

基于小波变换和 HHT 的分布式并网系统谐波检测方法

李正明, 徐敏, 潘天红, 陈武晖

(江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 在分布式电源并网系统中, 大量逆变装置的使用与非线性负载的接入, 给电网带来严重的谐波污染, 传统的检测方法(如: 快速傅里叶变换、小波分析等)对同步信号检测、基函数选取有较大的依赖性, 难以适应微电网环境下的谐波检测要求。为此, 结合小波变换与 HHT, 提出一种新的微电源并网模式下的谐波检测与分析方法。该方法利用小波变换多分辨率分析思想对信号进行划分, 并对划分后的信号进行经验模态分解, 得到一系列的经验模态函数(intrinsic mode function, IMF), 并从 IMF 分量中提取出基波分量和高次谐波; 再对 IMF 分量进行 Hilbert 变换得到信号的频率、幅值信息。仿真实验表明该算法的谐波分析精度高, 实时性好, 能满足分布式并网系统的谐波检测要求。

关键词: 分布式电源; 小波变换; 希尔伯特-黄变换; 经验模态分解; 谐波检测

A harmonic detection method for distributed connected grid system by using wavelet transform and HHT

LI Zheng-ming, XU Min, PAN Tian-hong, CHEN Wu-hui

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In distributed connected grid system, there is serious harmonic pollution caused by wide use of inverter units and access of nonlinear loads. The traditional detection methods such as Fast Fourier Transform and wavelet analysis heavily depend on synchronous signal detection or basis functions selection, and don't satisfy the requirements of the harmonic detection of micro grid environment. Therefore, a novel harmonic detection and analysis method under the mode of micro-sources connected in parallel is proposed combining the wavelet transform with HHT. The method uses multi resolution analysis of wavelet transform to process the original signal. Then, a series of intrinsic mode function (IMF) components are obtained from the processed signal by using empirical mode decomposition algorithm, and the fundamental component and harmonic are extracted from the IMF components. Finally, the frequency and amplitude of signal are calculated by using the Hilbert transform. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm has high precision and good real-time characteristics. Furthermore, the algorithm can satisfy the requirements of the harmonic detection of distributed connected grid system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61273142).

Key words: distributed generator; wavelet transform; Hilbert-Huang transform; empirical mode decomposition; harmonic detection

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0034-06

0 引言

世界范围内的能源危机、电力贫缺与大面积停电事故已暴露出“集中发电”的电力系统已经不能完全满足对电力供应的质量与安全可靠的要求。分布式电源(Distribute Generator, DG)以其投资小、清洁环保、供电可靠和发电方式灵活等优点日益成

为人们研究的热点^[1-4]。

但由于微电源的接入给电力系统的电能质量产生影响^[5-6], 特别是谐波污染问题。实时、准确的谐波检测是治理的前提和保证。目前应用最广泛的谐波检测方法是快速傅里叶算法。但由于在检测过程中, 很难实现同步采样, 导致其在检测时存在频谱泄露和栅栏效应^[7-8]; 文献[9-11]对传统 FFT 算法进行了改进, 利用加窗插值方法对谐波及间谐波进行了检测, 一定程度上减少频谱泄露, 但其不足之处在于窗函数较为复杂, 分析窗的宽度需要几十个信号周期, 从而导致实时性不好; 文献[12-14]将小

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273142); 江苏省科技支撑计划项目(BE2011143); 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 PAPP

波变换应用于谐波检测, 其是一种时频分析方法, 具有良好的局部化性质, 但小波变换对信号局部没有自适应性, 其结果依赖于小波基函数的选取, 若小波基选取不当, 会大大降低检测精度。

希尔伯特-黄变换 (HHT) 是一种自适应时频分析方法^[15-16], 它不但克服了 FFT 无法将时域和频域相结合的缺点, 同时还具有小波变换无法实现的自适应分解和无基函数选择等优势, 但由于在分布式并网系统中, 基波能量远远大于高次谐波, 并且高次谐波之间能量相差不大, 导致直接使用 HHT 在检测谐波容易出现模态混叠。为此, 本文提出一种基于小波变换和 HHT 的谐波检测新方法, 对分布式电源并网节点处电流进行谐波检测, 经仿真验证, 本文方法在一定程度上改善了模态混叠现象, 具有较高的精度与良好的实时性, 能够满足分布式并网系统谐波检测的要求。

