

基于 EEMD 和 TLS-ESPRIT 的谐波间谐波检测方法

于兴林¹, 李慧敏¹, 李天云²

(1. 广东电网公司汕尾供电局, 广东 汕尾 516600; 2. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 总体平均经验模态分解 (EEMD) 可以在噪声环境下对信号进行准确的分解, 克服了 EMD 分解过程中产生频率混叠和虚假模态的缺陷。总体最小二成旋转不变技术 (TLS-ESPRIT) 算法本身具有很好的消噪能力, 用 TLS-ESPRIT 算法可以准确地辨识出信号的参数。结合两者的优点, 提出了基于 EEMD 和 TLS-ESPRIT 的谐波、间谐波检测方法, 结合 EEMD 分解后的各阶分量的能量来确定电网中真实的谐波、间谐波分量。仿真结果验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 总体平均经验模态分解; TLS-ESPRIT; 信号能量; 谐波; 间谐波

An harmonic and inter-harmonic detection method based on EEMD and TLS-ESPRIT

YU Xing-lin¹, LI Hui-min¹, LI Tian-yun²

(1. Guangdong Power Grid Corporation, Shanwei Power Supply Bureau, Shanwei 516600, China;

2. College of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Ensemble empirical mode decomposition (EEMD) can accurately decompose the signal with noise. It overcomes the shortcomings of empirical mode decomposition (EMD) which can cause the frequency aliasing and false mode in decomposing the signal. TLS-ESPRIT algorithm itself has good noise cancellation capability and can accurately identify the parameters of the signal. A good method is proposed to detect harmonic and inter-harmonic through the use of the advantages of EEMD and TLS-ESPRIT. It determines the real harmonic and inter-harmonic by energy of each order component decomposed by EEMD. Simulation results show the feasibility and effectiveness of the method.

Key words: EEMD; TLS-ESPRIT; signal energy; harmonic; inter-harmonic

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0067-06

0 引言

随着柔性交流输电和智能电网的推广, 越来越多的电力电子设备投运, 这些设备的投运提高了电网运行的灵活性和可靠性, 但也产生了大量的谐波污染, 影响电网的电能质量^[1-4]。为了提高电网的电能质量, 必须补偿电网中的谐波分量。因此如何准确地检测出电网中的谐波分量是一个热门的研究方向。

目前检测电网中谐波分量的方法有傅里叶分析法^[5-6]、小波变换法^[7-8]、自回归谱估计法^[9-10]、Prony 算法^[11]、HHT^[12]。傅里叶分析法只能处理平稳信号, 而且其只能分析整数次谐波, 虽然通过差值、加窗可抑制栅栏效应和频谱泄漏现象, 但会引入虚假成分。采用小波变换可以检测谐波和间谐波, 但由于高频部分的频带较宽, 导致其分辨率小。根据小波变换算法本身的特点, 会出现频率混叠, 且

小波基选取困难, 算法构造复杂。自回归谱估计法和 Prony 算法通过建立数学模型来模拟真实过程, 相比傅里叶算法频率分辨率高, 但当间谐波能量较低时, 其对噪声敏感, 往往会被噪声湮没。在噪声背景下会产生错误的参数估计。HHT 方法虽然可以处理非平稳、非线性的信号, 但经验模态分解容易引入虚假成分, 且该方法存在频率混叠效应, HT 变换后会产生无法解释的负频率。

总体平均经验模态分解^[13-14] (EEMD) 克服了经验模态分解 (EMD) 在分解信号中存在的虚假分量和模态混叠的缺点, 总体最小二成旋转不变技术 (TLS-ESPRIT) 能够精确地提取分解后的信号参数, 抗干扰能力强。基于以上分析本文提出 EEMD 和 TLS-ESPRIT 结合的信号能量法来研究谐波间谐波的检测问题。首先将信号进行 EEMD 分解, 然后用 TLS-ESPRIT 提取信号参数, 最后用能量判据找出真实的谐波分量。仿真分析表明本方法的有效性

和精确性。

1 理论基础

1.1 EMD

EMD 分解是 Norden E.Huang 于 1998 年提出的。用 EMD 分解从原始信号中提取若干阶固有模态函数(IMF), 突出了原始信号的局部特征信息。IMF 必须满足如下特点:

