

DOI: 10.7667/PSPC161039

一种基于小波包和 apFFT 的间谐波检测方法

杨名, 陈红卫

(江苏科技大学电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对现有的间谐波检测精度不高以及暂态间谐波信号定位困难等问题, 探讨了一种新的间谐波检测方法。首先, 将信号进行小波包和 FFT 变换, 计算相对小波包能量。然后应用频谱特征量和相对小波包能量确定信号所含分量。最后利用小波包重构与 apFFT 算法检测和定位信号, 计算间谐波幅值和频率。分别采用含稳态及暂态的间谐波信号模型对该检测方法进行了仿真研究, 并将仿真结果与文献的结果进行了比较。仿真结果表明: 该检测方法能够有效地检测间谐波, 并具有较高的检测精度。

关键词: 间谐波; 快速傅里叶变换; 小波包变换; 相对小波包能量; 全相位 FFT

A method to detect inter-harmonics based on wavelet packet and apFFT

YANG Ming, CHEN Hongwei

(School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: For the low accuracy and positioning difficulty to detect inter-harmonics, a new method is discussed in this paper. It calculates the relative wavelet packet energy based on wavelet packet. The spectral features are obtained by using FFT algorithm. According to its relative wavelet packet energy and its spectral features, it can determine the frequency components of the detected power signal. The transformed signal is reconstructed using wavelet packets. The amplitudes and its frequencies of inter-harmonics of the reconstructed signal are calculated using apFFT algorithm. The proposed algorithm is simulated. The simulation results are compared with those of literatures. It can be seen that the proposed algorithm is verified, and the proposed algorithm can detect inter-harmonics of a given signal much more accurately.

Key words: inter-harmonic; fast Fourier transform; wavelet packet transform; relative wavelet packet energy; all-phase FFT

0 引言

近年来, 随着柔性交流输电技术和智能电网的推广, 越来越多的电力电子设备应用于电力系统。这些电力电子设备的使用导致电力系统的电压、电流畸变情况越来越严重, 电力系统中不但存在谐波成分, 而且存在间谐波成分。其中的间谐波成分对电力系统的安全有效运行造成极大的危害。为了分析和治理电力系统中的间谐波, 必须先准确地检测出间谐波成分^[1-6]。

在目前的电力系统中, 间谐波源可分为两类。第一类间谐波源主要是变频调速类装置的非线性负荷和以电弧炉为主的波动性负荷。这类间谐波源由于阻抗的时变性, 因此, 间谐波的频谱是连续的。第二类间谐波源是高压直流输电中的交直交的变流

系统。它引起的间谐波频谱是离散的。无论是第一类间谐波源还是第二类间谐波源, 间谐波都具有幅值较小且频率是基频的非整数倍的特征, 这就要求间谐波的检测方法不同于谐波的检测方法。目前间谐波检测的方法有傅里叶变换法^[7-8]、小波变换法^[9]、现代谱估计方法^[10]、HHT(希尔伯特黄变换)方法^[11]。傅里叶变换检测法存在栅栏效应和频谱泄漏, 且在检测的过程中无法对暂态信号实现定位检测; 现代谱估计检测方法虽然具有频率的超分辨率估计, 但是在低信噪比的情况下检测的精度不理想; HHT 检测方法可以处理非平稳的信号, 但是 EMD(经验模态分解)过程中容易产生虚假成分, 且存在频率混叠问题。

小波变换检测法一直是研究的热点。但传统的小波变换检测法只对低频段部分进行了分解, 忽视了高频段成分, 因此在整体上降低了间谐波检测的准确性与精度。小波包变换法给出了一种准确性与

精度更高的检测方法, 它不仅对低频段部分进行了分解, 而且对高频段部分也采用了相同尺度的分解, 提高了间谐波检测的准确性与精度, 为间谐波的检测提供了一种很好的方法^[12]。全相位 FFT 算法(以下简称 apFFT)具有抑制频谱泄漏的优良特性, 提高了间谐波的测量精度^[13]。本文将小波包分解和 apFFT 相结合检测电力系统中的间谐波, 具有较好的效果。

1 检测算法的原理

1.1 小波包分析原理

小波包分析就是进行多分辨率分析的小波子空间分解的过程, 本文中, 给定小波函数 $\psi(t)$ 和正交尺度函数 $\phi(t)$, 其 2 尺度方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \phi_0(t) = \sqrt{2} \sum_k h_{0k} \phi(2t-k) \\ \phi_1(t) = \sqrt{2} \sum_k h_{1k} \phi(2t-k) \end{cases} \quad (1)$$