1 问题描述

分布式电源的特殊性导致微电网的输出功率具有间歇性和波动性, 若使它们输出平稳的功率, 则就需要在逆变器的直流侧配备大容量的储能装置, 这样大大降低了系统的经济性。因此, 本文采用恒功率控制方式控制微电源发出恒定功率。

微网中的分布式电源都是通过逆变器接入系统和大电网, 因此对微电源的控制即为对逆变器的控制。图 1 是由 PQ 控制的 DG 并网系统结构图。

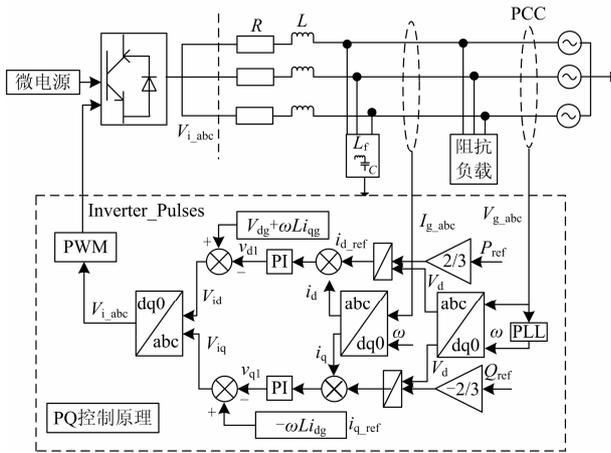


图 1 DG 并网结构图

Fig. 1 DG connected grid structure diagram

从图 1 中看出, 微网中的分布式电源(包括光伏电池, 风力发电机等)通过逆变器, 经 LC 滤波后接负载, 并入电网, 由 DG 并网结构图可得

$$V_{i_abc}(t) = -RI_{g_abc}(t) - L\frac{dI_{g_abc}(t)}{dt} + V_{g_abc}(t) \quad (1)$$

其中: R 、 L 是三相电路的电阻和电感; V_{g_abc} 、 I_{g_abc} 是三相瞬时电网电压和电流; V_{i_abc} 是逆变器输出电压。从式 (1) 看出, 由于 V_{g_abc} 为恒定电网电压, 微电源对 PCC 点输出功率由 I_{g_abc} 决定, 而 I_{g_abc} 可以由线路两端的压降及线路阻抗决定, 因此 PQ 控制可由控制逆变器输出电压 V_{i_abc} 决定。

图 1 中虚线框内即为 PQ 控制原理。其主要由三个部分: 1) 锁相环和 Park 变换。即电网电压 V_{g_abc} 经过锁相之后, 得到角频率 ω , 为系统提供频率支撑; 同时为了实现电流解耦控制, 将 V_{g_abc} 和 I_{g_abc} 经过 Park 变换, 同时选取 d 轴与电压矢量同方向, 得到 $V_q = 0$, V_d , i_d 和 i_q 分量; 2) 功率控制。根据参考功率 P_{ref} 和 Q_{ref} 以及 d 轴分量, 可得参考电流 i_{d_ref} 和 i_{q_ref} ; 3) 电流控制。将 2) 中得到的参考电流和 1) 中 i_d 和 i_q 分量进行 PI 调节, 经过计算得到 V_{id} 和 V_{iq} , 再经过 Park 反变换得到 PWM 的参考电压 V_{i_abc} , 从而实现恒功率控制。

分布式并网系统中, 大量逆变装置的使用与非线性负载的接入给电网带来严重的谐波污染, 为了实时准确地检测谐波, 本文提出一种基于小波变换和 HHT 的谐波检测新方法。该方法不仅一定程度上减小了小波变换由于基函数选取不当造成的检测误差, 同时改善了 HHT 直接检测谐波信号时产生的模态混叠现象。

2 基于小波变换和 HHT 谐波分析方法

本文提出基于小波变换和 HHT 的谐波分析方法具体过程如图 2 所示。以下给出本文算法的具体步骤:

- 1) 首先依据分布式并网系统模型, 对公共连接点处的电流信号进行采样。
- 2) 其次, 利用小波变换多分辨率思想对信号进行分解和重构, 将信号划分成不同的子频带信号。
- 3) 然后利用经验模态分解对子频带信号进行分解, 得到一系列的 IMF 分量, 进而从 IMF 分量中提取出基波分量和高次谐波。
- 4) 最后利用 Hilbert 变换得到信号的频率、幅值信息。

