

基于改进 S 变换的电力系统谐波检测方法

肖助力, 龚仁喜, 陈双, 于槟华, 贾僖泉

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 快速而准确地检测出谐波是实现电力系统谐波治理的前提条件, 对提高电能质量具有重要的意义。提出了一种基于改进 S 变换的电力系统谐波检测方法。该方法在 S 变换的高斯窗函数中引入了三个参数 p 、 q 、 λ , 根据输入信号的不同设置合适的参数, 提取谐波成分、幅值、暂态发生的起止时间等特征信息。首先介绍了改进 S 变换的基本原理及特性; 其次详细阐述了改进 S 变换应用于电力系统谐波检测的方法; 最后分别对稳态、暂态及噪声环境下的谐波进行了仿真实验。仿真结果验证了该检测方法的有效性, 同时也表明: 该方法性能好、精度高, 在信噪比较低的情况下仍能达到满意的检测效果, 具有一定的抗噪声干扰能力。

关键词: 电力系统; 谐波检测; 改进 S 变换; 高斯窗; 稳态; 暂态

Detection of harmonics in power system based on modified S-transform

XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang, YU Binhua, JIA Xiquan

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Rapid and correct detection of harmonics is the premise of suppressing harmonics in power system, and is also of great significance to the improvement of power quality. A new detection method for the harmonics based on a modified S-transform (MST) is proposed, in which three parameters of p , q and λ are introduced into the Gaussian window function in conventional S-transform (ST). According to the differences of the input signal, suitable parameters of Gaussian window are selected to extract the characteristic quantities of harmonics such as harmonic order, amplitude, and the start and end time of transient state, etc. The fundamental principle and characteristics of the MST are firstly presented, and then the detection method of harmonics in power system based on MST is elaborated in detail. Finally, the steady harmonics, transient harmonics and the harmonics with noise are simulated respectively. The simulation results verify the efficiency of the proposed method, and show that it is also characterized by simple utilization, high accuracy, and good anti-interference performance. Furthermore, the method can be also used for the detection of the power harmonics under the condition of low signal noise ratio (SNR).

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60962008).

Key words: power system; harmonic detection; modified S-transform (MST); Gaussian window; steady-state; transient-state

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-0084-07

0 引言

近年来,随着间歇性新能源(如太阳能、风能等)的大量使用,非线性、冲击性、波动性负载的大量接入使电网中的谐波污染越来越严重,同时谐波组成也越来越复杂^[1-2]。谐波使电能生产效率和利用效率降低,用电设备使用寿命缩短,各级继电保护装置产生误动和拒动等,给电网的安全稳定运行带来严重危害^[3-4]。另外,信息科技的发展对电力系统供

电可靠性也提出了更高的要求,因此必须对这些谐波进行治理^[5]。快速而准确的谐波检测是实现谐波治理的前提条件,对电能质量的提高具有重要的意义^[6]。

目前,国内外专家学者对电网谐波检测问题进行了大量深入的研究,提出了多种检测方法。常用的有:基于瞬时无功率理论的检测方法^[7-8]、基于神经网络的检测方法^[9-10]、基于傅里叶变换的检测方法^[11]以及基于小波变换的检测方法^[12-14]等。这些方法对通常意义下的谐波检测具有较好的效果,但对复杂谐波(如动态谐波、间谐波等)信号的检测,

其应用受到一定限制^[15]。文献[16]提出了一种基于辐射基函数的神经网络谐波检测方法, 该方法可实现对含噪声的谐波和间谐波的检测, 但不能有效地实现对神经网络大小的动态调整。文献[17]提出了一种三相级联延迟信号锁相环的选择性谐波检测方法, 该方法能检测不同来源的单谐波, 在不同的条件下具有快速性和鲁棒性, 但没有考虑多种谐波并存的情况。文献[18]提出了一种基于零差算法与增强型锁相环算法的检测方法, 该方法利用零差算法计算量少、性能稳定的优点快速准确检测各次谐波分量, 但检测效果受到算法角频率初始值及调节因子取值的影响。

