

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190470

基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法

吴建章¹, 梅飞², 陈畅¹, 潘益¹, 李陶然¹, 郑建勇¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对噪声干扰下的稳态以及暂态谐波检测问题, 首次提出一种基于经验小波变换的电力系统谐波检测方法。首先利用经验小波变换从电力谐波信号中提取出一组具有紧支撑频谱的调幅-调频分量, 实现各次谐波与基波信号的分离。接着对分离出的谐波分量进行 Hilbert 变换, 从而获取各次谐波的幅值和频率检测参数以及暂态谐波的扰动起止时刻。对多类谐波信号的仿真结果表明, 所提方法有效避免了传统 Hilbert-Huang 变换存在的模态混叠问题, 即使在低信噪比下也能实现多频谐波信号的自适应分解, 在确保各类参数检测结果精度的同时, 兼具良好的噪声鲁棒性和检测实时性。

关键词: 经验小波变换; Hilbert 变换; 调幅-调频分量; 噪声; 谐波检测

Harmonic detection method in power system based on empirical wavelet transform

WU Jianzhang¹, MEI Fei², CHEN Chang¹, PAN Yi¹, LI Taoran¹, ZHENG Jianyong¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to detect stationary and transient harmonics under noise interference, an empirical wavelet transform based harmonic detection method for power system is proposed for the first time. Firstly, the empirical wavelet transform is used to extract a set of AM-FM components from power harmonic signals, and the separation of each harmonic and fundamental wave signals is realized. Then, the separated harmonic components are transformed by Hilbert transform to obtain the amplitude and frequency parameters of each harmonic and the start-end time of transient disturbance. The simulation results of multi-class harmonic signals show that the proposed method avoids the mode aliasing problem existing in traditional Hilbert-Huang transform effectively and realizes the adaptive decomposition of multi-frequency harmonic signals even at low signal-to-noise ratio. It ensures the accuracy of detection results of various parameters and has good noise robustness and real-time detection.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52199918000C).

Key words: empirical wavelet transform (EWT); Hilbert transform; amplitude modulated-frequency modulated component; noise; harmonic detection

0 引言

近年来, 随着我国智能电网建设的不断推进, 电网中分布式新能源渗透率逐渐提高, 大量非线性、冲击性负载被投入运行, 导致电网中的谐波污染愈加严重, 谐波组成也日趋复杂^[1-3]。谐波污染在降低电能使用效率、增加电网损耗的同时, 还会影响计量设备以及潮流计算的精度, 更有甚者会造成各级继保装置的拒动和误动, 对电力系统的经济稳定运

行造成了严重威胁^[4-5]。因此, 为了实现谐波污染的针对性治理, 首先应当对电力谐波信号进行精准实时检测。

目前, 国内外学者已对谐波检测进行了大量研究, 并针对不同应用场合, 提出了多种谐波检测方法。其中包括以瞬时无功功率理论、 i_p-i_q 算法为代表的时域特征检测方法, 以 Fourier 变换、小波变换、Hilbert-Huang 变换为主的频域特征检测方法, 和以人工神经网络、最小均方算法为典型的自适应谐波检测方法。但上述分析方法大多易受噪声干扰, 在处理复杂谐波问题, 如间谐波、暂态谐波时的效果

也不尽人意。文献[6]设计了一种基于径向基函数的谐波检测神经网络, 该方法能够在噪声干扰下准确检测谐波和间谐波, 但无法对神经网络规模进行实时动态调整。文献[7]将变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)运用于电力谐波检测中, 该方法有效克服了传统经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)中存在虚假分量的问题, 能够同时分析稳态与暂态谐波, 具有一定的噪声鲁棒性, 但实时性较差, 且需要提前设定模态数目, 未能实现自适应检测。文献[8]提出一种结合 S 变换与 TT 变换的谐波检测方法, 能够精准检测电网中的高频微弱谐波, 但其噪声耐受性能还未得到证实。

经验小波变换(Empirical Wavelet Transform, EWT)由法国学者 Gilles J^[9]于 2013 年首次提出。该方法将原始信号视为一组调幅-调频分量(amplitude modulated-frequency modulated, AM-FM)之和, 可依据不同信号内容自适应地构造经验小波, 既能有效避免传统 EMD 方法的模态混叠现象, 又弥补了小波变换频率分辨率固定的缺陷, 具有分解精度高、计算量小、理论基础完备等特点。目前, EWT 已被初步运用于地震信号处理^[10]、机械故障诊断^[11]、医学信号分析^[12]等领域, 并取得了不错效果。

鉴于经验小波变换良好的模态分解能力, 本文首次将其应用于电力系统谐波检测中, 研究其在噪声环境下对稳态以及暂态谐波的检测性能。首先利用 EWT 将电力谐波信号分解为一组具有不同特征时间尺度的单分量成分, 实现各次谐波分量的自动提取。然后采用 Hilbert 变换对各次谐波的幅值和频率参数进行检测, 并通过暂态谐波瞬时幅值曲线导函数的极值点坐标准确获取暂态扰动的起止时刻。仿真结果表明, 本文方法对由背景噪声引起的检测结果偏差有明显抑制效果, 能够在短时间内对稳态和暂态谐波参数进行精准检测, 为电力系统谐波分析提供了新的思路。