其中小波多分辨率分析具体方法可参考文献 [17-18], 经过 EMD 分解的固有模态函数 (IMF) 应满足以下两个条件:

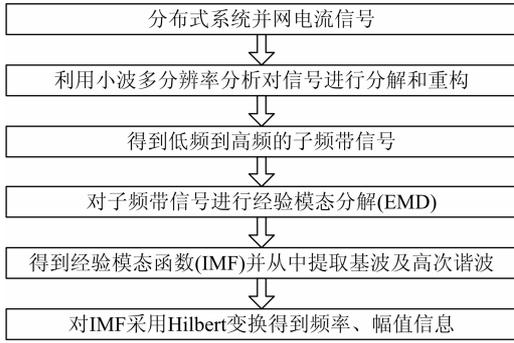


图 2 本文算法对 DG 并网电流谐波分析过程框图

Fig. 2 Current harmonic analysis diagram in DG connected grid using the paper's algorithm

1) 整个数据中, 零点与极点数相等或至多相差 1。

2) 信号上任意一点, 由局部极大值点确定的包络线和由局部极小值点确定的包络线的均值为 0, 即信号关于时间轴局部对称。

HHT 过程中的 EMD 分解过程:

1) 对任一信号 $X(t)$, 首先确定所有的极值点, 然后用三次样条曲线拟合所有极大值点和极小值点形成上、下包络线 $U(t)$ 和 $V(t)$ 。

2) 求出上、下包络线的平均值 m , 并令 $h(t) = X(t) - m$, 则 $h(t)$ 为一个近似的 IMF。

3) 将 $h(t)$ 作为新的 $X(t)$, 重复 1)、2) 步骤, 直到 $h(t)$ 满足 IMF 条件为止, 此时得到第一阶的

IMF 记作 $c_1(t)$ 。

4) 将 $r(t) = X(t) - c_1(t)$ 作为新的 $X(t)$, 重复以上 1)、2)、3) 步骤, 依次得到第二阶 IMF 分量, 第三阶 IMF 分量等, 直到 Re 基本呈单调趋势或 $|r(t)|$ 很小而不能从中提取 IMF 分量时, 分解结束, 原信号 $X(t)$ 即为所有 IMF 分量以及残差函数的和, 即

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) \quad (2)$$

其中, $r(t)$ 称为残差函数, 表示信号的趋势。对每个 IMF 分别做希尔伯特变换后得

$$X(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\phi_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt} \quad (3)$$

这里省略了残差函数 $r(t)$, Re 表示取实部。称式(3)展开式为希尔伯特幅值谱, 简称希尔伯特谱, 记为

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt} \quad (4)$$

经过希尔伯特变换后的希尔伯特谱能够准确地反应信号随时间变化的幅值、频率信息。

3 实验结果仿真及分析

根据原理图 1, 在 Matlab 仿真环境中构建分布式并网系统仿真模型, 如图 3 所示。

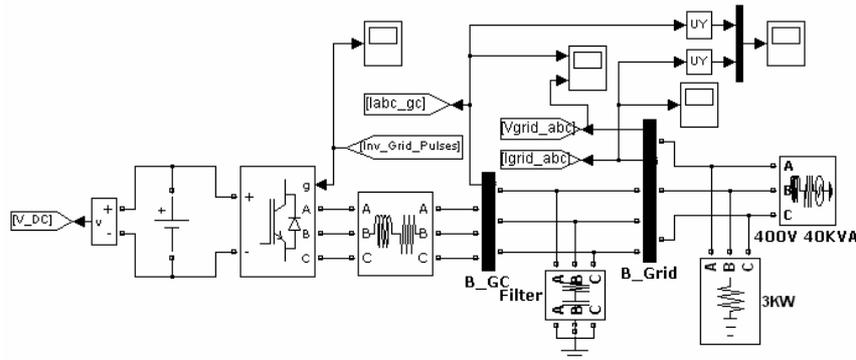


图 3 分布式并网系统仿真模型

Fig. 3 Simulation model of distributed connected grid system

为了更好地验证本文算法的有效性, 本文对模型做了一定的简化, 将分布式电源等效为经过升压之后的直流源, 设置仿真模型算例参数如表 1 所示。

在 Matlab 中对分布式并网系统模型进行仿真, 并对公共连接点 (Point of common coupling, PCC) 点处的电流信号进行采样, 采样频率 $F_s = 10 \text{ kHz}$, 采样信号周期个数为 32 个, 得到并网电流原始信号