式中, h_{0k} 、 h_{1k} 分别为多分辨率分析的滤波器系数。

推广 2 尺度关系的递推方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} w_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{0k} w_n(2t-k) \\ w_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_{1k} w_n(2t-k) \end{cases} \quad (2)$$

当 $n=0$ 时

$$\begin{cases} w_0(t) = \phi(t) \\ w_1(t) = \psi(t) \end{cases} \quad (3)$$

小波包空间表达如式(4)所示。

$$W_j^n = \text{span} \left\{ 2^{-j/2} w_n(2^{-j}t - k) \right\}_{k \in Z} \quad (4)$$

式中: $j \in Z$ (非负整数); $n \in Z_-$ (负整数)。

小波包运算包含两个部分, 即小波包的分解与重构。小波包分解是由 $\{d_l^{j,n}\}$ 求 $\{d_k^{j+1,2n}\}$ 和 $\{d_k^{j+1,2n+1}\}$, 其系数递推公式如式(5)、式(6)所示。

$$d_k^{j+1,2n} = \sum_l h_{0(2l-k)} d_l^{j,n} \quad (5)$$

$$d_k^{j+1,2n+1} = \sum_l h_{1(2l-k)} d_l^{j,n} \quad (6)$$

式中: $d_k^{j+1,2n}$ 、 $d_k^{j+1,2n+1}$ 分别为小波包分解系数; $h_{0(2l-k)}$ 、 $h_{1(2l-k)}$ 分别为进行小波包分解时的低通、高通滤波器。

小波包系数重构是由 $\{d_k^{j+1,2n}\}$ 和 $\{d_k^{j+1,2n+1}\}$ 求 $\{d_l^{j,n}\}$, 重构如式(7)所示。

$$d_l^{j,n} = \sum_k \left[h_{0(l-2k)} d_k^{j+1,2n} + h_{1(l-2k)} d_k^{j+1,2n+1} \right] = \sum_k \left[g_{0(l-2k)} d_k^{j+1,2n} \right] + \sum_k \left[g_{1(l-2k)} d_k^{j+1,2n+1} \right] \quad (7)$$

式中, $g_{0(l-2k)}$ 、 $g_{1(l-2k)}$ 分别为进行小波包重构时的低通、高通滤波器。

根据式(7), 可对各子带内的信号进行重构, 即原始信号 $f(t)$ 可描述为式(8)。

$$f(t) = f_0(t) + f_1(t) + \dots + f_{2^j-1}(t) \quad (8)$$

式中, $f_0(t)$ 、 $f_1(t)$ 、 \dots 、 $f_{2^j-1}(t)$ 分别为重构后各子带内的信号。

根据以上分析可知, 当小波包变换的分解层数增加时, 信号的高频和低频部分都能够达到很精细的分解程度, 但当尺度不同时表征的程度就不相同, 因此, 在小波包分析的过程中需要选用合适的分解尺度。

1.2 频谱特征分析

对于式(8)中的原始信号 $f(t)$, 如果其满足了狄利克雷条件(Dirichlet Conditions), 则就可对 $f(t)$ 进行傅里叶变换。傅里叶变换如式(9)所示。

$$f'(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\lambda t} dt \quad (9)$$

式中, 函数 $f(t)$ 被分解成了多个不同频率的函数和的形式。通常将 $f(t)$ 的傅里叶变换表达式记为式(10)。

$$f'(\lambda) = F[f(t)] \quad (10)$$

式中: F 为傅里叶算子; λ 为频率变量; t 为时间变量。通常称 $f'(\lambda)$ 是谱函数, 模 $|f'(\lambda)|$ 为频谱。

频谱函数表示了各个频率信号所占有的比例, 所以频谱能够表征出时域信号所不能表征出的信号的一些特性。根据频谱就能获得信号的频谱特征量。在本文中, 根据频谱的特点, 利用频谱特征量获得信号所含有的频率成分。

1.3 相对小波包能量特征

颜世玉等人借用相对小波能量引入了相对小波包能量的概念, 并用相对小波包能量表征出信号的一些特性^[14]。由此, 本文中应用相对小波包能量来分析信号的特征。

电力信号通过 j 层的小波包分解后, 小波包系数为 $d(j,0)$, $d(j,1)$, \dots , $d(j,2^j-1)$, 则总的小波包能量可用式(11)表示。

$$E_{\text{tot}} = \|f(t)\|^2 = \sum_{i=0}^{2^j-1} \|d(j,i)\|^2 \quad (11)$$

式中, i 表示第 j 层上第 i 个子带。

定义相对小波包能量如式(12)所示。

$$p_i = \frac{E_i}{E_{\text{tot}}} = \frac{\|d(j, i)\|^2}{\sum_{i=0}^{2^j-1} \|d(j, i)\|^2} \quad (12)$$

