

基于互高阶谱MUSIC法的间谐波检测

田伟, 王洪希, 白晶

(北华大学电气信息工程学院, 吉林 吉林 132021)

摘要: 在电力系统中, 准确有效地确定信号中的间谐波分量, 对于改善电能质量有重要意义。研究了一种间谐波幅值和频率的估计算法——基于互高阶累积量的多信号分类法 MUSIC (Multiple Signal Classification) 方法, 该方法可以有效地抑制非相关噪声和高斯噪声, 在混合噪声和低信噪比的条件下, 仍具有很高的谱分辨率和谱估计性能。为了证明其有效性, 采用一具体的电力系统谐波模型进行仿真。仿真结果表明: 在色噪声背景下, 信噪比为 -20dB 时, 且不需要对分析数据进行整周期采样, 仍可以有效地估计出间谐波的频率和幅值, 谱估计性能稳定, 具有一定的工程应用前景。

关键词: 互高阶累积量; 间谐波; 噪声; 特征向量

Inter-harmonics parameter estimation on crosshigh-spectrum based on MUSIC method

TIAN Wei, WANG Hong-xi, BAI Jing

(Electric Information Engineering College, Beihua University, Jilin 132021, China)

Abstract: Along with the development of electric power system, the harmonics of integer times to fundamental component the inter-harmonics and sub-harmonics exist and are in special status. In this paper, cross high order accumulation is able to depress non-correlative noise and correlative gauss noises. MUSIC method based on cross-high-order cumulate is provided. Simulation results show that the method is effective and accurate to estimation sinusoid signal frequencies from hybrid colored noises and good performance. For low signal to noise ratio level is acceptable, this method is more applicable to practice.

Key words: cross-high-order-accumulation; inter-harmonics; colored hybrid noise; characteristic ecomposition

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)22-0049-04

0 引言

电力系统中各种扰动引起的电能质量问题主要可分为稳态和暂态两大类, 谐波问题就属于稳态电能质量问题的范畴^[1]。随着电力电子元件等非线性设备在电力系统中的广泛应用, 由此而产生的间谐波对电网的污染也越来越严重, 此问题已引起广泛关注。谐波一般指频率为工频(基波频率)整数倍的成分。电力系统分数谐波可分为间谐波(inter-harmonics)和次谐波(sub-harmonics)。间谐波是介于工频谐波之间的频谱分量, 次谐波是间谐波的一种特殊形态, 是频率低于基波频率的频谱分量。电力谐波治理已成为一个广泛关注的课题, 而对谐波进行准确的检测和分析是实现谐波治理的前提条件。

在间谐波检测方面人们已做了很多研究工作^[2~7]。如为了弥补单独应用 FFT 时遇到的频谱泄漏和栅栏效应问题, 而提出了加窗插值快速傅立叶变换(FFT)算法^[2~5], 该方法可以提高谐波和间谐

波参数的检测精度, 但该算法无法检测到整数次谐波附近的间/次谐波; 利用连续小波变换 CWT (Continuous Wavelet Transform) 可实现对间/次谐波的检测^[6], 但该方法在频域上相互干扰, 而无法将频率相近的谐波和间谐波它们分离; PRONY 方法需要求解两组奇次方程和一次多项式, 且对噪声敏感。

为了克服上述各种方法的不足, 本文研究了一种基于互高阶累积量的 MUSIC 方法, 用于估计间谐波的幅值和频率, 此算法是特征结构分析的空间谱估计方法, 是空间谱估计技术的典型代表。其检测原理是根据矩阵特征分解的理论, 对阵列输出协方差矩阵进行特征分解, 将信号空间分解为噪声子空间 G 和信号子空间 S , 利用噪声子空间 G 与阵列的方向矩阵 A 的列矢量正交的性质, 构造空间谱函数 $P(W)$ 并进行谱峰搜索。

1 互高阶累积量

传统的空间谱估计方法大多是在二阶统计量基

础上提出的, 而高阶累积量及对应的高阶谱具有更加丰富的信息, 且对于未知谱特性的相关和非相关噪声都有很好的抑制能力。

互高阶累积量对相关与非相关噪声具有抑制作用, 这在文献[8]和[9]已经得到证明。

2 基于互高阶累积量的MUSIC方法

互高阶累积量的MUSIC算法中, 在采用互高阶谱理论的基础上, 对信号进行奇异值分解, 将观测空间分成两个正交子空间, 即信号子空间和噪声子空间, 并且利用整个噪声子空间的基来估计信号参数。这样就部分平滑了噪声的影响。因此, 它的性能优于现在的其它方法。而在电力系统中, 电压、电流等物理量都可以看作“信号”予以变换和处理。