记为 $s(t)$, 单独采用小波变换多分辨率分析算法对其谐波进行检测。选取具有紧支性的正交小波 db24 对 PCC 点电流信号进行 6 层分解, 得到近似信号 a_6 和细节信号 $d_1 \sim d_6$, 近似信号 a_6 看作是信号中的基波分量, $d_1 \sim d_6$ 是信号的高次谐波分量, 仿真结果如图 4 所示。

表 1 仿真模型参数设置

Table 1 Setting the parameter of simulation model

参数	
微电源	$U_{dc}=1\ 200\ \text{V}$, $L=10\ \mu\text{H}$, $C=1.6\ \mu\text{F}$
P 、 Q	$0\sim 0.2\ \text{s}$, $P_{\text{ref}}=10\ \text{kW}$, $Q_{\text{ref}}=2\ 000\ \text{kvar}$
线路阻抗及负载	$R=0.01\ \Omega$, $L=0.04\ \text{H}$, $3\ \text{kW}$ 负载
大电网	$400\ \text{V}$, $40\ \text{kVA}$

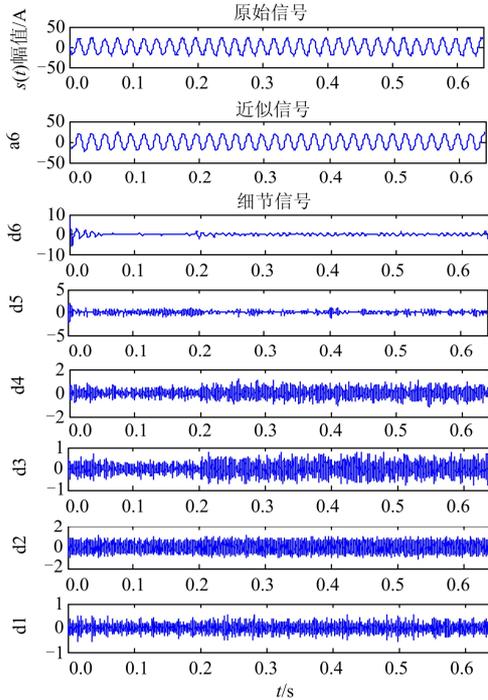


图 4 db24 小波对并网电流谐波检测结果

Fig. 4 Harmonic detection result for the current signal of connected grid by using db24 wavelet

从图 4 仿真结果看出, 高频部分出现了明显的频率混叠, 很难从原始信号中准确地检测出基波及高次谐波。其基波检测精度由均方差值的均方误差表示, 亦即

$$\delta = 1 - \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^*)^2} \right) / \left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2} \right) \quad (5)$$

其中: i 为原始信号基波分量的第 i 个采样点数据; x_i^* 为近似信号 a6 的第 i 个采样点数据; N 表示采样点数。

计算得到近似信号 a6 和基波之间的相对误差为 4.52%。由此可见, 由于小波基的选取不当, 导致检测精度下降, 误差较大。

为了减小小波变换中由于小波基选取不当造成的误差, 可采用具有自适应分解方法 HHT 对并网电流谐波进行检测, 仿真结果如图 5 所示。

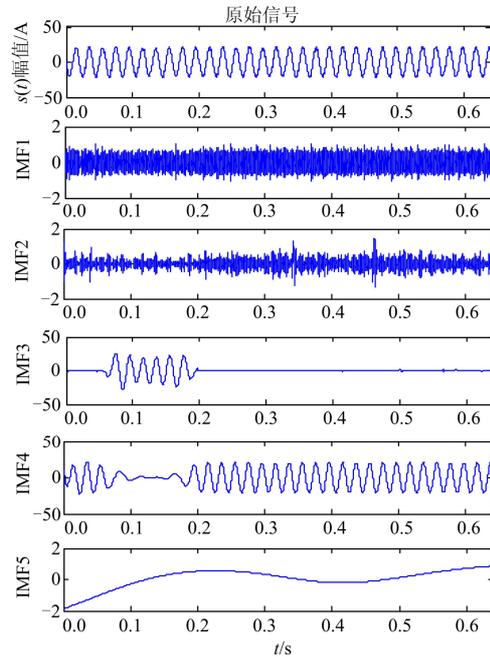


图 5 HHT 对并网电流谐波检测结果

Fig. 5 Harmonic detection result for the current signal of connected grid by using HHT