①其极值点和过零点的数目应该相等或至多差 1;

②分别连接其局部极大值和局部极小值所形成的两条包络线的均值在任一点处为 0。

设原始信号 $s(t)$ 上下包络线的均值为 $m(t)$, 由 $s(t)$ 减去 $m(t)$ 得到 $c(t)$, 如果 $c(t)$ 同时满足上述两个条件, 则认为 $c(t)$ 是从原信号中分解出的一个 IMF 分量。如果不满足条件, 则对 $c(t)$ 重复上述相同的过程直至满足条件为止, 认为分解出了一个 IMF 分量。把原信号减去分解出的 IMF 分量, 再对剩余量 $r(t)$ 重复前述过程, 直到 $r(t)$ 成为一个单调函数时筛选结束。最终将原信号分解为一组振荡的 IMF 与一个剩余分量 $r(t)$ 的和。

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (1)$$

式中: $c_i(t)$ 为原信号中各固有模态分量; $r(t)$ 为原信号中的剩余分量。

上述的完整过程称为原始信号的 EMD 分解。

1.2 EEMD

EEMD 分解分别由 Flanfrin 教授和 Huang 本人的研究团队提出。该方法将白噪声加入到原始信号中补充一些缺失的尺度, 进而对原始信号进行 EMD 分解, 将数次上述分解过程中频率相同的 IMF 分量进行平均。

对任一信号 $X(t)$ 的 EEMD 分解具体步骤为

1) 给原始信号 $X(t)$ 叠加一个高斯白噪声信号 $w(t)$

$$x(t) = X(t) + w(t) \quad (2)$$

2) 对 $x(t)$ 进行 EMD 分解, 得到 IMF 分量

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r(t) \quad (3)$$

3) 给原始信号加入不同的白噪声 $w_i(t)$, 重复步骤 1) 和 2):

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^n c_{ij}(t) + r_i(t) \quad (4)$$

其中加入不同的白噪声 $w_i(t)$ 满足

$$\sum_{i=1}^m w_i(t) = 0 \quad (5)$$

4) 将上述过程中得到的 IMF 分量求均值, 消除高斯白噪声所产生的影响。原始信号对应的 IMF 分量 $c_j(t)$ 可表示为

$$c_j(t) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_{ij}(t) \quad (6)$$

5) 原始信号 $X(t)$ 可分解为

$$X(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r(t) \quad (7)$$

1.3 TLS-ESPRIT

ESPRIT 是由 ROY 等人于 1986 年提出的^[15]。假设信号有 m 个谐波和一个白噪声组成

$$x(n) = \sum_{i=1}^m b_i e^{(-\sigma_i + j\omega_i)nT_s} + w(n) \quad (8)$$

式中: $b_i = a_i e^{j\theta_i}$, ω_i 、 a_i 、 θ_i 分别为第 i 个正弦波的频率、幅值和相位; T_s 为采样频率; w 为一零均值高斯白噪声。当信号为实信号时, m 为信号的实际含有的实正弦分量个数的 2 倍。

由原始信号 $x(n)$ 构造 Hankel 矩阵为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(L) \\ x(1) & x(2) & \dots & x(L+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(N-L-1) & x(N-L) & \dots & x(N-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

对 \mathbf{X} 进行奇异值分解:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{Z}\mathbf{V}^T \quad (10)$$

\mathbf{Z} 的对角元素为降序排列, 此时可将 \mathbf{V} 按照奇异值大小划分为信号子空间 V_1 和噪声子空间 V_2 , 即 $\mathbf{V} = [V_1, V_2]$ 。 V_1 的各列向量为 \mathbf{X} 的最大 m 个特征值对应的右奇异向量。

令 V_3 和 V_4 分别为 V_1 删除第一行和最后一行形成的矩阵, 由 V_3 、 V_4 构造如下矩阵, 并进行特征值分解, 如式(11)所示。

$$[V_3, V_4] = \mathbf{R}\mathbf{O}\mathbf{P}^T \quad (11)$$

将 \mathbf{O} 四等分为 $\mathbf{O} = \begin{bmatrix} O_{11} & O_{12} \\ O_{21} & O_{22} \end{bmatrix}$, 求取 Ψ 的 TLS 解 $-O_{11}O_{21}^{-1}$ 。