1 经验小波变换

1.1 经验小波变换原理

经验小波变换根据从原始信号的 Fourier 频谱(规范化至 $[0, \pi]$)中获取的先验知识, 基于频域极值点分布自适应地对信号频谱进行划分, 并依据频域分割结果构造合适的小波滤波器组, 在划分后的频域区间内实施经验小波变换, 从而将具有紧支撑频谱的 AM-FM 分量从原信号中分离出来。对于由 N 个 AM-FM 分量组成的离散时间信号 $f(t)$, 其经验小波变换过程如下所述。

(1) 自适应频谱划分

待分解信号 $f(t)$ 所包含的调幅-调频模态个数 N 通常是未知的, 若要将其频谱自适应地划分成 N 个连续区间, 首先应当确定 N 的大小, Gilles 给出了一种基于阈值法的 N 值确定方法^[9]。记信号 Fourier 频谱的极大值幅值序列为 $\{M_i\}_{i=1}^M$, 按幅值大小对序列 $\{M_i\}_{i=1}^M$ 重新进行降序排列, 并设置阈值为 $M_M + \alpha(M_1 - M_M)$, 式中 $\alpha \in (0, 1)$ 表示相对幅值比, 将降序序列中大于该阈值的极大值标记为主极大值, 主极大值的个数即为 N ; 频谱中相邻两个主极大值对应频率 Ω_n 和 Ω_{n+1} 的中点即为划分频谱的边界 ω_n , 其中 $n = 1, 2, \dots, N-1$, $\omega_0 = 0$, $\omega_N = \pi$ 。

(2) 小波函数与尺度函数

在 $N+1$ 个频谱边界 ω_n 确定后, 参考 Meyer 小波的构造方法构造经验尺度函数 $\hat{\phi}_n(\omega)$ 以及经验小波函数 $\hat{\psi}_n(\omega)$, 它们分别被表示为

$$\hat{\phi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_n \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_n)\right)\right], & (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

$$\hat{\psi}_n(\omega) = \begin{cases} 1, & (1+\gamma)\omega_{n+1} \leq |\omega| \leq (1-\gamma)\omega_n \\ \cos\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_{n+1})\right)\right], & (1-\gamma)\omega_{n+1} \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_{n+1} \\ \sin\left[\frac{\pi}{2}\beta\left(\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1-\gamma)\omega_n)\right)\right], & (1-\gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1+\gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\gamma < \min_n \left(\frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n} \right) \quad (3)$$

$$\beta(x) = \begin{cases} x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3), & 0 < x < 1 \\ 0, & x \leq 0 \\ 1, & x \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

(3) 经验小波变换

最后对 $f(t)$ 实施经验小波变换, 分别将原信号同经验尺度函数以及经验小波函数进行内积运算, 即可得到近似系数 $W_f^e(0, t)$ 以及细节系数 $W_f^e(n, t)$, 运算过程分别可以表示为

$$W_f^e(0, t) = \langle f, \hat{\phi}_1 \rangle = \int f(\tau) \hat{\phi}_1(\tau - t) d\tau = F^{-1}(\hat{f}(\omega) \hat{\phi}_1(\omega)) \quad (5)$$

$$W_f^\varepsilon(n, t) = \langle f, \psi_n \rangle = \int f(\tau) \bar{\psi}_n(\tau - t) d\tau = F^{-1}(\hat{f}(\omega) \hat{\psi}_n(\omega)) \quad (6)$$

式中： $\bar{\phi}_1(t)$ 和 $\bar{\psi}_n(t)$ 分别为经验尺度函数 $\phi_1(t)$ 和经验小波函数 $\psi_n(t)$ 的复共轭； $\hat{\phi}_1(\omega)$ 和 $\hat{\psi}_n(\omega)$ 分别为 $\phi_1(t)$ 和 $\psi_n(t)$ 的 Fourier 变换； $F^{-1}[\cdot]$ 定义为 Fourier 反变换。

至此，可以根据式(7)对原信号进行重构。

$$f(t) = W_f^\varepsilon(0, t) * \phi_1(t) + \sum_{n=1}^N W_f^\varepsilon(n, t) * \psi_n(t) = F^{-1} \left[\left(\hat{W}_f^\varepsilon(0, \omega) * \hat{\phi}_1(\omega) + \sum_{n=1}^N \hat{W}_f^\varepsilon(n, \omega) * \hat{\psi}_n(\omega) \right) \right] \quad (7)$$

式中，“*”表示卷积运算。由信号 $f(t)$ 分解所得的经验模态函数 $c_k(t)$ 定义为

$$c_0(t) = W_f^\varepsilon(0, t) * \phi_1(t) \quad (8)$$

$$c_k(t) = W_f^\varepsilon(k, t) * \psi_k(t) \quad (9)$$

1.2 适用于谐波检测的频谱划分方法

在信噪比为 20 dB 的噪声环境中，典型谐波信号 $x(t) = \sin(100\pi t) + 0.4\sin(300\pi t) + 0.2\sin(500\pi t)$ 的原始频谱分割结果如图 1 中实线所示。