设时间序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 分别为带有附加混合色噪声的复正弦信号, 即:

$$x(n) = \sum_{i=1}^q \alpha_i \exp[j\omega_i n + \varphi_x] + \xi_x(n) + \eta_x(x) \quad (1)$$

$$y(n) = \sum_{i=1}^q \beta_i \exp[j\omega_i n + \theta_i + \varphi_y] + \xi_y(n) + \eta_y(n)$$

式中: α_i, β_i 为复数谐波信号幅值; θ_i 为信号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 各谐波分量间的相位差; ω_i 为信号频率; φ_x 和 φ_y 为随机初始相位, 且在 $(-\pi, \pi)$ 区间内均匀分布; ξ_x, ξ_y, η_x 和 η_y 分别为谱密度未知的零均值色噪声, 其中 η_x 和 η_y 为互相关的非高斯噪声; ξ_x 和 ξ_y 是非相关的高斯噪声; ξ_x 和 ξ_y 与 η_x 和 η_y 相互独立。

$x(n)$ 和 $y(n)$ 的互四阶累积量为:

$$c_{xyyy}(k_1, k_2, k_3) = cum_4 \{x(n), y(n+k_1), y^*(n+k_2), y^*(n+k_3)\}$$

$$c_{xyyy}(m, 0, 0) = E[x(n)y(n+m)y^*(n)y^*(n)] = -\sum_{i=1}^q \alpha_i \beta_i^2 e^{-j\theta_i} e^{-j\omega_i m}$$

令 $c_{xyyy}(m) = c_{xyyy}(m, 0, 0)$, 则其对应的 $h \times h$ 维扩阶互四阶累积量矩阵:

$$c_{xyyy} = \begin{bmatrix} c_{xyyy}(0) & c_{xyyy}(-1) & \dots & c_{xyyy}(-h+1) \\ c_{xyyy}(1) & c_{xyyy}(0) & \dots & c_{xyyy}(-h+2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{xyyy}(h-1) & c_{xyyy}(h-2) & \dots & c_{xyyy}(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

可得: $c_{xyyy} = FE^{j\theta}PF^H$

式中: $F_i = [1 \ e^{j\omega_i} \ e^{j2\omega_i} \ \dots \ e^{j(q-1)\omega_i}]^T$; $F = [F_1 F_2 \ \dots \ F_q]$

为 $h \times q$ 维复数矩阵; $E^{j\theta} = \text{diag}[e^{-j\theta_1} \ e^{-j\theta_2} \ \dots \ e^{-j\theta_q}]$

$$P = \text{diag}[-\alpha_1 \beta_1^3 \ -\alpha_2 \beta_2^3 \ \dots \ -\alpha_q \beta_q^3] \quad (q \text{ 为 } c_{xyyy} \text{ 的秩}).$$

可见 c_{xyyy} 是非共轭对称矩阵, 它的奇异值分解(SVD)式为:

$$c_{xyyy} = U \Sigma V^H \quad (3)$$

其中: U 和 V 分别为矩阵 c_{xyyy} 的左、右奇异矢量;

$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_i)$, 其中 $\sigma_i (i=1, 2, \dots, n)$ 所有非零奇异值, 按 σ_i 以递减次序排列(即 $\sigma_{i+1} \leq \sigma_i$).

将 V 分块成 $V = [V_1 \ V_2]$, 其中 V_1 是 V 中前 q 个奇异矢量所构成, V_2 是 V 中后 $(h-q)$ 个奇异矢量所构成; 同理将左奇异矢量矩阵 U 分块成 $U = [U_1 \ U_2]$.

$$\text{则式 (3) 可写为: } c_{xyyy} = [U_1 \ U_2] \begin{bmatrix} \Sigma & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |V_1^H \\ |V_2^H \end{bmatrix}$$

则: $c_{xyyy} = U_1 \Sigma V_1^H, c_{xyyy} V_2 = 0, c_{xyyy}^H U_2 = 0$, 由于 F 中含有谐波信号的频率, 所以称 F 为信号空间, V_2 为噪声空间。