S 变换^[19] (S-transform, ST) 结合了短时傅里叶变换和小波变换的优点, 其模时频矩阵具有很好的时频分析和特征提取特性, 近年来成为信号分析的有力工具。但它并不适合直接用于谐波检测, 因为其高斯窗宽度等于频率的倒数, 在低频和高频段均不能很好的兼顾信号时频分辨率的要求。为了使 S 变换能有效地用来检测谐波, 须对其进行改进, 文献[20]和文献[21]在 S 变换的高斯窗中引入一个调节因子 λ , 分别实现了对电压骤降特征量的提取和电能质量的扰动分类, 但对该调节因子的选取缺乏理论依据。文献[22]和文献[23]也分别对 S 变换进行了不同的改进, 用于实现对电能质量扰动的识别分类, 但对参数的特性和范围没有给出明确的说明。

本文在研究 S 变换理论的基础上, 提出了一种改进的 S 变换(Modified S-transform, MST)方法, 该方法在 S 变换的高斯窗函数中引入三个参数 p 、 q 、 λ , 根据不同的谐波信号, 选择合适的参数, 实现对谐波成分、幅值、暂态发生的起止时间等特征信息的提取。同时, 该方法不仅适合于对一般谐波信号的分析 and 检测, 对复杂谐波信号也同样有效。论文首先论述了改进 S 变换方法的基本原理和特性, 然后详细阐述了该方法用于电力系统谐波检测的原理, 最后对不同情况下的谐波进行了仿真实验。仿真结果表明: 该检测方法简洁有效, 准确率高, 并且具有一定的抗噪声干扰能力。

1 改进 S 变换

1.1 S 变换

信号 $g(t)$ 的一维连续 S 变换可定义为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) w(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} \quad (2)$$

式中: $w(\tau - t, f)$ 为高斯窗函数; τ 为控制高斯窗在

时间轴位置的参数; f 为频率。

从式(1)和式(2)可以看出, 信号 $g(t)$ 可以由其 S 变换 $S(\tau, f)$ 很好地重构。其一维连续逆变换为

$$g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} S(\tau, f) d\tau \right] \exp(j2\pi ft) df \quad (3)$$

1.2 改进 S 变换

由式(1)可知, 信号经 S 变换后由时域变换为时频域, 所提取的信号特征与高斯窗函数具有非常密切的关系。因此可以通过改变高斯窗函数的形态, 实现对原始 S 变换进行改进。考虑到式(2)中的高斯窗函数是关于 f 的偶函数, 为了使改进后的 S 变换使用更灵活、方便, 可采用伸缩和平移变换的思想对 f 进行改造, 基于此, 我们在其窗函数中引入 3 个参数 q 、 p 、 λ , 通过对其进行优化选择, 可使 S 变换在时频域上具有更优的分辨能力。改进后的高斯窗函数可表示为

$$w(\tau - t, f) = \frac{p + q|f|^\lambda}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(\tau-t)^2(p+q|f|^\lambda)^2} \quad (4)$$

式中: p 、 q 为非负数; λ 的取值范围为 $[0, 1]$ 。

信号的改进 S 变换(MST)是一种复数变换, 其结果可表示为

$$MST(\tau, f) = A(\tau, f) e^{j\phi(\tau, f)} \quad (5)$$

式中: $A(\tau, f)$ 为 MST 的幅值矩阵; $\phi(\tau, f)$ 为 MST 的相位矩阵。

根据测不准原理, 时、频分辨率不能同时提高, 必须根据实际信号进行折中, 但 MST 并不会增加运算量。因此, 可通过对参数 p 、 q 、 λ 进行优化选择, 使 S 变换获取高精度的时频分辨率, 从而实现对不同谐波信号的高精度检测。

1.3 改进 S 变换离散化

改进 S 变换的离散表达式为

$$S(j, n) = \sum_{k=0}^{N-1} g(k) w\left((j-k)T, \frac{n}{NT}\right) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (6)$$

式中: N 为总采样数; T 为采样间隔; $g[k]$ ($k=0, 1, \dots, N-1$) 为 $g(t)$ 的离散时间序列; $j=0, 1, \dots, N-1$ 为时间采样点; $n=0, 1, \dots, N/2$ 为频率采样点;

$w\left((j-k)T, \frac{n}{NT}\right)$ 为改进高斯窗的离散形式, 表示为

$$w\left((j-k)T, \frac{n}{NT}\right) = \frac{p + q\left|\frac{n}{NT}\right|^\lambda}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}((j-k)T)^2 \left(p + q\left|\frac{n}{NT}\right|^\lambda\right)^2} \quad (7)$$

离散信号 $g[kT]$ 的改进 S 变换结果是一个复时频矩阵, 行对应频率采样点, 列对应时间采样点。对矩阵各个元素求模后得到的矩阵记为改进 S 模矩阵, 其列向量为某一时刻随频率变化的分布, 行向