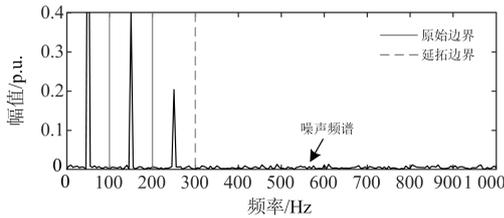


图 1 Fourier 频谱划分结果

Fig. 1 Fourier spectrum division results

由图 1 可知，5 次谐波所处的频域区间内包含大量噪声分量，这将严重干扰谐波检测结果的准确性。因此，为了提高 EWT 应用于电力系统谐波检测时的噪声耐受性能，本文对原有频谱划分方法进行了改进：对原始频谱区间边界进行延拓，令 $\omega_{N+1} = \pi$ ， $\omega_N = \Omega_N + l(\Omega_N - \omega_{N-1})$ ，其中 l 为延展系数，通常可以设置为 1，延拓后增添的频谱边界如图 1 中虚线所示。此时，5 次谐波频谱将落入上下截止频率为 ω_{N-1} 和 ω_N 的带通滤波器内，从而免受高频噪声的污染。边界延拓前后 EWT 的 5 次谐波分解结果 c_1 、 c_2 如图 2 所示，从中可以观察到，调整后的频谱分割方法能够有效滤除高次谐波中的噪声分量。

2 基于经验小波变换的谐波检测方法

2.1 Hilbert 变换

对 EWT 分解后获得的调幅-调频分量进行 Hilbert

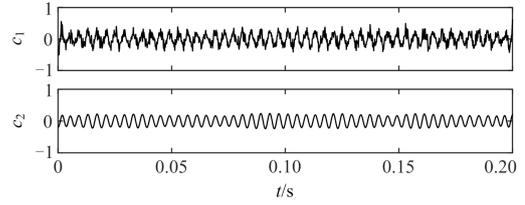


图 2 5 次谐波分解波形对比

Fig. 2 Comparison of 5th harmonic waveform

变换，可以获取谐波扰动的瞬时幅值和瞬时频率信息。对于任一实值信号 $x(t)$ ，其 Hilbert 正变换 $y(t)$ 定义为

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (10)$$

反变换为

$$x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{y(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (11)$$

构造复解析信号 $z(t)$ 为

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (12)$$

式中，瞬时幅值函数 $a(t)$ 和瞬时相位函数 $\theta(t)$ 可表示为

$$\begin{cases} a(t) = \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} \\ \theta(t) = \arctan\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \end{cases} \quad (13)$$

由 $\theta(t)$ 进一步可求得瞬时频率函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (14)$$

2.2 基于瞬时幅值的暂态谐波定位方法

对于电网中可能存在的暂态谐波扰动，仅仅记录其谐波次数与幅度并不能刻画扰动事件的全貌，扰动的起止时间也是电力系统谐波检测中应当考虑的重要参数。

为了与上述谐波检测方法相配合，本文提出了一种基于谐波分量瞬时幅值曲线的暂态谐波扰动定位方法。暂态谐波信号首先经 EWT 变换分解为多个 AM-FM 分量，分别对应原信号中的基波以及各次谐波，接着通过 Hilbert 变换求得各次谐波分量的瞬时幅值曲线 $a_i(t)$ 。暂态谐波分量在谐波扰动发生或终止前后，其瞬时幅值会发生阶跃跳变，因此可以对 $a_i(t)$ 求取一阶导数，根据 da/dt 中的显著极值即可定位扰动起止的具体时刻。由于 $a_i(t)$ 在扰动起止瞬间以外的时刻内存在微小波动^[13]，导致 da/dt 中除显著极值外还存在多个微小极值，故设置阈值 $T = 0.45 \max(|da/dt|)$ ，将导数中绝对值小于 T 的数值清零，保留能够表征扰动起止的显著极值，极值的横坐标对应扰动起止的具体时刻，极值的正负分别

对应扰动的起始和终止。

2.3 谐波检测方法

综合上述原理分析, 本文设计了一种结合经验小波变换和 Hilbert 变换的电力系统谐波检测方法, 该方法具体包含以下几个步骤。

(1) 经验小波分解

首先根据阈值法从各类谐波信号频谱中确定待分解的模态数目 N , 接着运用本文所提的频谱分割方法对其频谱进行自适应划分, 基于划分结果构造正交小波滤波器组, 将谐波信号分解为若干 AM-FM 分量, 实现原始信号中基波以及各次谐波的分离。

(2) 稳态谐波检测

对于经 EWT 分解所得的稳态谐波分量, 利用 Hilbert 变换可以获取其幅值以及频率信息。这里需要指出的是, 由于 EWT 分解存在端点效应, 加之由 Hilbert 变换求得的瞬时幅值和频率参数存在微小波动, 因此, 本文采用去除部分端点后取均值的方法对瞬时幅值和频率曲线进行处理, 以获得最终的幅值与频率检测结果^[14]。