而矩阵 c_{xyyy} 中 q 个正弦谐波分量

$e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}, \dots, e^{j\omega_q}$ 均是以空间 v_2 中任一噪声奇异矢量中的元素为系数所构成的特征方程为:

$$v_i(0) + v_i(1)z^{-1} + \dots + v_i(h-1)z^{-(h-1)} = 0$$

$i=q+1, \dots, h$ 的根。(3) 式的 $(h-q)$ 个特征方程的根有且仅有 q 个, 它们是 $e^{j\omega_1}, e^{j\omega_2}, \dots, e^{j\omega_q}$ 。

在估计正弦信号谐波频率时, 当采用 $h > q$ 的扩阶方程时, 虽然大大提高了谐波频率估计的精度及分辨率, 但同时却因此产生了 $(h-q)$ 个增根。由于根是与谱峰相对应的。因此这些增根就不可避免地会产生伪峰, 这就是伪峰产生的原因。现有的各种现代谱估计算法, 尽管采用了许多行之有效的伪峰抑制技术, 但由于它们并不能剔除这些增根, 所以均不同程度地存在着伪峰现象。由此可计算伪谱:

$$S(f) = \frac{1}{|A^H L|^2}$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} \sum_{i=q+1}^h v_i(0) & \sum_{i=q+1}^h v_i(1) & \dots & \sum_{i=q+1}^h v_i(h-1) \end{bmatrix}^T$$

$$L = [1 \ e^{2\pi f} \ \dots \ e^{2\pi(p-1)f}]^T$$

选择使 $S(f)$ 取得最大值的 q 个频率作为正弦谐波频率的估计。这就是正弦谐波估计的互高阶谱 MUSIC 方法。

3 仿真分析

在声纳、雷达和机械振动分析等许多问题中, 信号大多可以采用式(1)所示的信号模型描述^[10]。但在电力系统中的某些问题中, 有时仅能得到单一的正弦信号观测序列, 这时可根据实际情况采用参考信号法(如锁定放大器)、双通道隔离放大器法^[11]和时间延迟法^[12], 这些方法均可将原序列等效地用式(1)来描述。而且以上三种方法是很容易在工程上实现的。本文采用的仿真信号来自于文献[13], 有某电力系统谐波为:

$$x(t) = 0.3 \cos(2\pi f_1 t + 70^\circ) + 0.7 \cos(2\pi f_2 t + 80^\circ) + 1.0 \cos(2\pi f_3 t) + 0.5 \cos(2\pi f_4 t + 90^\circ) + 0.4 \cos(2\pi f_5 t + 40^\circ) + w(t)$$

式中: f_1, f_2, f_3, f_4, f_5 的频率依次是 25 Hz、35.85 Hz、50 Hz、86.6 Hz、150 Hz, 其中 50 Hz 是系统基频分量; 150 Hz 是 3 次高频谐波分量; 86.6 Hz 为非线性元件产生的间谐波分量; 25 Hz、35.85 Hz 为次谐波分量; $w(t)$ 是一噪声信号。采样频率取 480 Hz, 采用本文的方法进行仿真, 结果如下:

在信噪比 SNR (dB) 为: $\text{snr} = -19.0998$ 对算例仿真(图 1)。

表 1 信号的噪声子空间矩阵

Tab.1 Matrix of noise (SNR=-19.0998)

0.088 3	-0.071 1	-0.019 0	0.030 9	0.068 8	-0.075 0	-0.132 9
-0.179 8	0.004 6	0.048 6	-0.076 7	-0.164 8	0.160 5	0.283 6
0.054 6	0.143 8	-0.072 8	0.137 6	0.213 8	-0.237 7	-0.262 3
0.126 7	-0.052 2	0.098 6	-0.201 1	-0.233 6	0.279 4	0.128 1
0.027 7	-0.196 6	-0.144 4	0.247 7	0.295 6	-0.249 7	-0.100 2
-0.221 6	0.000 2	0.179 5	-0.270 0	-0.287 1	0.130 5	-0.007 8
-0.024 6	0.248 7	-0.201 1	0.294 4	0.194 3	-0.010 5	0.210 5
0.300 4	-0.029 6	0.218 7	-0.292 4	-0.064 9	-0.121 9	-0.360 8
0.017 1	-0.348 7	-0.253 4	0.249 0	0.004 3	0.250 3	0.211 9
-0.365 8	0.008 3	0.272 1	-0.184 0	0.090 3	-0.327 3	-0.030 9