从图 5 仿真结果看出, 直接用 HHT 检测谐波时, 经过 EMD 分解时产生的各 IMF 分量之间产生了模态混叠, 不能很好地从 IMF 分量中检测出基波及高次谐波, 这是由分布式系统并网电流信号的基波能量远远大于高次谐波, 并且高次谐波之间能量相差不大造成的。

鉴于以上两种方法检测谐波时各自存在的缺陷, 本文提出基于小波变换和 HHT 的新方法对 PCC 点处的并网电流进行谐波检测。仿真结果如图 6 所

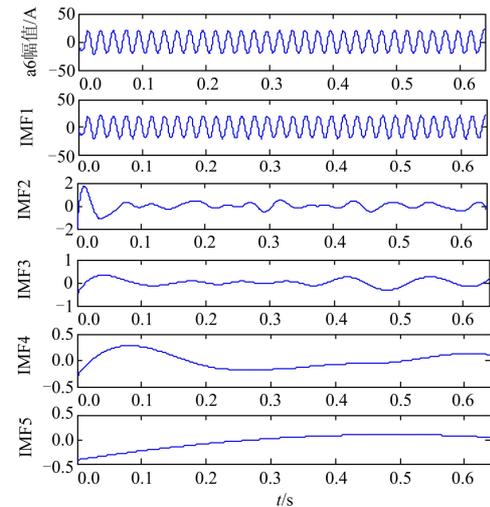


图 6 本文算法对并网电流信号分析结果

Fig. 6 Harmonic detection result for the current signal of connected grid by using the paper's algorithm

示, 其具体分析过程是将上述经过小波变换多分辨率分析后产生的各个子频带信号当作是对原始信号的预处理, 然后对子频带近似信号 a_6 进行 EMD 分解得到一系列的 IMF 分量, IMF1 近似为基波分量, IMF5 为残差函数。从而从子频带信号 a_6 中检测出基波分量。与图 5 仿真结果对比得出, 本文算法在一定程度上改善了直接使用 HHT 时出现的模态混叠现象。

同时将信号 $s(t)$ 的实际基波分量与 IMF1 分量进行波形误差比较, 仿真结果如图 7 所示。根据公式(5), 得到基波相对误差仅为 0.24%。实验结果表明, 与小波变换结果相比, 本文算法在检测谐波时误差较小, 检测精度高。

利用本文算法得到各次谐波幅值与小波变换和 HHT 算法分析对比的结果如表 2 所示, 从表 2 结果看出, 与小波算法和 HHT 算法相比, 本文算法在检测分布式并网系统谐波幅值时误差较小, 检测精

度高, 达到实时准确地检测分布式并网系统谐波电流的要求。

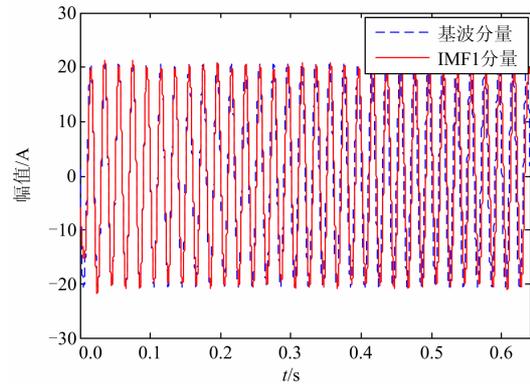


图 7 IMF1 和基波分量误差对比结果

Fig. 7 Result of comparison between IMF1 and fundamental component

表 2 原始信号参数及各算法分析比较结果

Table 2 Original signal parameters and comparison results of each algorithm

算法	基波	三次谐波	五次谐波	七次谐波	九次谐波
实际幅值/A	19.67	0.097 05	0.196 1	0.114 7	0.022 783
db24 小波算法	20.283 6	0.081 22	0.201 2	0.013 7	0.025 820
HHT 算法	18.874	0.072 12	0.125 5	0.070 9	0.017 204
本文算法	19.649 2	0.093 93	0.196 1	0.110 1	0.023 245