(3) 暂态谐波检测

对于暂态谐波事件, 首先通过 Hilbert 变换获取各个谐波分量的瞬时幅值以及瞬时频率曲线, 接着利用本文提出的暂态谐波定位方法, 依据瞬时幅值曲线获取暂态谐波的起止时刻。最后, 在暂态谐波存在的时间段内, 同样采用去除部分端点后取均值的方法, 获取各时段内谐波的幅值与频率检测结果。

3 仿真分析

本文借助 Matlab 仿真平台生成多类典型谐波信号, 对所提谐波检测方法的检测效果进行验证。设置采样频率 6 400 Hz, 信号时长 0.4 s, 相对幅值 α 取 0.085, 实验电脑配有 i5 处理器和 7.8 G 可用内存。

3.1 稳态谐波检测

设置典型稳态谐波信号 $x_1(t)$ 为

$$x_1(t) = \sin(\omega t) + 0.15\sin(2.2\omega t) + 0.25\sin(3\omega t) + 0.2\sin(5\omega t) + 0.1\sin(7\omega t) \quad (15)$$

式中: $\omega = 2\pi f$; $f = 50$ Hz。由式(15)可知, 该信号包含了 3 次、5 次、7 次谐波和 2.2 次间谐波。EWT 频谱划分结果以及构造的经验小波分别如图 3、图 4 所示。

由图 3 可知, 谐波信号频谱被自适应地划分为 6 个区间。依据频谱分割结果构造如图 4 中所示的经验小波, 并对谐波信号实施 EWT 分解, 可以从原信号分离出 6 个模态分量, 其中最高频分量为无效噪声分量, 因此仅对剩余 5 个有效分解结果 $c_1 \sim c_5$ 进行分析(下同), 原始波形及其分解结果如图 5 所

示。采用 EMD 方法同样对信号 $x_1(t)$ 进行分析, 分解结果如图 6 所示。

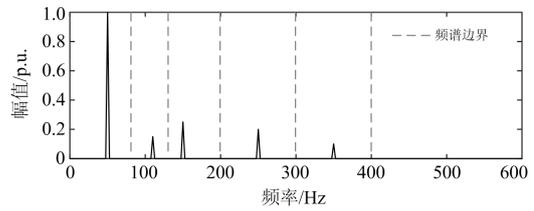


图 3 Fourier 频谱划分结果

Fig. 3 Fourier spectrum division results

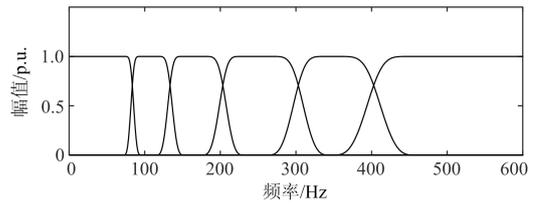


图 4 经验小波

Fig. 4 Empirical wavelet

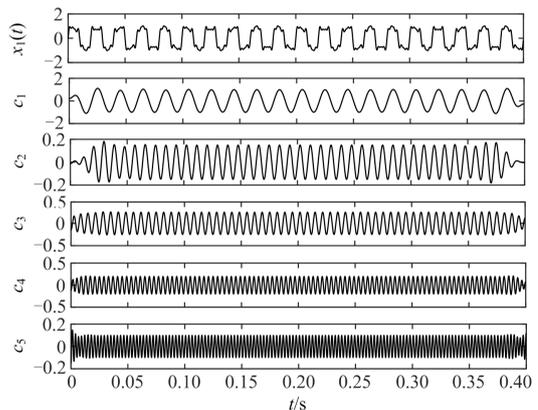


图 5 稳态谐波及其 EWT 分解结果

Fig. 5 Steady-state harmonic and results of EWT

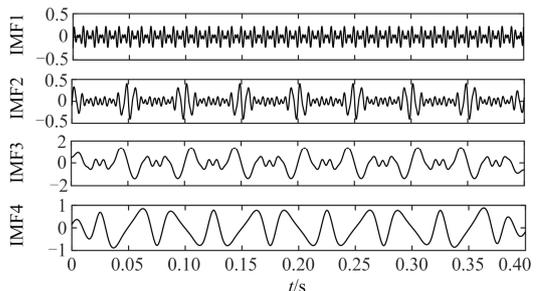


图 6 EMD 分解结果

Fig. 6 EMD decomposition results

由图 6 可知, EMD 仅从原信号中提取出 4 条固有模式函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量。进一步对 IMF1~IMF4 进行频谱分析发现, 每个 IMF 分量中都包含了差异极大的特征时间尺度, 存在严