在电力系统信号中基波和间谐波的相对小波包能量较大, 而其他成分的相对小波包能量较小。针对已经进行小波包分解的信号, 本文以总的小波包能量为基准, 以频谱上得到的信号所含有的频率数目为阈值, 选取相对小波包能量最大的前几个分量, 将这几个分量进行小波包重构, 重构后的这几个分量就是基波分量和间谐波分量。

1.4 apFFT 算法原理

apFFT 的基本思想是先对信号数据全相位处理, 然后再进行 FFT 变换。

设 $x(n)$ 为原始信号的离散序列, 则输入的数据为 $\{\dots, x(-N+1), \dots, x(0), \dots, x(N-1), \dots\}$ 。考虑到全部的分段, 可以形成 $x_0 \sim x_{N-1}$ 的分段。

$$x_0 : x(0), \dots, x(N-2), x(N-1)$$

$$x_1 : x(-1), x(0), \dots, x(N-3), x(N-2)$$

⋮

$$x_{N-1} : x(-N+1), \dots, x(-1), x(0)$$

将各段数据以 x_0 为中心对齐对信号进行截断, 然后进行 FFT 变换, 并利用窗函数对变换结果进行加权修正。

$$x(n) = e^{j(2\pi k_0 n / N + \phi_0)} \quad (13)$$

根据文献[15]中推导, 可知 apFFT 输出为

$$Y_N(k) = \frac{1}{N} \cdot \frac{\sin^2(\pi(k-k_0))}{\sin^2(\pi(k-k_0)/N)} \cdot e^{j\phi_0} \quad (14)$$

式中, $k = 0, 1, \dots, (N-1)$ 。

最后, 对经过全相位处理的 N 点序列搜索峰值, 即可获得相对应的幅值和频率。

2 算法描述

本文的间谐波检测过程如图 1 所示。步骤如下:

1) 选择合适的分解尺度与小波包对原信号进行分解, 应用相对小波包能量特征理论计算各个子带上的相对小波包能量以及所占比例。

2) 对原信号进行 FFT 变换, 得到信号所含的频率成分。

3) 结合频率成分与相对小波包能量筛选子带。

4) 重构子频带内的时域信号得到基波、间谐波以及高频细节信号。

5) 运用 apFFT 算法对得到的基波和间谐波进行处理, 计算相应的幅值和频率。

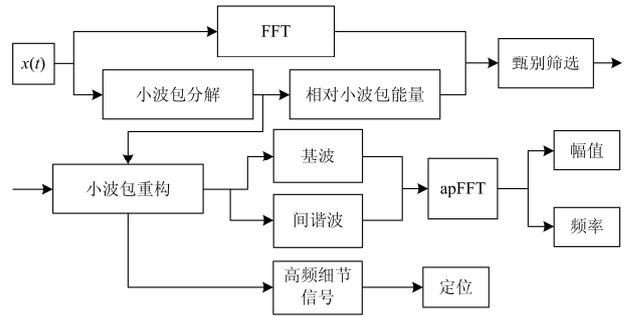


图 1 间谐波检测方法过程图

Fig. 1 Process of the inter-harmonic detection method

3 算法仿真及结果比较

3.1 稳态间谐波信号仿真

采用文献[16]中的电压信号:

$$S(t) = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t) + \frac{220\sqrt{2}}{7} \sin(224\pi t) + \frac{220\sqrt{2}}{9} \sin(450\pi t) \quad (15)$$

