且幅值相对较小时;四阶累积量 MUSIC 法能够很好地分辨出间谐波成份;当含有多个谐波成份时,仍具有很高的分辨率。

(2) 与基于二阶累积量的检测方法相比,它能够有效地抑制有色高斯噪声。经过仿真验证,在加

在谐波和间谐波检测中,频率和幅值是两个很重要的参数。为了验证四阶累积量 MUSIC 法的有效性,根据本文所采用的频率估计及幅值的计算方法,表 2 列出了式 (25) 仿真信号在不同噪声强度下的幅值测试结果。

由表 1、表 2 可见,本文方法在高斯有色噪声环境中可准确检测到谐波附近的间谐波,测量的谐波频率也很准确,当信噪比减小的时候,对间谐波频率的测量仍然具有很高的精度。幅值的测量结果在信噪比较高的情况下较符合实际情况,信噪比降低时会误差增大,特别是间谐波的参数,这是因为利用式(19)计算正弦信号的幅值和相位时,由于噪声的存在使 $x(n)$ 和 $\hat{x}(n)$ 并不相等,测量结果必然存在一定的误差。

性高斯有色噪声环境尤其在低信噪比情况下,频率估计仍然具有很好的估计精度,显示出良好的频率估计性能。

(3) 在得到频率估计后,通过 Prony 法,得到幅值的估计值,此方法在频率估计准确时,求得幅值误差不大,稳定性好。

本文提出的方法在电力系统间谐波检测方面有着较好的应用前景。

参考文献

[1] 赵文春,马伟明,胡安.电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法[J].中国电机工程学报,2001,21(12):83-87.
ZHAO Wen-chun, MA Wei-ming, HU An. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in the Electric Machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 3-87.

(下转第 28 页 continued on page 28)

等配电网的谐波状况及其产生的影响,并提出了一些简单的治理建议。通过分析可知低压民用负荷产生大量的谐波,会对低压电网产生较大的影响,应当引起重视。而当三相四线制电力系统用于向商业大厦、商场中的计算机系统,现代办公设备及其他非线性负荷供电时。其设计应当考虑谐波因素,以避免可能发生的问題。

参考文献

- [1] Subjak J, Macquikin J. Harmonic-Causes, Effects, Measurements, and Analysis: an Update [J]. IEEE Trans Ind, 1990, 26(5):1034-1042.
- [2] Wagner V E, Balda D C J C. Effects of Harmonics on Equipment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(2):672-680.
- [3] Hendleron R D, Rose P J. Harmonics: the Effects on Power Quality and Transformers[J]. IEEE Trans Ind, 1994, 30(3):528-532.
- [4] Sueker K H. Comments on "Harmonics: the Effects on Power Quality and Transformers[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1995, 31(2):405-406.
- [5] 陈斌发. 配电变压器接法对谐波影响的分析[J]. 电网技术, 2001, 25(6):55-58.
CHEN Bin-fa. Influence of Transformer Winding Connection on Harmonic Voltage[J]. Power System Technology, 2001, 25(6):55-58.
- [6] Aintablian H. The Harmonic Currents of Commercial Office Buildings Due to Non-linear Electronic Equipment[A]. In: Southcon/96. Conference[C]. 1996. 610-615.
- [7] Omer GUL, Mehmet BAYRAK. 不平衡和非线性负荷引起的电能质量和中性线电流问题[J]. 供用电, 2001, 18(3):52-56.
- [8] Cheng P T, Huang P T, Hou C C. A New Harmonic Suppression Scheme for Three-phase Four-wire Distribution Systems[A]. In: Proc IEEEAPEC[C]. 2001. 1287-1293.
- [9] 程浩忠. 电力系统谐波技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1998.
- [10] Plow RT. Effect of Switch Mode Power Supply Harmonic Currents on Building Power Systems and Stand-by Engine Alternators[J]. Telecommunications Energy Conference, 1994, 22(2):665-668.
- [11] Jou H L, W U Jinn-chang, WU Kuen-der, et al. Analysis of Zig-Zag Transformer Applying in the Three-phase Four-wire Distribution Power System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2):1168-1173..
- [12] Wakileh G J. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 收稿日期: 2007-06-08; 修回日期: 2008-02-29
作者简介:
王 葵 (1966-), 女, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置. E-mail: wangkui@sdu.edu.cn
- (上接第 23 页 continued from page 23)
- [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): 92-95.
QI Cai-jun, WANG Xiao-hai. Interharmonics Estimation Based on Interpolation FFT Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 21(12): 83-87.
- [3] 薛蕙, 杨仁刚. 利用 Morlet 连续小波变换实现非整数谐波的检测[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 41-44.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Morlet Wavelet Based Detection of Noninteger Harmonics[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 41-44.
- [4] 马秉伟, 周莉, 刁均伟. 基于现代谱估计方法的间谐波检测[J]. 继电器, 2005, 33(3): 25-27.
MA Bing-wei, ZHOU Li, DIAO Jun-wei. Interharmonics Measurement Using Modern Spectral Estimation Method[J]. Relay, 2005, 33(3): 25-27.
- [5] 石敏, 吴正国, 尹为民. 基于多信号分类法和普罗尼法的间谐波参数估计[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 81-84.
SHI Min, WU Zheng-guo, YIN Wei-min. Inter-Harmonics Parameter Estimation Based on Multi-signal Classification and Prony Method[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 81-84.
- [6] 王志群, 朱守真, 周双喜. 基于 Pisarenko 谐波分解的间谐波估计方法[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 72-77.
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Inter-harmonics estimation by Pisarenko Harmonic Decomposition Method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 72-77.
- [7] Cumulant-Based Approach to the Harmonic Retrieval and Related Problems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1991, 39(5).
- [8] Nikias C L, Petropoulos A P. Higher-order Spectra Analysis[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993.
- [9] 张贤达. 时间序列分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [10] 张贤达. 现代信号处理(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- 收稿日期: 2007-07-26; 修回日期: 2007-09-19
作者简介:
张经纬 (1981-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统自动化和电能质量的研究工作; E-mail: fengcquzjw@yahoo.com.cn.
周念成 (1969-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统自动化和电能质量的教研和研究工作;
杨 芳 (1982-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统自动化和电能质量的研究工作