

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.04.020

基于 Synchrosqueezing 小波变换的谐波和 间谐波检测方法^{*}

吴 纯¹ 王文波²

(1. 武汉商学院信息工程学院 武汉 430056; 2. 武汉科技大学信息与计算科学系 武汉 430065)

摘 要:非线性电力元件的广泛使用使电力系统的谐波和间谐波污染越来越严重。为准确计算谐波和间谐波的参数特征,以有效克服噪声影响,提出基于 Synchrosqueezing 小波变换的谐波和间谐波的一种检测方法。首先对电力系统信号进行连续小波变换;然后确定同步挤压阈值,对连续小波变换结果进行同步挤压,并利用同步挤压结果计算电力信号主频率;最后,设置提取频率区间,将电力信号分解为一组内蕴模态类函数分量(IMT),并结合 Hilbert 变换及最小二乘拟合,精确计算噪声背景下谐波和间谐波的幅值与频率。通过模拟信号和实测信号对所提方法有效性进行了分析,实验结果表明,与 Prony 和 HHT 方法相比,本文方法通过同步挤压有效抑制了噪声干扰,谐波和间谐波的检测精度有较好的提高。

关键词:同步挤压小波变换;Hilbert 变换;电力系统;谐波;间谐波

中图分类号: TN911.23;TM74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.10

Harmonic and inter-harmonic detection method based on synchrosqueezing wavelet transform in power system

Wu Chun¹ Wang Wenbo²

(1. Department of Information Engineering, Wuhan Business University, Wuhan 430056, China;
2. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract:The extensive application of non-linear power components makes the harmonic pollution situation of power system increasingly severe. To effectively suppress a variety of noise, and accurately detect harmonic and inter-harmonic parameters, a harmonic detection method based on the synchrosqueezing wavelet transform (SST) and Hilbert transform is proposed. Firstly, the signal in the power system is decomposed into a set of intrinsic mode type (IMT) function components through SST. Then, instantaneous frequency and instantaneous amplitude of each IMT component are calculated through Hilbert transform. At last, the least squares fitting of instantaneous amplitude and instantaneous frequency is calculated to realize the detection of harmonic and inter-harmonic from the noisy signal. The simulation results verify the feasibility and the effectiveness of the proposed method, which can effectively improve the detection accuracy of harmonic and inter-harmonic.

Keywords:synchrosqueezing wavelet transform;Hilbert transform;power system;harmonic detection;inter-harmonic detection

1 引 言

随着柔性交流输电和智能电网的推广,大量的非线性电力电子设备被投入使用,这些设备的使用增加了电网的灵活性和可靠性,但同时也导致了严重的谐波和间

谐波污染,产生电能质量问题^[1-2],补偿电网中的谐波分量可提高电网的电能质量。因此,如何准确检测电网中各次谐波和间谐波分量的参数,对维护电网稳定具有重要意义。

当前,电网谐波检测中的方法主要有傅里叶分析法^[3-4]、小波变换法^[5-6]、自回归谱估计法(auto regressive

spectrum estimation, AR)^[7-8]、Prony 分析法^[9-10]和希尔伯特-黄变化法(Hilbert-Huang transform, HHT)^[11-12]等。传统的傅里叶变换方法只能检测整数次谐波,对于电力信号中的非整数次间谐波则无法精确检测;加窗插值傅里叶变换可同时检测谐波和间谐波,但在改善频谱泄露和栅栏效应的同时,也降低了谐波频率的检测精度。小波变换法可同时检测谐波和间谐波,被广泛应用于谐波检测中,但小波变换法容易产生频率混叠现象,特别是谐波或间谐波频率比较接近时,分析误差较大。Prony 算法的主要不足是对噪声非常敏感,当信号中存在一定程度的噪声时,谐波检测精度会受到很大影响。AR 法可以精确的检测谐波和间谐波的频率,但幅值和相位的检测精度不够,需要在后继分析中进一步优化。当没有噪声干扰时,HHT 方法可同时检测谐波的频率、幅值和相位,但当信号中噪声强度较大时会产生严重的模态混沌现象,影响谐波检测精度,而且 HHT 采用迭代分解的方法,计算量较大。