首先运用 FFT 变换对 $S(t)$ 进行频谱分析, 可知信号中存在基波分量和 2 个间谐波分量, 其频谱图如图 2 所示。

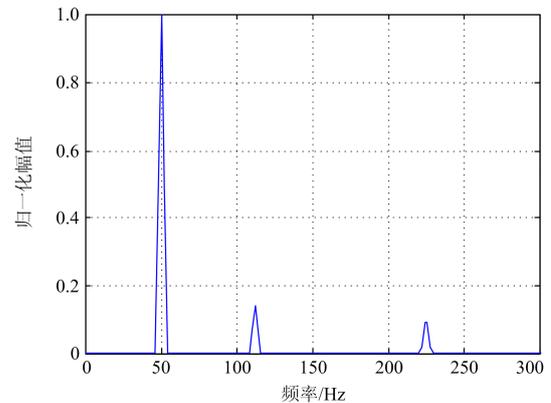


图 2 信号频谱图

Fig. 2 Frequency spectrum of the signal

通过以上分析可知, 不仅要基波分量进行小波包分析, 还要对信号中的两个间谐波分量进行分析, 因此可确定小波包分析时的分解尺度。本文采用了 db44 小波包 4 层分解对信号 $S(t)$ 进行相对小波包能量比分析, 第 4 层上的 16 个子带能量与百分比如表 1 所示。

根据以上分析, 选取百分比最大的前 3 个分量, 由此可知 p_1 、 p_2 和 p_4 为辨识得出的基波和间谐波。重构得出基波 $S_1(t)$ 、112 Hz 间谐波 $S_2(t)$ 和 225 Hz 间谐波 $S_3(t)$, 检测结果如图 3 所示。

表 1 p_i 能量与百分比

Table 1 Energy and the percentage of p_i

	能量(E)	百分比/%
p_1	148 490 000	98.79
p_2	180 690 0	1.20
p_3	696.65	0.000 46
p_4	3832.60	0.0026
p_5	25.86	0.000 017
p_6	44.70	0.000 029
p_7	85.39	0.000 057
p_8	146.74	0.000 098
p_9	0.07	0.000 000 045
p_{10}	0.20	0.000 000 13
p_{11}	1.14	0.000 000 76
p_{12}	1.10	0.000 000 73
p_{13}	12.47	0.000 008 3
p_{14}	9.06	0.000 006 1
p_{15}	3.02	0.000 002 1
p_{16}	5.74	0.000 003 8

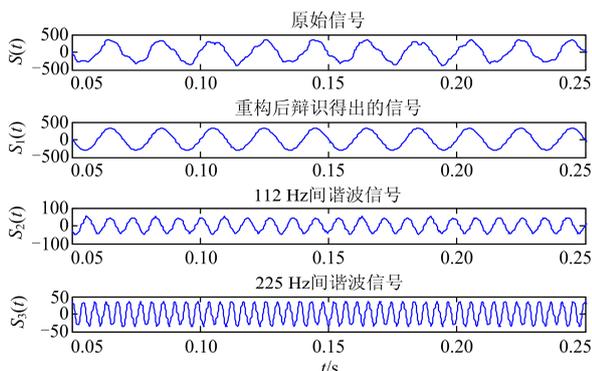


图 3 间谐波信号仿真图

Fig. 3 Simulation of inter-harmonic

为检验重构的效果, 计算重构信号与原始信号的相关度。忽略端点的影响, 计算出基波信号的相关度 $R_1=0.9999$, 112 Hz 间谐波信号的相关度 $R_2=0.9969$, 以及 225 Hz 间谐波信号的相关度 $R_3=0.9970$, 由此可以说明检测出的分量与原信号具有很高的相关度。

分别利用文献[16]中的综合法和 apFFT 算法求得基波和间谐波的幅值与频率, 如表 2 和表 3 所示。

表 2 幅值测量结果对比

Table 2 Comparison of result of amplitude

波形	设定值/V	测量值/V		相对误差/%	
		综合法	本文方法	综合法	本文方法
基波	220	218.37	220.06	0.74	0.03
112 Hz 间谐波	31.43	31.64	31.38	0.67	0.000 16
225 Hz 间谐波	24.45	24.62	24.42	0.70	0.12

表 3 频率测量结果对比

Table 3 Comparison of result of frequencies

波形	设定值/Hz	测量值/V		相对误差/%	
		综合法	本文方法	综合法	本文方法
基波	50	50.29	50.01	0.58	0.02
112 Hz 间谐波	112	112.38	112.01	0.34	0.0089
225 Hz 间谐波	225	226.03	225.01	0.46	0.0044

由表 2、表 3 中可以看出: 测量得到的各个分量的幅值和频率较之文献[16]中的综合法更为精确。

3.2 暂态间谐波信号仿真

当信号中含有暂态间谐波时, 不但要检测其幅值和频率, 而且还要检测其发生的时间, 以便合理保护电气设备。

由小波包分析可知, 当信号在某一区间上发生了突变时, 在这一区间上信号的小波包变换的高频系数会有局部模极大值, 由此, 可实现对暂态间谐波的定位^[16]。

采用文献[16]中的电压信号:

$$S(t) = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t) + \frac{220\sqrt{2}}{7} \sin(224\pi t_1) + \frac{220\sqrt{2}}{9} \sin(450\pi t_1) \quad (16)$$