表 2 谐波信号的功率谱

Tab.2 Power spectrum (SNR=-19.0998)

0.040 0	0.040 1	0.040 1	0.040 0	0.040 7	0.043 7	0.051 3
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

在信噪比 SNR (dB) 为: $\text{snr} = -10.0096$ 对算例进行仿真(图 2)。

表 3 信号的噪声子空间矩阵

Tab.3 Matrix of noise (SNR=-10.0096)

0.159 2	0.020 1	0.010 8	0.046 7	-0.005 7	-0.036 4	-0.098 0
-0.230 3	-0.073 7	0.021 6	-0.197 1	-0.085 0	0.127 8	0.149 6
0.073 3	0.116 6	-0.118 2	0.278 2	0.076 6	-0.249 7	-0.196 1
0.053 4	-0.121 4	0.202 6	-0.192 0	0.113 1	0.300 3	0.220 8
0.146 6	0.136 2	-0.207 4	0.104 3	-0.309 8	-0.233 4	-0.256 3
-0.260 8	-0.200 6	0.222 3	-0.211 9	0.160 9	0.127 3	0.003 2
-0.015 8	0.243 2	-0.309 5	0.227 7	-0.053 9	-0.050 9	0.223 0
0.252 2	-0.213 6	0.351 9	0.025 0	0.194 4	-0.075 7	-0.2893
0.089 9	0.194 8	-0.240 3	-0.250 5	-0.323 4	0.264 7	0.1051
-0.352 4	-0.264 9	0.133 9	0.089 5	-0.086 9	-0.353 5	-0.150 6

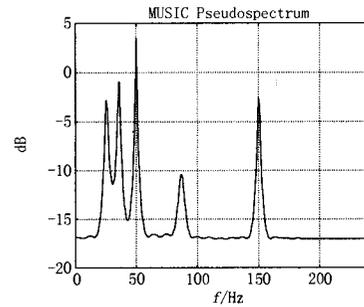


图 1 谐波信号的仿真

Fig.1 MUSIC method (SNR=-19.0998)

表 4 谐波信号的功率谱

Tab.4 Power spectrum (SNR=-10.0096)

0.040 0	0.040 1	0.040 1	0.040 0	0.040 7	0.043 8	0.051 4
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

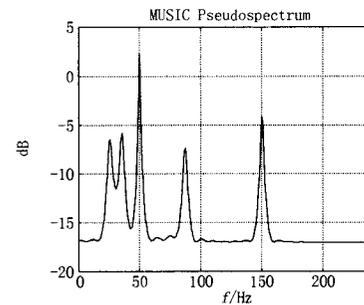


图 2 谐波信号的仿真

Fig.2 MUSIC method (SNR=-10.0096)

表 5 不同信噪比 (dB) 的幅值估计

Tab.5 Amplitude estimation of MUSIC

真值	0.3	0.7	1.0	0.5	0.4
估计值 (-10dB)	0.2997	0.7001	0.999	0.49997	0.40123
估计值 (-20dB)	0.2998	0.6998	0.9938	0.4996	0.4090

表 1 和表 3 是在不同信噪比时获得的噪声子空间, 由式(3)求其特征方程的根。其最大的特征根所对应的频率为所求频率。由表 2 和表 4 仿真所获得的功率谱数据可以看出此方法有良好的谱估计的稳定性; 由于仿真模型中含有 5 个谐波分量, 因此图 1 和图 2 可以看到 5 个谐波分量, 但高次谐波的谱峰有突增现象, 这是由于 MUSIC 算法产生伪峰在此频率点叠加形成的谱峰; 由表 5 看出高次谐波的幅值误差较大, 但随着信噪比由 -10 dB 降到 -20 dB 时, 对于频率相近的 25 Hz、35.85 Hz、50 Hz、86.6 Hz、谐波仍有较高谱分辨率。仿真结果说明: 基于互高阶谱 MUSIC 法能较好地估计出含有间谐波、次谐波的电力系统电压、电流信号的有关谐波参数, 结果具有较好的准确度。