以连续小波变换为基础的同步挤压小波变换(synchrosqueezing wavelet transform, SST)^[13]是一种非线性时频分析方法,在提高时频分辨率的同时,也支持信号重构。它通过在频率域方向挤压小波变换后的时频图,以获得较高频率精度且不存在交叉项的时频曲线,SST 能很好地将含有多个频率比较接近的谐波信号逐一提取出来。因此,SST 可以较好的改善频率混叠现象。SST 具有很好的抗噪性,实验结果表明,当噪声增强时,SST 的时频图和分解得到内蕴模态类函数(intrinsic mode type, IMT)基本保持不变^[14]。SST 可以克服 HHT 在模态混叠和噪声敏感等方面的不足,在对含噪声信号进行成分分析时,可以获得更为精确的分离结果^[14-15]。本文将 SST 引入到含噪电力系统的谐波分析中,首先使用 SST 依次抽取隐含在电力系统信号中的各谐波和间谐波;然后利用 Hilbert 变换分离出的谐波进行参数分析,结合最小二乘法实现谐波的准确检测。采用仿真信号和实测电弧炉信号对所提 SST 方法进行实验分析,实验结果表明,当电力系统信号中混有一定程度的噪声时,SST 方法仍可获得较好的谐波分离效果,谐波检测的准确度优于经典的 Prony 方法和 HHT 方法。

2 SST 理论方法

Daubechies 提出的 SST^[13]是一种以连续小波变换为基础的时频重组算法,其目的是对信号的时频表示进行锐化处理,使时频图中的瞬时频率曲线变得更细更清晰,从而提高信号的时频分析精度和信号中各分量的重构精度。假设 $f(t)$ 是一个多分量信号,则:

$$f(t) = \sum_{i=1}^N f_i(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $f_i(t) = A_i(t) \cos(2\pi\phi_i(t))$, $A_i(t)$ 和 $\phi_i(t)$ 分别表示时变信号的幅度和相位, $n(t)$ 表示噪声或测量误差,分量 $f_i(t)$ 的瞬时频率为 $\phi'_i(t)$ 。 $f(t)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

其中 $\psi(t)$ 表示母小波函数。信号 $f(t)$ 的瞬时频率 $\omega_f(a, b)$ 可通过下式进行计算:

$$\omega_f(a, b) = \begin{cases} \frac{1}{2i\pi W_f(a, b)} \frac{\partial [W_f(a, b)]}{\partial b}, & |W_f(a, b)| > 0 \\ \infty, & |W_f(a, b)| = 0 \end{cases} \quad (3)$$

由于小波系数在尺度 a 方向上的扩散性,因此非平稳时变信号通过连续小波变换得到的时频图中,各频率曲线会呈现出扩散现象,最终呈现带状。

同步挤压小波变换的目的是将连续小波变换系数 $W_f(a, b)$ 从“时间-尺度”空间转换到“时间-频率”空间,即 $(b, a) \rightarrow (b, \omega_f(a, b))$ 。假设 ω_l 为信号 $f(t)$ 第 l 个中心频率,同步挤压小波变换通过对区间 $[\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega]$ 上的小波系数进行挤压获得同步挤压变换值 $T_f(\omega_l, b)$:

$$T_f(\omega_l, b) = \int_{|a; \omega_f(a, b) \in [\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega]|} W_f(a, b) a^{-3/2} da \quad (4)$$

从式(4)可以看出, SST 将 $W_f(a, b) \neq 0$ 重分配到 (ω_l, b) 坐标系,并将 $\omega_f(a, b)$ 限制在 $[\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega]$ 中,即为了使各频率曲线细化而不呈带状,而使非平稳信号的时频表示更加清晰,需将各频率成分压缩在相邻两频率一半间距的范围内。

设 a_i 为连续小波变换尺度 a 的离散值, $\Delta a_i = a_i - a_{i-1}$, 则同步挤压小波变换的离散形式为:

$$T_f(\omega_l, b) = \sum_{a_i; \omega_f(a_i, b) \in [\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega]} W_f(a_i, b) a_i^{-3/2} (\Delta a)_i \quad (5)$$