先求解 Ψ 的特征值 $\lambda(i=1, 2, \dots, m)$, 然后可由式(12)计算出原始信号中各分量的频率。

$$f_i = \frac{\arg(\lambda_i)}{2\pi T_s} \quad (12)$$

因 $\mathbf{X} = \lambda\mathbf{B}$, 计算 \mathbf{B}

$$\mathbf{Y} = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T \quad \mathbf{B} = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \cdots & \lambda_m \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \cdots & \lambda_m^{N-1} \end{bmatrix}$$

使用最小二乘法可得到方程的解为

$$\mathbf{B} = (\lambda^T \lambda)^{-1} \lambda^T \mathbf{Y} \quad (13)$$

信号中各个分量的幅值为

$$a_i = 2|b_i| \quad (14)$$

式中, b_i 为 \mathbf{B} 中第 i 个元素。

1.4 信号能量

对于信号 $s(t)$ 在 T 段时间内的能量定义为

$$E = \int_0^T s(t)^2 dt \quad (15)$$

在电网中基波为主要分量, 其能量也为最大。而谐波、间谐波分量含量少, 其能量也相对较小。本文以基波分量的 10% 为阈值, 大于此阈值即认为真实分量, 否则为虚假分量。

2 算法实现的步骤

(1) 运用 EEMD 对原信号进行分解得到一组有实际物理意义的 IMF 分量。

(2) 计算各 IMF 分量的能量, 去除虚假 IMF 分量。

(3) 对各 IMF 进行 TLS-ESPRIT 变换, 从而辨识瞬时幅值、频率及相位。

3 数值仿真

构造间谐波信号

$$s(t) = \sin(100\pi t) + 0.31\sin(66\pi t + 1.33) + 0.25\sin(200\pi t + \frac{\pi}{2}) + n(t) \quad (16)$$

式中: $s(t)$ 为原始信号; $n(t)$ 为噪声; 采样频率为 6 400 Hz; 采集 1 001 个点; 信噪比为 10 dB。

原始信号波形如图 1 所示。用 R2009B 版 Matlab 编写 EEMD 程序。用 EEMD 对原始信号进行分解。首先向原始信号中加入高斯白噪声 $w_i(t)$, 其幅值为

0.01, $i=1, 2, \dots, 10$, 且 $\sum_{i=1}^{10} w_i(t) = 0$ 。将加入白噪声

的信号进行 EMD 分解, 最后将各谐波分量对应的各次分解的 IMF 分量平均化得到对应谐波分量的最终 IMF 分量 c_i ($i=1, 2, \dots, 9$)。各阶 IMF 分量图如图 2 所示。