4 结语

由于分布式并网系统自身的特殊性, 如: 输出功率间歇性、基波频率变动等, 导致传统的谐波检测算法(如: 快速傅里叶变换、小波分析等)在检测分布式并网系统谐波时存在各自的缺陷, 难以适应微电源并网模式下的谐波检测。

因此, 本文基于小波变换和 HHT 提出一种新的谐波分析新算法来检测并网电流谐波。仿真结果表明, 该算法不仅减小了小波变换中基函数选择不当而引起的误差, 同时也在一定程度上改善了经验模式分解过程中产生的模态混叠; 验证了该算法在分布式并网系统模式下对并网电流谐波检测的有效性和可行性, 能满足实时准确检测谐波的要求。

参考文献

[1] 胡吟, 韦钢, 言大伟, 等. 分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 100-105.
HU Yin, WEI Gang, YAN Da-wei, et al. Optimization

allocation of distributed generations embedded in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 100-105.

- [2] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.
WU Wei-min, HE Yuan-bin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [3] 王成山, 王守相. 分布式发电供电系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4.
- [4] Chiradejs P, Ramakumar R. An approach to quantify the technical benefits of distributed generation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(4): 764-773.
- [5] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电对配电网影响的综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 132-135.

- ZHANG Li-mei, TANG Wei, ZHAO Yun-jun, et al. The integrated evaluation of impact of distributed generation on distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 132-135.
- [6] Tran K, Vaziri M. Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, USA, 2005.
- [7] 惠锦, 杨洪耕. 基于间谐波泄露估算的谐波间谐波分离检测法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 183-190.
- HUI Jin, YANG Hong-geng. Harmonics and interharmonics separate-detection method based on estimation of leakage values caused by interharmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 183-190.
- [8] 王刘旺, 黄建才, 孙建新, 等. 基于加汉宁窗的 FFT 高精度谐波检测改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 28-33.
- WANG Liu-wang, HUANG Jian-cai, SUN Jian-xin, et al. An improved precise algorithm for harmonic analysis based on Hanning-windowed FFT[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 28-33.
- [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 interpolation FFT algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 87-91.
- [10] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 270-277.
- WEN He, TENG Zhao-sheng, WANG Yong, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 270-277.
- [11] Belega D, Dallet D, Petri D. Statistical description of the sine-wave frequency estimator provided by the interpolated DFT method[J]. Measurement, 2012, 45(1): 109-117.
- [12] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
- ZHANG Peng, LI Hong-bin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-259.
- [13] 陈长升, 黄险峰. 基于小波变换抗混叠谐波检测的一种新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(23): 23-26.
- CHEN Chang-sheng, HUANG Xian-feng. A novel method for anti-aliasing harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(23): 23-26.
- [14] ZHENG En-rang, LIU Zheng-yan, MA Ling-kun. Study on harmonic detection method based on FFT and wavelet transform[C] // Signal Processing Systems (ICSPS), 2010 2nd International Conference on, 2010: 413-416.
- [15] 刘德利, 曲延滨. 改进的希尔伯特-黄变换在电力谐波中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 60-73.
- LIU De-li, QU Yan-bin. Application of improved HHT approach to harmonic analysis in Power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 60-73.
- [16] 李天云, 程思勇, 杨梅. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 109-113.
- LI Tian-yun, CHEN Si-yong, YANG Mei. Power system harmonic based on Hilbert-Huang transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 109-113.
- [17] 张斌, 孙静. 基于 Mallat 算法和快速傅里叶变换的电能质量分析方法[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 35-40.
- ZHANG Bin, SUN Jing. A power quality analysis method based on Mallat algorithm and Fast Fourier Transform[J]. Power System Technology, 2007, 31(19): 35-40.
- [18] 曾瑞江, 杨振斌, 柳慧超. 基于小波变换的电力系统谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 35-39.
- ZENG Rui-jiang, YANG Zhen-bin, LIU Hui-chao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.

收稿日期: 2013-09-11

作者简介:

李正明 (1957-), 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统自动化、智能电网、电能质量评估等;

徐敏 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网电能质量监测;

潘天红 (1974-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能电网、电力系统分析运行与控制等。E-mail: thpan.ujsg@gmail.com