在同步挤压小波变换系数 $T_f(\omega_l, b)$ 的实际计算中,将 a_i 的取值设定为 $a_i = 2^{\frac{i}{L}}$, $i = 1, 2, \dots, Ln_v$, 其中 L 是一个与数据长度有关的正整数,控制分解尺度的个数; n_v 是一个给定的参数,控制两相邻尺度的尺度间隔,通常取 $n_v = 32$ 。考虑到 $a_i = 2^{\frac{i}{L}}$, $da(i) = a[\log(2)/n_v] di$, 因此公式(5)中的积分项满足

$$W_f(a_i, b) a_i^{-3/2} (\Delta a)_i = W_f(a, b) a^{-1/2} (\log(2)/n_v) di$$

由于 $di = \Delta i = 1$, 因此同步挤压小波变换系数 $T_f(\omega_l, b)$ 的计算式(5)可被改写为:

$$T_f(\omega_l, b) = \sum_{a_i; \omega(a_i, b) \in [\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega]} W_f(a_i, b) a_i^{-1/2} \frac{\log(2)}{n_v} \quad (6)$$

式(6)中, 频率中心 ω_l 按以下公式取值:

$$\omega_l = 2^{l\Delta\omega} \left(\frac{1}{n\Delta t} \right), \quad l = 0, 1, 2, \dots, L_{n_v} - 1$$

式中: n 表示信号 $f(t)$ 的总采样点数, Δt 表示采样时间间隔, 频率间隔 $\Delta\omega = \frac{\log_2(n/2)}{Ln_v - 1}$ 。

对于含噪多分量信号 $f(t)$, 如果其分量信号 $f_i(t) = A_i(t) \cos(2\pi\phi_i(t))$ 是具有分离度 d 且精度为 ε 的内蕴模态函数类^[13], 则经同步挤压小波变换后, 在其时频图中可以非常清楚显示每个分量的瞬时频率曲线。在通过频率曲线的最优能量函数抽取出瞬时频率的中心曲线后^[15], 利用同步挤压小波逆变换可重构 $f(t)$ 中的任一分量 $f_k(t)$:

$$f_k(t) = \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_{\tau} T_f(\omega_l, b) (\Delta\omega) \right] \quad (7)$$

式中: $\text{Re}[\cdot]$ 表示取实部, $C_\psi = \frac{1}{2} \int_0^\infty \hat{\psi}(\xi) \frac{d\xi}{\xi}$, $\hat{\psi}(\xi)$ 表示小波函数 $\psi(x)$ 的傅里叶变换。

3 基于 SST 的谐波和间谐波检测

被噪声污染的电力系统谐波信号可表示为:

$$f(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cos(2\pi\omega_k t) + e(t)$$

式中: A_k 、 ω_k 分别表示谐波的幅值和频率, $e(t)$ 表示高斯白噪声。由 SST 的分解特性可知, 电力系统谐波信号满足其时频分析法的应用条件, 可以将 SST 应用到电力系统的谐波检测中。

3.1 谐波分离

基于 SST 的电力系统谐波信号提取主要分为如下 4 个步骤。

1) 对电力系统信号进行连续小波变换: 选择合适的母小波函数 $\psi(t)$, 计算电力系统信号 $f(t)$ 的连续小波变换 $W_f(a, b)$, 并通过式(3)计算瞬时频率 $\omega_f(a, b)$ 。

2) 划分频率区间: 假设电力系统信号 $f(t)$ 的长度 $n = 2^{L+1}$, 采样时间间隔为 Δt , 取 $n_v = 32$, 令 $n_a = Ln_v$, $\Delta\omega = \frac{1}{n_a - 1} \log_2 \left(\frac{n}{2} \right)$, $\omega_0 = \frac{1}{n\Delta t}$ 。规定 $\omega_l = 2^{l\Delta\omega} \omega_0$, $l = 0, 1, \dots, n_a - 1$, 将电力系统信号的频率范围划分频率区间为 $W_l = \left[\frac{\omega_{l-1} + \omega_l}{2}, \frac{\omega_l + \omega_{l+1}}{2} \right]$ 。

3) 对小波系数进行同步挤压: 根据式(6)计算电力系统信号在中心频率 ω_l 处的同步挤压小波变换

$$T_f(\omega_l, b) = \sum_{a_i; \omega(a_i, b) \in W_l} W_f(a_i, b) a_i^{-1/2} \frac{\log(2)}{n_v}。$$

4) 谐波和间谐波提取: 通过文献[15]中的方法, 计算电力系统信号中所含的主频率 $\omega_{q^*(k)}$ ($k = 1, 2, \dots, K$)。