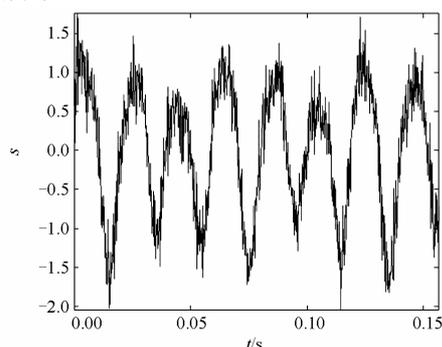


图 1 原始信号

Fig. 1 Original signal

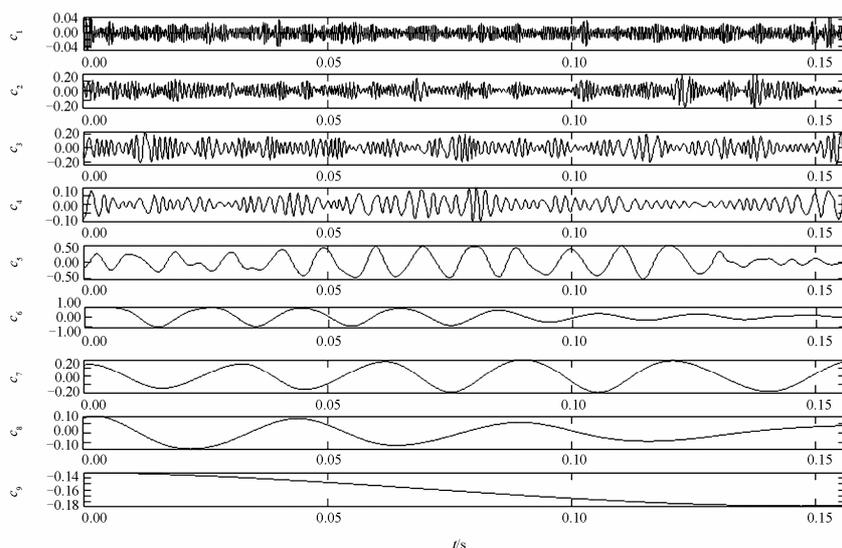


图 2 经 EEMD 分解后的各阶数 IMF 分量

Fig. 2 Each order IMF component with EEMD decomposition

根据式 (15) 计算各 c_i 的能量 E_i , 以能量最大 IMF 分量为基准计算各 IMF 分量的能量相对百分比 P ; 用 TLS-ESPRIT 算法估计 c_i 的频率和幅值。结果如表 1 所示。若 P 大于 10 则为真实的谐波分量, 否则为虚假分量。结合图 2 和表 1, 可知 c_i ($i=1,2,\dots,4$) 为噪声分量。 c_9 为 EEMD 分解的残余分量。

将原始信号 $s(t)$ 用 EMD 将其分解, 分解结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出 EMD 分解出现了频率混叠效应, 对比图 2 和图 3 可以看出, 在噪声环境下, EMD 分解不能将各次谐波检测出来, 而 EEMD 却能很好地将各次谐波检测出来。

表 1 各阶 IMF 分量辨识结果

Table 1 Each order IMF component recognition results

	频率/Hz	幅值/A	能量 (E)	百分比 $P/\%$
c_1	2 764.9	0.005 0	14.673 1	0.08
c_2	1 247.8	0.007 5	4.807 3	2.70
c_3	1 011.3	0.030 7	3.247 1	1.83
c_4	415.78	0.010 1	2.868 4	1.61
c_5	100.04	0.263 6	46.444 4	26.12
c_6	50.302	0.874 3	177.787 4	100
c_7	33.774	0.312 7	34.132 8	19.20
c_8	23.176	0.121 4	3.837 8	2.16
c_9	0	0.305 6	13.770 9	7.75

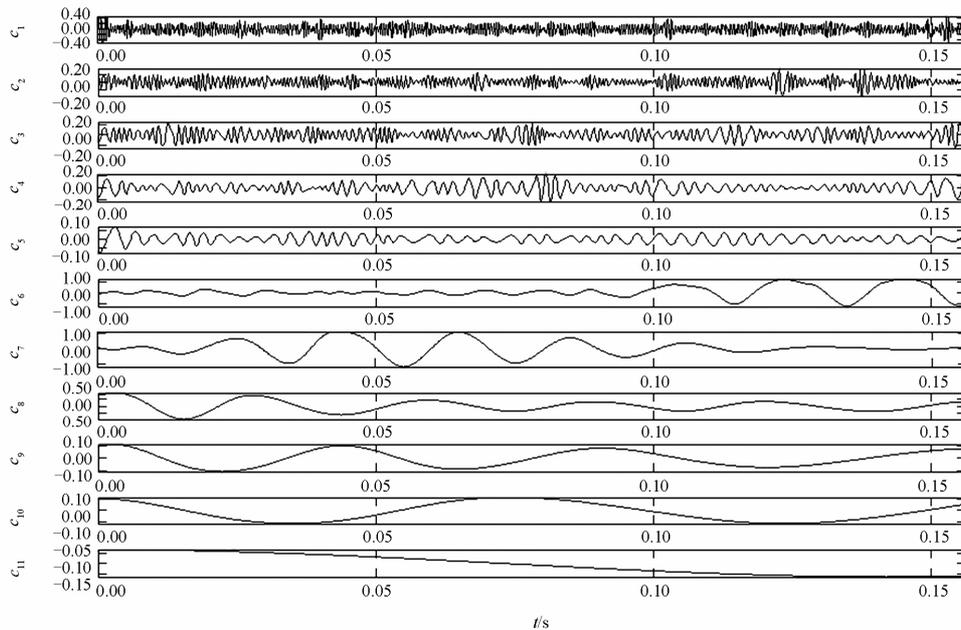


图 3 经 EMD 分解后的各阶数 IMF 分量

Fig. 3 Each order IMF component with EMD decomposition

表 2 为信噪比为 20 的情况下谐波、间谐波的分析结果。从表 1 和表 2 中可以看出当信噪比为 10 dB 时, 检测出的各频率分量令人满意, 但幅值分量的准确率为 87.43% 误差较大; 而当信噪比为 20 dB 时, 频率和幅值的准确率均能达到 97%; 两种情况下均能正确地检测出谐波、间谐波分量, 克服了 EMD 分解存在的模态混叠的缺陷。