重的模态混叠现象，这主要是因为多重谐波与基波相叠加后，混合谐波信号不再具备正弦曲线光滑特性，在波峰波谷处存在多处明显的不规则凹陷，这便导致波形局部极值分布异常，为了保证信号包络线的柔性及光滑性，三次样条插值结果便不可避免地会产生失真，基于失真包络计算出的均值而筛选出的 IMF 分量也就丧失了其原有的物理意义^[15]。因此，在面对含有多种频率分量的复杂谐波问题时，缺乏严格理论推导的 EMD 方法往往难以胜任。

相较于传统的 EMD 方法，EWT 能够自适应地从原始信号频谱中获取先验知识，并对频带进行严格划分，具备处理复杂谐波信号的能力。观察图 5 可知，由 EWT 分解所得的 $c_1 \sim c_5$ 依次对应基波、2.2 次间谐波以及 3、5、7 次谐波分量，除端点外，每个 AM-FM 分量均呈现为光滑的正弦曲线，且频率单一，幅值稳定，能够有效克服 EMD 存在的模态混叠问题，同时也验证了 EWT 运用于电力谐波检测的可行性。

(1) 噪声鲁棒性分析

分别无噪声、信噪比为 30 dB、20 dB 噪声环境下，对本文方法的噪声鲁棒性进行分析。20 dB 信噪比下 EWT 分解结果如图 7 所示，表 1、表 2 分别为不同信噪比下稳态谐波的幅值和频率检测结果。

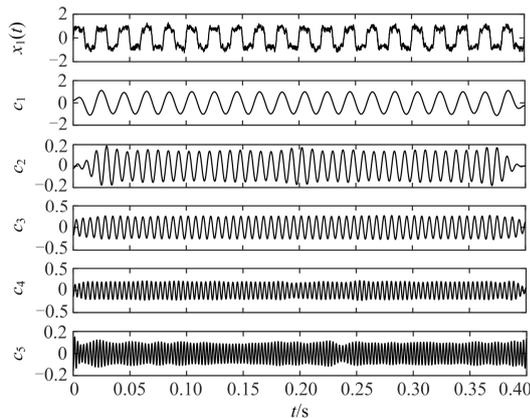


图 7 稳态谐波及其 EWT 分解结果(SNR=20 dB)

Fig. 7 Steady-state harmonic and results of EWT (SNR=20 dB)

表 1 稳态谐波幅值检测结果

Table 1 Amplitude detection results of steady-state harmonic

谐波次数	理论值	幅值/p.u.					
		无噪声		SNR=30 dB		SNR=20 dB	
		检测值	误差/%	检测值	误差/%	检测值	误差/%
基波	1.0	1.000 3	0.030	1.001 2	0.120	1.002 7	0.270
2.2	0.15	0.149 4	0.400	0.148 7	0.867	0.147 2	1.867
3	0.25	0.250 0	0	0.250 5	0.200	0.250 9	0.360
5	0.2	0.200 0	0	0.200 2	0.100	0.203 1	1.550
7	0.1	0.100 0	0	0.101 0	1.000	0.103 8	3.800

表 2 稳态谐波频率检测结果

Table 2 Frequencies detection results of steady-state harmonic

谐波次数	理论值	频率/Hz					
		无噪声		SNR=30 dB		SNR=20 dB	
		检测值	误差/%	检测值	误差/%	检测值	误差/%
基波	50	50.008 9	0.018	50.003 4	0.007	50.007 2	0.014
2.2	110	110.030 9	0.028	110.037 4	0.034	110.059 7	0.054
3	150	150.012 9	0.009	150.025 1	0.017	149.992 5	0.005
5	250	250.003 6	0.001	250.009 1	0.004	249.943 9	0.022
7	350	349.999 3	0	349.983 0	0.005	349.798 9	0.057

由图 7 可知，当信噪比低至 20 dB 时，EWT 仍然可以准确地从原信号中提取出各次谐波，且噪声含量极低，这是因为 EWT 本质上是一组具有正交性质的小波滤波器组，它在对信号频谱进行分割的同时也滤除了频谱区间以外的噪声分量。分析表 1 和表 2 中给出的检测结果可以发现，本文检测方法在无噪声情况下的幅值、频率检测性能良好，误差均低于 0.4%，频率检测精度总体优于幅值结果；引入噪声后，检测精度会随信噪比的降低总体呈下降趋势，但除 20 dB 信噪比时 7 次谐波幅值误差为 3.8% 外，其余幅值误差均低于 2%，频率误差均低于 0.06%，验证了本文所提频谱划分方法对噪声的抑制效果，同时也说明该检测方法具备较强的噪声鲁棒性。

(2) 检测实时性分析

在无噪环境下将本文方法与传统谐波检测方法进行实时性对比，测试结果如表 3 所示。

表 3 检测算法实时性对比

Table 3 Real-time comparison of detection algorithms

方法	加窗插值 FFT ^[16]	VMD ^[17]	EEMD ^[18]	本文方法
耗时/s	0.103 2	2.381 4	7.521 6	0.010 5

从表 3 可以看出：加窗插值 FFT 算法相对简单，因而耗时较短；VMD 算法由于对信号进行了多次迭代分解，以牺牲时间为代价获得了较为准确的检测效果；EEMD 算法为了克服 EMD 的模态混叠现象，引入白噪声并进行了多次迭代运算，因而耗时最长^[19]。相比上述算法，EWT 以小波变换为理论基础，无需对信号进行迭代筛分，在确保检测精度的同时，检测时延仅为传统 FFT 方法的十分之一，具有良好的实时检测能力。