式中, $0.1 \text{ s} \leq t_1 \leq 0.2 \text{ s}$ 。首先对信号 $S(t)$ 进行 FFT 变换, 可以得知信号中存在基波分量和两个间谐波分量, 其频谱图如图 4 所示。

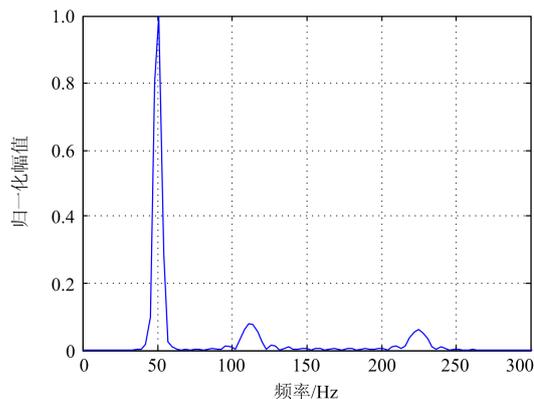


图 4 信号频谱图

Fig. 4 Frequency spectrum of the signal

采用 db44 小波包 4 层分解对信号 $S(t)$ 进行相对小波包能量比分析, 得到的第 4 层上的 16 个子带能量与百分比如表 4 所示。

根据以上分析, 选取百分比最大的前 3 个分量, 由此可知 p'_1 、 p'_2 和 p'_4 为辨识得出的基波和暂态间谐波。重构得出基波 $S_1(t)$ 、112 Hz 暂态间谐波

$S_2(t)$ 、225 Hz 暂态间谐波 $S_3(t)$ 和高频细节信号 $S_4(t)$ ，检测结果如图 5 所示。

表 4 p'_i 能量与百分比

Table 4 Energy and the percentage of p'_i

	能量(E)	百分比/%
p'_1	73 034 000	99.76
p'_2	176 760	0.24
p'_3	305.82	0.000 42
p'_4	1355.10	0.0019
p'_5	43.32	0.000 059
p'_6	56.09	0.000 077
p'_7	113.76	0.000 16
p'_8	92.11	0.000 13
p'_9	17.26	0.000 024
p'_{10}	16.12	0.000 022
p'_{11}	22.80	0.000 031
p'_{12}	18.44	0.000 025
p'_{13}	35.42	0.000 048
p'_{14}	27.49	0.000 038
p'_{15}	18.29	0.000 025
p'_{16}	24.40	0.000 033

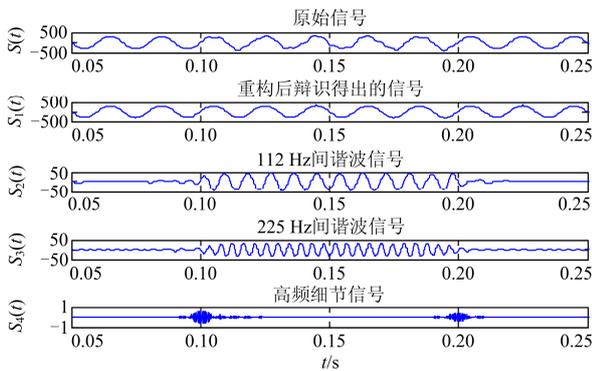


图 5 间谐波信号仿真图

Fig. 5 Simulation of inter-harmonic

由以上分析可知，高频细节信号 $S_4(t)$ 在 0.1~0.2 s 出现了模值极大，也就是说给定信号在 0.1 s 处突变开始，在 0.2 s 处结束，这就对暂态信号实现了定位检测。

计算重构信号与原信号的相关度，其中基波的相关度 $R'_1=0.9999$ 、112 Hz 暂态间谐波的相关度 $R'_2=0.9967$ 和 225 Hz 暂态间谐波的相关度 $R'_3=0.9987$ ，说明重构得到的分量与原始信号具有很高的相关度。利用 apFFT 测量各个分量，将检测的幅值和频率值与文献中的结果进行比较，如表 5、表 6 所示。