表 2 谐波、间谐波分析结果

Table 2 Results of harmonic and inter-harmonic analysis

SNR=20	频率/Hz	幅值/A	能量 (E)	百分比 $P/\%$
模式 1	32.990 5	0.302 8	59.095 8	19.83
模式 2	50.775 7	0.971 5	297.953 2	100
模式 3	99.797 6	0.243 1	19.392 8	12.51

4 实例分析

采用文献[16]的实际电弧电流信号, 采样频率为 6 400 Hz, 持续 0.3 s。实验中在加入不同幅度的白噪声, 波形如图 4 所示。

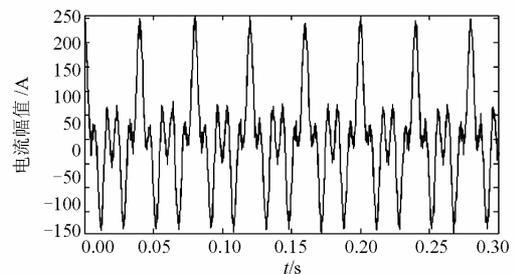


图 4 原始电弧炉电流信号

Fig. 4 Electric current signal of original arc furnace

利用本文方法直接对电弧炉电流含噪信号进行分析, 结果如表 3 所示。

表 3 电弧炉电流信号分析结果

Table 3 Results of arc furnace signal analysis

SNR=10	频率/Hz	幅值/A	能量 (E)	百分比 P/%
模式 1	124.811 9	64.512 1	3.923 0	39.52
模式 2	149.707 6	103.014 4	9.925 6	100
模式 3	24.605 3	64.650 2	3.870 2	38.99
SNR=20	频率/Hz	幅值/A	能量 (E)	百分比 P/%
模式 1	124.988 8	73.706 4	4.481 9	41.42
模式 2	49.946 67	99.823 4	8.507 3	100
模式 3	4.873 4	66.187 4	3.466 3	40.74

注: 模式 1、2、3 的理论电流幅值分别为 100.000 0 A, 74.813 0 A, 64.933 0 A; 模式 1、2、3 的理论频率分别为 50.000 0 Hz, 125.000 0 Hz, 25.000 0 Hz。

从分析结果可得: 在信噪比为 10 dB 时, 采用本文算法对含噪信号进行检测得到频率准确率为 98.4%, 幅值准确率为 86.23%。在信噪比为 20 dB 时, 频率准确率为 99.5%, 幅值准确率为 98.1%。可见本文方法具有较好的抗噪性, 且准确率令人满意。

5 结论

(1) 本文运用 EEMD 理论和 TLS-ESPRIT 算法来检测电网中的谐波和间谐波, 运用信号的能量来甄别 EEMD 分解后的真假谐波和间谐波分量。克服了 EMD 分解过程中可能出现的频率混叠的缺点, 同时 TLS-ESPRIT 算法本身就具有很好的抗噪能力, 能准确地辨识出谐波和间谐波分量的信号参数。仿真和实例分析表明了本方法的有效性。

(2) 本文方法要求数次对含噪信号进行 EMD 分解, 适用于离线计算。

(3) 本文所用的信号忽视了时滞效应的全局信号, 如何合理选取及时滞效应的局部观测信号, 用本文所提算法进行分析还有待研究。

参考文献

[1] 黄梅, 黄少芳. 电动汽车充电站谐波的工程计算方法[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 20-23.
HUANG Mei, HUANG Shao-fang. A harmonic engineering calculation method for electric vehicle charging station[J]. Power System Technology, 2008, 32(20): 20-23.