3.2 短时谐波检测

参考文献[20]设置短时谐波信号 $x_2(t)$ 为

$$x_2(t) = \sin(\omega t) + 0.5 \sin(3\omega t_1) + 0.3 \sin(7\omega t_1) \quad (16)$$

式中： $0.12 \text{ s} \leq t_1 \leq 0.24 \text{ s}$ ； $\omega = 2\pi f$ ； $f = 50 \text{ Hz}$ 。在 30 dB 信噪比下对 $x_2(t)$ 进行检测，EWT 分解结果如图 8 所示。

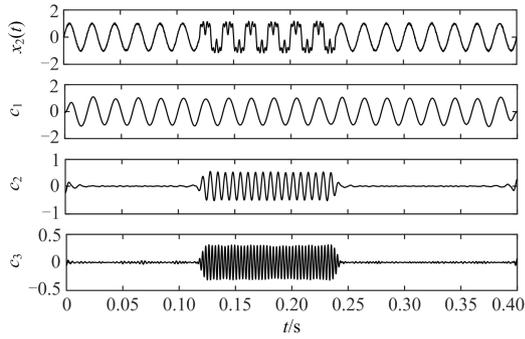


图 8 短时谐波及其 EWT 分解结果(SNR=30 dB)

Fig. 8 Short-time harmonic and results of EWT (SNR=30 dB)

由图8可知, 在30 dB信噪比下, EWT能够准确地将各次暂态谐波从原信号中分离, 且7次谐波分量几乎不受噪声干扰, 再次验证了延拓后的频谱边界对高频噪声具有良好的抑制效果。采用第2节中提出的定位方法, 对暂态谐波的起止时刻进行精确定位。去除部分端点后的7次谐波分量瞬时幅值曲线如图9(a)所示, 对该瞬时幅值曲线求取一阶导数, 并进行阈值光滑处理, 导数曲线以及扰动定位结果分别如图9(b)、图9(d)所示。同样对3次谐波分量进行扰动定位检测, 定位结果如图9(c)所示。由极值点坐标及其正负值属性可以准确判断, 3次谐波起始于0.12 s, 终止于0.24 s, 7次谐波定位误差也仅为0.3 ms。

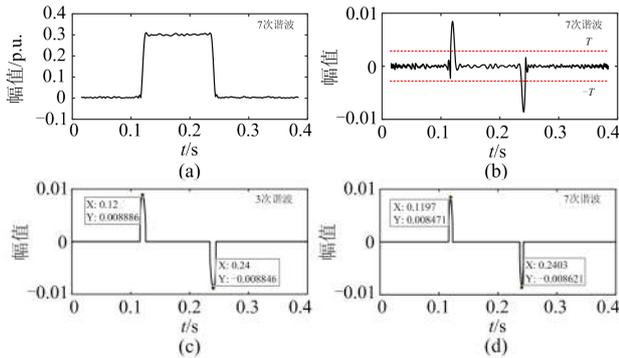


图 9 短时谐波定位结果

Fig. 9 Location results of short-time harmonic

进一步对本文定位算法的实时性进行分析, 多种常用定位算法的耗时测试结果如表 4 所示。较之于小波变换、S 变换、奇异值分解等常用定位方法, 由于本文方法直接在已有瞬时幅值曲线基础上求取扰动时刻, 无需计算更多参数, 因而耗时最短, 能够在保证定位精度的同时, 兼具良好的实时性。

表 4 定位算法实时性对比

方法	WT ^[21]	MIST ^[22]	SVD ^[23]	本文方法
耗时/s	0.043 2	0.115 8	0.161 2	0.002 3

在扰动发生时段内, 同样采用去除部分端点后取平均的方法对各次谐波进行检测, 检测结果如表 5 所示。从中可知, 在 30 dB 信噪比条件下, 幅值和频率检测结果平均误差仅为 0.282%和 0.045%, 证明本文方法对含噪短时谐波也具有良好检测效果。

表 5 短时谐波检测结果

指标	幅值/p.u.			频率/Hz		
	基波	3次	7次	基波	3次	7次
理论值	1.0	0.5	0.3	50	150	350
检测值	1.002 2	0.501 3	0.301 1	49.952 9	149.973 5	349.924 5
误差/%	0.220	0.260	0.367	0.094	0.018	0.022