设区间 $\chi_k(t) = \left[\frac{q^*(k) - n_v}{2}, \frac{q^*(k) + n_v}{2} \right]$, 则可求出电力系统信号中各分量信号 $f_k(t)$ 如下:

$$f_k(t) = \text{Re} \left[C_\psi^{-1} \sum_{l \in \chi_k(t)} T_f(\omega_l, b) (\Delta\omega) \right]。$$

3.2 谐波参数的计算

利用 SST 对电力系统中的谐波信号 $f(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cos(2\pi\omega_k t) + r(t)$ 进行谐波检测时, 由于不同的谐波分量和不同的内蕴模态类函数 (IMT) 相对应, 因此对谐波的检测过程可由对 IMT 分量检测的过程来完成。假设所提取的内蕴模态类函数模型为:

$$c(t) = A(t) e^{-\xi\omega_d t} \cos(2\pi\omega_d t) \quad (8)$$

式中: ω_0 为阻尼自振荡频率, ξ 为阻尼系数, ω_d 为振荡频率。对谐波分析而言, $\xi = 0$, $\omega_0 = 0$, 此时, IMT 函数模型可简化为:

$$c(t) = A_0 \cos(2\pi\omega_d t)$$

即只需检测出 A_0 和 ω_d 即可。为了计算以上 2 个参数, 对 $c(t)$ 进行 Hilbert 变换,

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

得到解析信号 $z(t) = c(t) + jy(t) = A(t) e^{j\theta(t)}$, 其中:

$$A(t) = \sqrt{c^2(t) + y^2(t)} \quad (8)$$

$$\theta(t) = \arctan[y(t)/c(t)] \quad (9)$$

则谐波信号的幅值 A_0 , 频率 ω_d 的计算公式为:

$$A_0 = A(t), \omega_d = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (10)$$

由于通过式(10)计算幅值 A_0 和频率 ω_d 时, A_0 和 ω_d 的值会有微小变化, 可通过最小二乘法拟合得到 A_0 和 ω_d 的最终取值。

3.3 基于 SST 的谐波检测步骤

1) 对电力系统信号进行 SST 变换, 得到一组平稳的单频内蕴模态函数类分量 IMT;

2) 对每一个内蕴模态函数类分量进行 Hilbert 变换, 利用式(8)~(10)得到每个模态分量的瞬时频率 $\omega_d(t)$ 和瞬时幅值 $A(t)$;

3) 对求出瞬时频 $\omega_d(t)$ 和瞬时幅值 $A(t)$ 进行最小二乘拟合, 计算各谐波分量的频率和幅值, 实现对谐波的检测。

基于 SST 的谐波检测流程如图 1 所示。

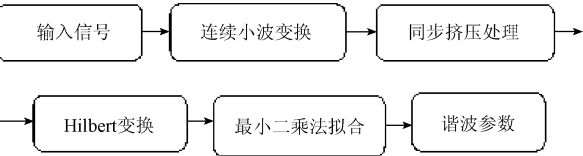


图1 SST谐波检测流程

Fig.1 Flow chart of SST harmonic detection

4 实验结果与分析

4.1 模拟信号谐波检测

设信号 $s(t) = \sin(100\pi t) + \sin(230\pi t) + \sin(480\pi t) + \sin(800\pi t)$, 采样频率为3 200 Hz, 实验中加入5%的随机噪声, 采样点数 $N = 4\,000$ 。含噪信号如图2(a)所示。将含噪信号进行SST分解, 得到的各个内蕴模态类函数分量如图2(b)~(e)所示。

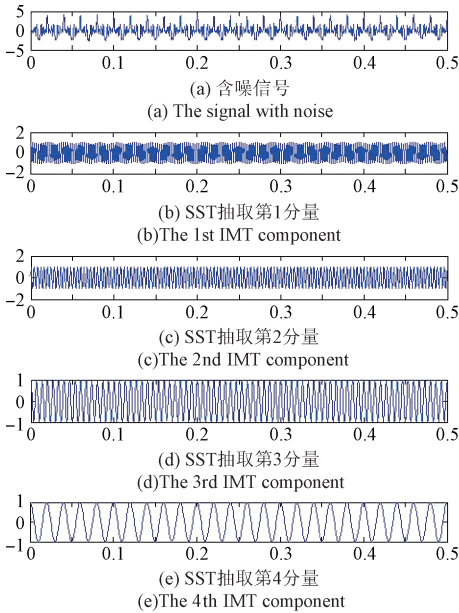


图2 含噪信号及其SST分解

Fig.2 The noisy signal and its SWT decomposition results

通过SST所提取的各模态类函数的幅值和频率拟合曲线如图3、4所示, 各模态类函数幅值和频率检测的详细结果如表1所示。为了比较, 在表1中同时列出Prony方法和HHT方法的检测结果。由表1可知, Prony方法谐波检测的幅值误差约为2.7%, 频率误差约为0.81%; HHT方法的幅值误差约为2.3%, 频率误差约为0.76; 而本文方法谐波检测时的幅值误差约为0.7%, 频率误差约为0.24%。