4 结论

本文以互高阶谱为工具,具体地运用基于互高阶累积量的 MUSIC 方法对间谐波参数进行估计,该方法最大的特点是对噪声具有抑制作用,同时它不需要对分析数据进行整周期采样,能有效地抑制频谱泄漏和栅栏效应的影响,在低频段、短数据条件以及低信噪比(-20 dB)时仍具有很高的分辨率和谱估计稳定性。仿真结果证明了此方法对电力系统中谐波检测的有效性,结果具有一定的准确度,有一定的工程应用前景。

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. Inter-harmonics in Power System[J]. Distribution and Utilization, 2001, 18(3): 6-9.
- [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. Inter-harmonics Estimation Based on Interpolation FFT Algorithm[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2003, 21(12): 83-87.
- [3] 薛蕙, 杨仁刚. 基于FFT的高精度谐波检测[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 106-110.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Precise Algorithms for Harmonic Analysis Based on FFT Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 106-110.
- [4] 柴旭峥, 文习山, 关根志, 等. 一种高精度的电力系统谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 67-70.
CHAI Xu-zheng, WEN Xi-shan, GUAN Gen-zhi, et al. An Algorithm with High Accuracy for Analysis of Power System Armonics [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 67-70.
- [5] 薛蕙, 杨仁刚. 利用Morlet连续小波变换实现非整数次谐波的检测[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 41-44.
XUE Hui, YANG Ren-gang. Morlet Wavelet Based Detection of Non-integer Harmonics[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 41-44.
- [6] 薛蕙, 杨仁刚. 基于连续小波变换的非整数次谐波测量方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 49-53.
XUE Hui, YANG Ren-gang. A Novel Method for Non-integer Harmonics Measurement Using Continuous Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 49-53.
- [7] 王志群, 朱守真, 周双喜. 基于Pisarenko谐波分解的间谐波估算方法[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.
- [8] 石要武. nV级正弦信号测量的互功率谱估计方法研究④博士论文[D]. 吉林: 吉林大学, 1994. 48-63.
SHI Yao-wu. The Measurement of nv Sinusoidal Signal by Cross-spectral Method[D]. Jilin: Jilin University 1994.48-63.
- [9] 石要武, 马彦, 工利民. 混合色噪声下可消除谱估计伪峰的多正弦信号频率估计互谱奇异值分解方法[J]. 通信学报, 2001, 22(9): 28-33.
SHI Yao-wu, MA Yan, GONG Li-min Frequency Estimation of Multi-sinusoid Signal Based on Cross-spectral Approach with Cleared False Peaks[J]. Journal on Communications, 2001, 22(9): 28-33.
- [10] 石要武, 戴逸松, 宫文斌. 有色噪声背景下正弦信号频率估计的互谱Pisarenko和MUSIC[J]. 电子学报, 1996, 24(10): 46-50.
SHI Yao-wu, DAI Yi-song, GONG Wen-bin. Pisarenko and MUSIC Method of Cross Spectrum for Sinusoidal Parameter Estimation on Color Noise Background[J]. Acta Electronics Sinica, 1996, 24(10): 46-50.
- [11] 王树勋. 高阶统计量在系统理论中的应用[J]. 自动化学报, 1994, 20(6): 710-717.
WANG Shu-xun. Application of High-order Statistics in System Theory[J]. Acta Automatic Sinica, 1994, 20(6): 710-717.
- [12] 石要武, 戴逸松, 宫文斌. 色噪声背景下正弦参量估计的互谱矩和SVD方法[J]. 电子科学学刊, 1995, 17(1): 13-19.
SHI Yao-wu, DAI Yi-song, GONG Wen-bin Parameter Estimation of Sinusoidal Embedded in Colored Noise Via Cross Spectrum Matrix and SVD Method[J]. Journal of Electronics, 1995, 17(1): 13-19.
- [13] Nguyen T T. Parametric Harmonic Analysis of Power Systems[J]. IEE Proceeding, 2000, 144(1): 21-25.

收稿日期: 2007-04-08; 修回日期: 2007-07-25

作者简介:

田伟(1971-), 女, 硕士, 研究方向电力系统自动化和电能质量控制; E-mail: Twei71@163.com

王洪希(1971-), 男, 硕士, 副教授, 从事电力系统及自动化方面的教学和研究工作

白晶(1965-), 女, 博士, 教授, 研究方向为交流调速及智能控制。