3.3 时变谐波检测

参考文献[24]设置时变谐波信号 $x_3(t)$ 为

$$x_3(t) = \begin{cases} \sin(\omega t) & (0 < t \leq 0.12) \\ 2\sin(\omega t) + 1.6\sin(3\omega t) + 1.2\sin(7\omega t) & (0.12 < t \leq 0.24) \\ \sin(\omega t) + 0.8\sin(3\omega t) + 0.6\sin(7\omega t) & (0.24 < t \leq 0.4) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\omega = 2\pi f$; $f = 50$ Hz。由式(17)可知, 该信号中 3 次、7 次谐波均产生于 0.12 s, 并伴随基波于 0.12 s 发生骤升, 0.24 s 时恢复正常, 用以模拟实际电网中负荷波动对信号幅值的影响。向该谐波信号叠加 30 dB 高斯白噪声后的 EWT 分解结果如图 10 所示, 图中各分量波形均为近似光滑的无噪曲线, 凸显了 EWT 在噪声背景下对多频信号的分离能力。

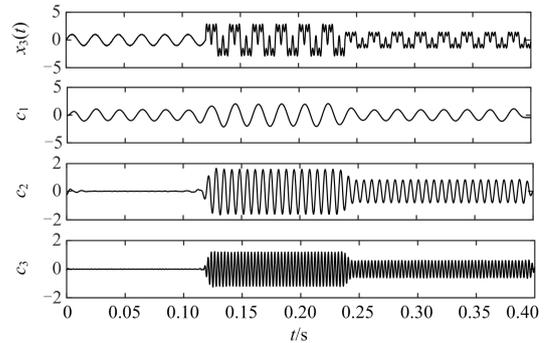


图 10 时变谐波及其 EWT 分解结果(SNR=30 dB)

Fig. 10 Time-varying harmonic and results of EWT (SNR=30 dB)

对提取出的 3 次、7 次谐波分量求取 Hilbert 幅值包络, 经阈值处理后的包络一阶导数曲线如图 11 所示。由图中极值点坐标可以精确定位 3 次、7 次谐波的产生和衰变时刻, 且误差均不超过 0.3 ms。

分别在 $t_1(0.12 \sim 0.24$ s)、 $t_2(0.24 \sim 0.4$ s)两个时段内对谐波参数进行检测, 检测结果如表 6 所示。由表 6 可知, 本文检测方法在不同时段内都能准确获

取时变谐波参数, 并且可以实现 30 dB 信噪比下的幅值检测误差低于 0.5%, 频率检测误差低于 0.2%, 满足电力系统谐波检测要求, 具有良好的检测精度以及抗噪性能。

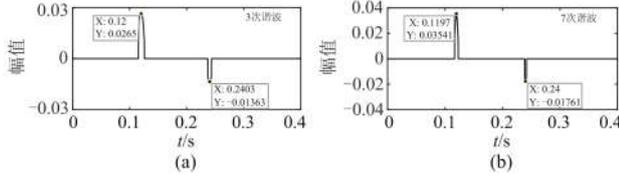


图 11 时变谐波定位结果

Fig. 11 Location results of time-varying harmonic

表 6 时变谐波检测结果

Table 6 Detection results of time-varying harmonic

时段	指标	幅值/p.u.			频率/Hz		
		基波	3次	7次	基波	3次	7次
t ₁	理论值	2.0	1.6	1.2	50	150	350
	检测值	1.996 3	1.599 0	1.199 9	50.049 8	149.981 4	350.017 8
	误差/%	0.185	0.063	0.008	0.100	0.012	0.005
t ₂	理论值	1.0	0.8	0.6	50	150	350
	检测值	0.995 6	0.800 3	0.602 9	50.077 9	150.010 7	349.966 0
	误差/%	0.44	0.038	0.483	0.156	0.007	0.010

4 结论

本文首次将经验小波变换应用于谐波检测中, 提出了一种基于经验小波变换和 Hilbert 变换的电力系统谐波检测方法, 经过理论分析与仿真验证得出以下结论:

(1) EWT 能够依据信号自身内容对其频谱进行自适应划分, 并从谐波信号中准确提取出各次稳态以及暂态谐波分量, 有效避免了传统时频分析方法中存在的频率混叠问题。

(2) 本文方法不仅具有较高的幅值和频率检测精度, 还能准确定位暂态谐波的起止时刻, 并且具备良好的实时检测性能。

(3) 调整后的频谱划分方法能够有效抑制噪声对高频谐波分量的干扰, 这使得本文方法拥有良好的噪声鲁棒性, 能够同时适用于噪声背景下的稳态以及暂态谐波检测。

此外, 从检测结果中可以看出, EWT 对幅值的检测精度稍逊于频率检测精度, 因而其时间分辨率仍有待提高, 同时, EWT 较为明显的端点效应也需要改善, 这些都是今后值得深入研究的课题。

参考文献

[1] REZA M S, AGELIDIS V G. A robust technique for single phase grid voltage fundamental and harmonic parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and

Measurement, 2015, 64(12): 3262-3273.

[2] 熊杰锋, 李群, 袁晓冬, 等. 电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 125-133.

XIONG Jiefeng, LI Qun, YUAN Xiaodong, et al. Detection methods of harmonics and inter-harmonics in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 125-133.

[3] 喻敏, 王斌, 王文波, 等. 基于同步挤压小波变换的电力系统时变谐波检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 50-57.

YU Min, WANG Bin, WANG Wenbo, et al. Power system time-varying transient harmonics detection based on SWT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 50-57.