4.2 实测信号谐波检测

采用实测电弧炉电力系统信号进行实验分析, 实验

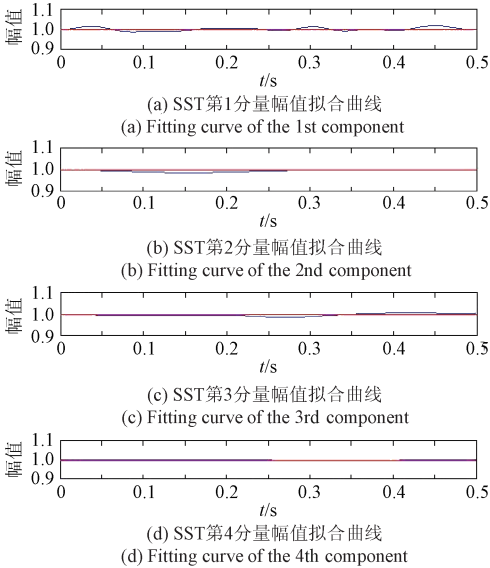


图3 幅值最小二乘拟合曲线

Fig.3 The least squares fitting curve of amplitude

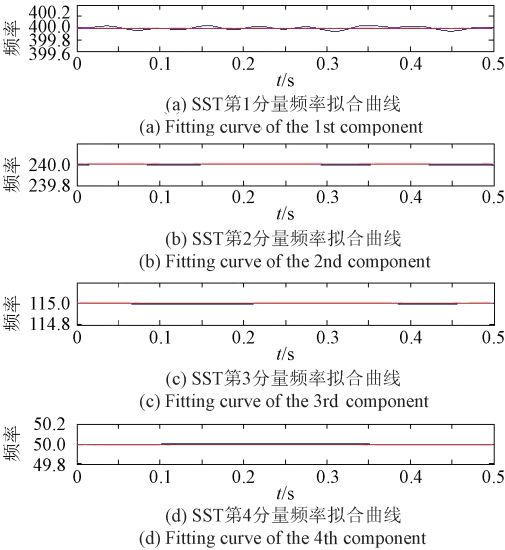


图4 频率最小二乘拟合曲线

Fig.4 The least squares fitting curve of frequency

表1 模拟信号幅值和频率检测结果
Table 1 The detection results of amplitude and frequency of simulating signal

		原始信号	Prony 法	HHT 法	本文方法
模式1	幅值	1	0.990	1.052	0.9965
	频率	50	49.15	49.23	49.82
模式2	幅值	1	1.010	1.025	0.9881
	频率	115	114.21	115.88	114.82
模式3	幅值	1	1.030	0.986	1.0057
	频率	240	241.24	239.03	240.45
模式4	幅值	1	1.052	1.017	0.9942
	频率	400	398.79	401.32	400.87

中加入 8% 的随机噪声,采样点数 $N = 4\,000$ 。含噪电弧炉电力系统信号及 SST 的分量抽取结果如图 5 所示(图 5 仅给出了 1 000 个采样点的波形)。SST 分解后各内蕴模态类函数分量的幅值最小二乘拟和曲线以及频率最小二乘拟和曲线如图 6、7 所示。