[2] 吴锐, 蒋燕, 雍静, 等. 电压间谐波分量对荧光灯闪变效应的研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 16-22.
WU Rui, JIANG Yan, YONG Jing, et al. An investigation on the flicker of fluorescent lamp caused by interharmonic voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 16-22.

[3] 李战鹰, 黄莹, 李建华, 等. 基于非特征谐波潮流统一算法的±800 kV 特高压直流输电系统非特征谐波分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 11-14.
LI Zhan-ying, HUANG Ying, LI Jian-hua, et al. Non-characteristic harmonic analysis of ±800 kV UHV DC transmission system based on unified non-characteristic harmonic load flow algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 11-14.

[4] 吴文宣, 吴丹岳, 林炎, 等. 电流型变频器的间谐波分析及应用模型构建[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 163-169.
WU Wen-xuan, WU Dan-yue, LIN Yan, et al. Inter-harmonic analysis and application model construction of current source inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 163-169.

[5] 郑恩让, 杨润贤, 高森. 关于电力系统 FFT 谐波检测存在问题的研[J]. 继电器, 2006, 24(18): 52-57.
ZHENG En-rang, YANG Run-xian, GAO Sen. Study on problems about detecting harmonic based on FFT in power system[J]. Relay, 2006, 24(18): 52-57.

[6] 蒋春芳, 刘敏. 基于双插值 FFT 算法的间谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 11-14, 19.
JIANG Chun-fang, LIU Min. Inter-harmonics analysis based on double interpolation FFT algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 11-14, 19.

[7] 尚秋峰, 康丹, 李青, 等. 基于单节点重构改进小波包的电力系统谐波分析算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 74-77.
SHANG Qiu-feng, KANG Dan, LI Qing, et al. Power system harmonic analysis algorithm based on wavelet packet improved by single-node reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 74-77.

[8] 房国志, 杨才山, 杨超. 基于 Meyer 小波和 FFT 的电网间谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 90-93.
FANG Guo-zhi, YANG Cai-shan, YANG Chao. Detection of inter-harmonic in power system based on

- Meyer wavelet and FFT[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 90-93.
- [9] 张惠娟, 汪友华, 王艳延, 等. 基于 AR 模型的电力系统间谐波分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 144-149.
ZHANG Hui-juan, WANG You-hua, WANG Yan-yan, et al. Power system interharmonics analysis based on autoregression model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 144-149.
- [10] 蔡忠法, 陈隆道. 基于 AR 谱估计和 Adaline 神经元的间谐波分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 78-82.
CAI Zhong-fa, CHEN Long-dao. Inter-harmonic analysis based on AR spectral estimation and Adaline neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 78-82.
- [11] 郭成, 李群湛, 贺建闽, 等. 电网谐波与间谐波检测的分段 Prony 算法[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 21-25.
GUO Cheng, LI Qun-zhan, HE Jian-min, et al. Segmentation Prony algorithm on harmonics and inter-harmonics detection of power networks[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 21-25.
- [12] 张宇辉, 贺建伟, 李天云. 基于数学形态学和 HHT 的谐波和间谐波检测方法[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 46-51.
ZHANG Yu-hui, HE Jian-wei, LI Tian-yun. A new method to detect harmonics and inter-harmonics based on mathematical morphology and Hilbert-Huang Transform[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 46-51.
- [13] Flandrin P, Rilling G, Goncalves P. Empirical mode decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 112-114.
- [14] Wu Z, Huang N E. A study of the characteristics on white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2004, 460(2046): 1597-1611.
- [15] Roy R, Paulraj A, Kailath T. Esprit: a subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1986, 34(5): 1340-1342.
- [16] Leonowicz Z, Lobos T, Rezmer J. Advanced spectrum estimation methods for signal analysis in power electronics[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003, 50(3): 514-519.

收稿日期: 2013-05-22; 修回日期: 2013-07-03

作者简介:

于兴林(1987-), 男, 通讯作者, 硕士, 主要研究方向为电力系统的稳定与控制以及信号处理在电力系统中的应用; E-mail: yxlin007@163.com

李慧敏(1987-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统的稳定与控制以及信号处理在电力系统中的应用;

李天云(1945-), 男, 教授, 主要研究方向为信号处理、自动控制理论、非线性系统理论的教学及其在电力系统中的应用。