[4] BARROS J, DIEGO R I, DE APRA 'IZ M. A discussion of new requirements for measurement of harmonic distortion in modern power supply systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2129-2139.

[5] 张煜林, 陈红卫. 基于 CEEMD-WPT 和 Prony 算法的谐波间谐波参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 115-121.

ZHANG Yulin, CHEN Hongwei. Parameter identification of harmonics and inter-harmonics based on CEEMD-WPT and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 115-121.

[6] CHANG G W, CHEN C I, TENG Y F. Radial-basis-function-based neural network for harmonic detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2171-2179.

[7] 陈陈, 李晓明, 杨玲君, 等. 变分模态分解在电力系统谐波检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 63-70.

CHEN Chen, LI Xiaoming, YANG Lingjun, et al. Application of variational mode decomposition in power system harmonic detection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 63-70.

[8] 黄纯, 朱智军, 曹一家, 等. 一种电网谐波与间谐波分析新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 32-39.

HUANG Chun, ZHU Zhijun, CAO Yijia, et al. A novel power system harmonic and interharmonic analysis method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 32-39.

[9] GILLES J. Empirical wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.

[10] 覃发兵, 徐振旺, 啜晓宇, 等. 基于经验小波变换的地震资料噪声压制方法[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(5): 100-110.

- QIN Fabing, XU Zhenwang, CHAI Xiaoyu, et al. A noise suppression method for seismic data based on empirical wavelet transform[J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(5): 100-110.
- [11] 祝文颖, 冯志鹏. 基于改进经验小波变换的行星齿轮箱故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2193-2201.
ZHU Wenyong, FENG Zhipeng. Fault diagnosis of planetary gearbox based on improved empirical wavelet transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(10): 2193-2201.
- [12] OMKAR S, RAMESH K S. Onset detection in arterial blood pressure pulses using empirical wavelet transform[C] // 2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), March 11-13, 2015, New Delhi, India: 1612-1615.
- [13] 黄传金, 曹文思, 陈铁军, 等. 局部均值分解在电力系统间谐波和谐波失真信号检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 68-73.
HUANG Chuanjin, CAO Wensi, CHEN Tiejun, et al. Application of local mean decomposition in power quality disturbance detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 68-73.
- [14] 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 Tianyun, CHENG Siyong, YANG Mei. Power system harmonic analysis based on Hilbert-Huang transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 109-113.
- [15] 胡爱军, 孙敬敬, 向玲. 经验模态分解中的模态混叠问题[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(4): 429-434.
HU Aijun, SUN Jingjing, XIANG Ling. Mode mixing in empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(4): 429-434.
- [16] 刘艳利. 电力系统谐波检测算法研究与实现[D]. 济南: 山东大学, 2012.
LIU Yanli. Research and implementation of harmonic detection algorithms in power system[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [17] 陈强伟, 蔡文皓, 孙磊, 等. 基于 VMD 的谐波检测方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(2): 59-65.
CHEN Qiangwei, CAI Wenhao, SUN Lei, et al. Harmonic detection method based on VMD[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(2): 59-65.
- [18] 朱宁辉, 白晓民, 董伟杰. 基于 EEMD 的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 92-98.
ZHU Ninghui, BAI Xiaomin, DONG Weijie. Harmonic detection method based on EEMD[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 92-98.
- [19] 张杨, 刘志刚. EEMD 在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(12): 86-91.
ZHANG Yang, LIU Zhigang. Application of EEMD in power quality disturbance detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(12): 86-91.
- [20] 黄建明, 李晓明. 结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 43-50.
HUANG Jianming, LI Xiaoming. Detection of harmonic in power system based on short-time Fourier transform and spectral kurtosis[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 43-50.
- [21] 周龙华, 付青, 余世杰, 等. 基于小波变换的谐波检测技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 80-85.
ZHOU Longhua, FU Qing, YU Shijie, et al. Harmonic detection based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(1): 80-85.
- [22] 肖助力, 龚仁喜, 陈双, 等. 基于改进 S 变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 84-90.
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang, et al. Detection of harmonics in power system based on modified S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 84-90.
- [23] 徐永海, 赵燕. 基于短时傅里叶变换的电能质量扰动识别与采用奇异值分解的扰动时间定位[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 174-180.
XU Yonghai, ZHAO Yan. Identification of power quality disturbance based on short-term Fourier transform and disturbance time orientation by singular value decomposition[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 174-180.
- [24] 李天云, 赵妍, 韩永强, 等. Hilbert-Huang 变换方法在谐波和电压闪变检测中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 73-77.
LI Tianyun, ZHAO Yan, HAN Yongqiang, et al. Application of Hilbert-Huang transform method in detection of harmonic and voltage flicker[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 73-77.

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-07-12

作者简介:

吴建章(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电能质量数据分析; E-mail: wjz080032@126.com

梅飞(1982—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新能源发电技术; E-mail: meifei@hhu.edu.cn

刘畅(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统数据挖掘分析。E-mail: freja86@163.com

(编辑 魏小丽)