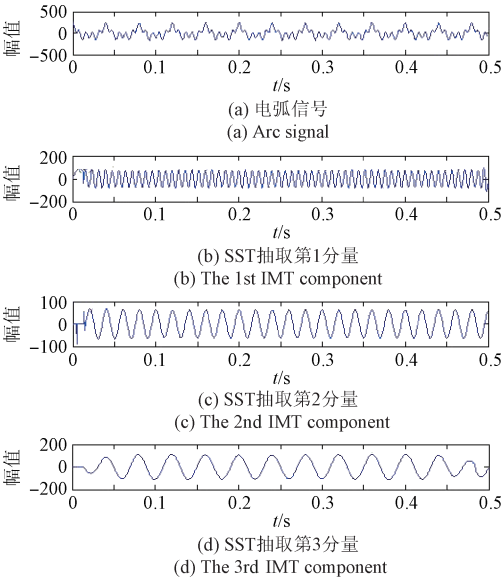


图 5 电弧信号及其 SST 分解

Fig. 5 Arc signal and its SWT decomposition results

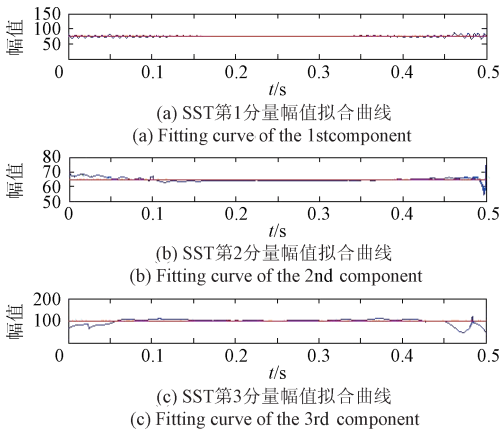


图 6 电弧信号幅值最小二乘拟合曲线

Fig. 6 Arc signal and the least squares fitting curve of amplitude

采用本文方法、Prony 方法和 HHT 方法检测到的谐波参数见表 2。由表 2 可求出 Prony 方法检测电弧炉信号谐波时,幅度误差约为 1.53%,频率误差约为 2.1%;HHT 方法检测电弧炉信号谐波时,幅度误差约为 1.31%,频率误差约为 1.75%;而 SST 方法检测电弧炉谐波信号时,幅度误差约为 0.36%,频率误差约为 0.41%。

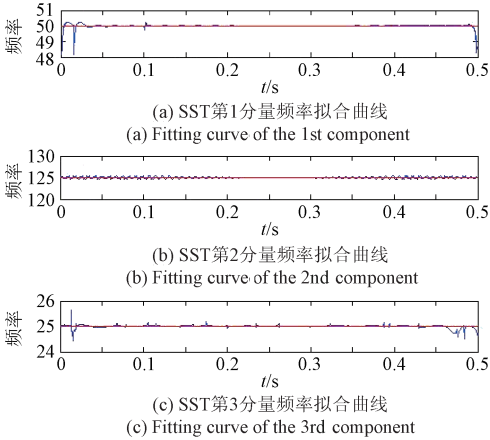


图 7 电弧信号频率最小二乘拟合曲线

Fig. 7 Arc signal and the least squares fitting curve of frequency

表 2 实测信号振幅和频率检测结果
Table 2 The detection results of amplitude and frequency of the measured signal

		原始信号	Prony 法	HHT 法	本文方法
模式 1	振幅	65	66.133	64.152	64.674
	频率	25	24.093	24.211	24.898
模式 2	振幅	100	98.848	99.024	99.505
	频率	50	49.112	49.307	50.331
模式 3	振幅	75	76.277	73.760	75.312
	频率	125	123.855	124.112	124.885

显然,当电力系统信号被噪声污染时,本文方法对谐波幅值、频率的检测精度较 Prony 方法和 HHT 方法都有较好的提高。当电力系统信号中噪声强度较大时,HHT 方法和 Prony 方法的谐波检测结果都存在较大的误差;而 SST 方法具有较强的抗噪能力,当电力系统信号中噪声强度较大时,仍能比较精确的检测出信号中谐波及间谐波的幅值与频率。

5 结 论

数字仿真和实例结果表明,本文提出的基于 SST 的谐波检测方法能准确检测出电力系统信号的谐波成分。基于 SST 的谐波检测方法可以很好的改善谐波信号的频率混叠现象,而且对信号中的加性白噪声有较好的抑制作用,当电力系统信号中含加性噪声时,本文方法仍可较好的工作。

当电力系统信号的信噪比较低时,由于对噪声相对敏感,Prony 和 HHT 方法的谐波检测精度会受到较大影响。与 Prony 和 HHT 方法相比,本文的方法通过同步挤压有效抑制了噪声干扰,在噪声背景下,本文方法的检测精度较 Prony 和 HHT 方法均有所提高,改善了噪声背景下谐波检测的精度。