由表 5、表 6 可以看出，与文献[16]中综合法相比，本文方法更加精确。

表 5 幅值测量结果对比

Table 5 Comparison of result of amplitude

波形	设定值/V	测量值/V		相对误差/%	
		综合法	本文方法	综合法	本文方法
基波	220	217.70	219.60	1.05	0.18
112 Hz 间谐波	31.43	32.14	31.18	2.29	0.80
225 Hz 间谐波	24.45	24.44	24.44	0.04	0.04

表 6 频率测量结果对比

Table 6 Comparison of result of frequencies

波形	设定值/Hz	测量值/V		相对误差/%	
		综合法	本文方法	综合法	本文方法
基波	50	50.14	49.93	0.58	0.14
112 Hz 间谐波	112	110.72	112.01	0.34	0.0089
225 Hz 间谐波	225	224.33	225.01	0.46	0.0044

4 结论

本文探讨了一种电力系统间谐波信号的检测方法。由仿真结果的分析与比较可以看出：该方法能够更加有效地实现对间谐波的检测，既能有效检测稳态间谐波信号，又能准确地定位暂态间谐波，并且具有较高的检测精度。但是对于包含多个相邻频率间谐波的电力信号，本文的间谐波检测方法还不够理想。因此，在间谐波检测的过程中，怎样消除多个相邻间谐波的相互影响，有待进一步研究。

参考文献

- [1] LIN H C. Inter-harmonic identification using group-harmonic weighting approach based on the FFT[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 1309-1319.
- [2] KURASHI T, KAWADA M, ISAKA K. Development of recursive interpolated D/FFT for on-line and highly accurate frequency analysis[J]. IEEJ Transaction on Electrical and Electronic Engineering, 2008, 3(5): 574-582.
- [3] 施涛, 朱凌志, 于若英. 电力系统灵活性评价研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 146-154. SHI Tao, ZHU Lingzhi, YU Ruoying. Overview on power system flexibility evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 146-154.
- [4] Institute of Electronic Engineers. Standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced conditions: 1495—2010-IEEE[S]. New York: IEEE Standards, 2010.
- [5] 黄飞, 宋璇坤, 周晖, 等. 基于效果与基础互动的电网

- 智能化水平综合评价指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 142-148.
- HUANG Fei, SONG Xuankun, ZHOU Hui, et al. Research on comprehensive evaluation index system of grid's intelligence level based on interaction between effect and basis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 142-148.
- [6] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 145-153.
- LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 145-153.
- [7] 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 Chunfang, LIU Min. Inter-harmonics analysis based on double interpolation FFT algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(3): 11-14, 19.
- [8] 彭祥华, 周群, 曹晓燕. 一种高精度的电网谐波/间谐波检测的组合优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 95-101.
- PENG Xianghua, ZHOU Qun, CAO Xiaoyan. A high precision combinational optimization algorithm of power grid harmonic/inter-harmonic signal detection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 95-101.
- [9] 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 Guozhi, YANG Caishan, 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.
- [10] 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 Huijuan, WANG Youhua, WANG Yanyan, et al. Power system interharmonics analysis based on autoregression model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 144-149.
- [11] 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 Yuhui, HE Jianwei, LI Tianyun. 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.
- [12] 房国志, 杨超, 赵洪. 基于 FFT 和小波包变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 75-79.
- FANG Guozhi, YANG Chao, ZHAO Hong. Detection of harmonic in power system based on FFT and wavelet packet[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 75-79.
- [13] 付贤东, 康喜明, 卢永杰, 等. 全相位 FFT 算法在谐波测量中的应用[J]. 电测与仪表, 2012, 49(2): 19-22.
- FU Xiandong, KANG Ximing, LU Yongjie, et al. Application of all phase FFT algorithm in harmonic measurement[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2012, 49(2): 19-22.
- [14] 颜世玉, 刘冲, 赵海滨, 等. 基于小波包分解的意识脑电特征提取[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1748-1752.
- YAN Shiyu, LIU Chong, ZHAO Haibin, et al. Imaginary EEG feature extraction based on wavelet packet decomposition[J]. Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1748-1752.
- [15] 黄翔东. 全相位数字信号处理[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- HUANG Xiangdong. All-phase digital signal processing [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [16] 房国志. 暂态电能质量检测方法的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- FANG Guozhi. Study and implementation of transient power quality detection method[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013.

收稿日期: 2016-07-09; 修回日期: 2016-08-17

作者简介:

杨名(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置; E-mail: 614186067@qq.com

陈红卫(1966—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为船舶自动化、计算机应用技术。E-mail: chw661003@163.com

(编辑 魏小丽)