参考文献

- [1] 熊杰峰, 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 J F, LI Q, YUAN X D, et al. Detection methods of harmonics and inter-harmonics in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 125-133.
- [2] 孟玲玲, 孙常栋, 王晓东. 基于特征值分解和快速独立分量分析的谐波/间谐波检测方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 61-66.
MENG L L, SUN CH D, WANG X D. A detection method for harmonic/inter-harmonic based on eigenvalue decomposition and fast independent component analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 61-66.
- [3] 张鸿博, 蔡晓峰, 鲁改凤. 基于双窗全相位 FFT 双谱线校正的电力谐波分析[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2835-2841.
ZHANG H B, CAI X F, LU G F. Double-spectrum-line correction method based on double-window all-phase FFT for power harmonic analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2835-2841.
- [4] NATH S, SINHA P, GOSWAMI S K. A wavelet based novel method for the detection of harmonic sources in power systems [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 40(1): 54-61.
- [5] JIN T, GU W J. Research of power system harmonic analysis based on wavelet theory [C]. Materials Research, 2012, 588: 626-631.
- [6] 薛凌云, 黄伟, 陈超. 基于空间谱估计技术的间谐波小波检测算法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 46-49.
XUE L Y, HUANG W, CHEN CH. Inter harmonic dection algorithm baded on spatial spectrum estimation and wavelet transform[J]. Electronic Masurement Technology, 2014, 37(10): 46-49.
- [7] 李明, 王晓茹. 一种用于电力系统间谐波谱估计的自回归模型算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 72-76.
LI M, WANG X R. An autoregressive model algorithm for the inter-harmonic spectral estimation in the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 72-76.
- [8] 李新, 程纯东, 张淮清. 基于实值 Root-MUSIC 和 Prony 算法的间谐波参数估计[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(11): 56-59.
LI X, CHENG CH D, ZHANG H Q. Interharmonic parameter estimation based on real-valued Root-MUSIC and Prony method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 56-59.
- [9] ZYGARLICKI J, MROCZKA J. Prony's method used for testing harmonics and interharmonics in electrical power systems[J]. Metrology and Measurement Systems, 2012, 19(4): 659-672.
- [10] 李正明, 徐敏, 潘天红, 等. 基于小波变换和 HHT 的分布式并网系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 34-39.
LI ZH M, XU M, PAN T H, et al. A harmonic detection method for distributed connected grid system by using wavelet transform and HHT [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 34-39.
- [11] SU Y X, LIU G P, LI L, et al. Ship power quality detection based on improved hilbert-huang transform[J]. Journal of Computers, 2012, 7(8): 1990-1997.
- [12] DAUBECHIES I, LU J F, WU H T. Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2011, 30(2): 243-261.
- [13] MEIGNEN S, OBERLIN T, MCLAUGHLIN S. A new algorithm for multicomponent signals analysis based on synchrosqueezing: With an application to signal sampling and denoising [J]. IEEE transactions on signal processing, 2012, 60(11): 5787-5798.
- [14] GAURAV T, EUGENE B, NEVEN S F, et al. The synchrosqueezing algorithm for time-varying spectral analysis: robustness properties and new paleoclimate applications [J]. Signal Processing, 2012, 93(5): 1079-1094.
- [15] DMYTRO I, ANETA S, PETER V E M. Nonlinear mode decomposition: a noise-robust, adaptive decomposition method[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2015, 92(3): 032916.

作者简介

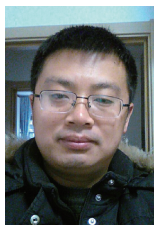


吴纯, 2000 年于武汉大学获得学士学位, 现为武汉商学院副教授, 主要研究方向为多尺度理论及其应用。

E-mail: 15726135@qq.com

Wu Chun received B. Sc. from Wuhan University in 2000. Now he is associate professor in Wuhan Business University. His

main research interest includes multi-scale theory and application.



王文波, 2000 年于武汉大学获得学士学位, 2003 年于武汉大学获得硕士学位, 2006 年于武汉大学获得博士学位, 现为武汉科技大学教授, 主要研究方向为小波分析及信号处理。

E-mail: 19404425@qq.com

Wang Wenbo received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. all from Wuhan University in 2000, 2003 and 2006, respectively. Now he is professor in Wuhan University of Science and Technology. His main research interest includes wavelet analysis theory and application in signal processing.