量为某一频率随时间变化的分布。因此，改进 S 模矩阵某位置上元素的大小即为相应频率和时间处信号改进 S 变换的幅值。

2 MST 窗函数参数特性分析

S 变换反映了信号 $g(t)$ 在时刻 τ 、频率 f 时信号成分的相对含量，在窗函数上的展开可表示为在 $[\tau-\eta, \tau+\eta]$ 、 $[f-\delta, f+\delta]$ 这一区域内的状态， η 和 δ 分别对应时宽和频宽，窗宽越小则频域分辨率越高。Heisenberg 测不准原理指出 η 和 δ 是互相制约的，而 η 和 δ 可通过 MST 窗函数参数的选取来确定。因此，在利用 MST 进行谐波检测时，须先对其参数特性进行分析。

1) 当 $q=0$ 、 p 为常数时，则高斯窗大小固定，与 λ 和 f 无关，为短时傅里叶变换(STFT) 的窗函数。窗口大小随 p 变化的特性如图 1 所示。由图 1 可知，STFT 的时窗宽度与 p 成反比关系， p 越小，时窗越宽，频域分辨能力越强，适合于间谐波的检测。

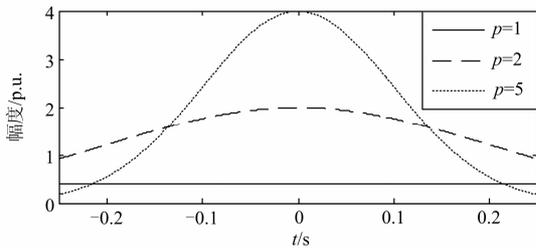


图 1 $q=0$ ，高斯窗随 p 的变化
Fig. 1 $q=0$, Gaussian window for different p

2) 当 $p=0$ 、 $q=\lambda=1$ 时，则时-频窗口大小与频率 f 有关，窗函数特点是低频时采用大时窗、小频窗，高频时采用小时窗、大频窗，为 S 变换窗函数。窗口大小随 f 变化的特性如图 2 所示，由图可知，S 变换的时窗宽度与 f 呈反比， f 越大，时域分辨能力越强，适合于幅值较大的谐波检测。

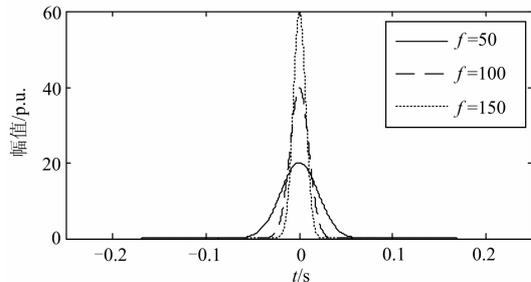


图 2 $p=0$ 、 $q=\lambda=1$ ，高斯窗随 f 的变化
Fig. 2 $p=0$ 、 $q=\lambda=1$, Gaussian window for different f

3) 当 p 、 q 和 λ 为常数时，则时-频窗口大小与 p 、 q 、 λ 有关，通过调整参数 p 、 q 和 λ ，可获取合

适的高斯窗时频分辨率。当 $f=50$ Hz 时，其窗口大小随 p 、 q 、 λ 变化的特性分别如图 3~图 5 所示。由图可知，窗口的宽度与 p 、 q 、 λ 均呈反比关系，其值越大，宽度越小，时域分辨能力越强。另外，窗口变化的大小与 p 、 q 、 λ 变化的大小不一样，以图中 $p=5$ 、 $q=0.5$ 、 $\lambda=0.5$ 的曲线为标准，当窗口发生相同的变化时， p 的变化为 5， q 的变化为 0.5，而 λ 的变化为 0.1，这种变化在高频时将更加明显(如图 2 所示)。因此，在通过调整参数来获取合适的时频分辨率时，可将 p 当成微调参数， q 当成适调参数， λ 当成粗调参数。

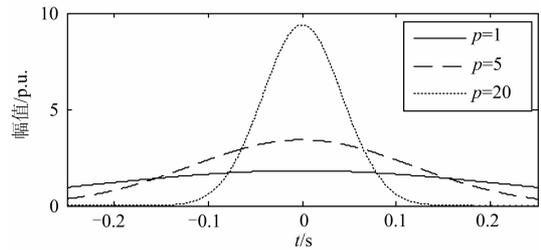


图 3 $q=\lambda=0.5$ 、 $f=50$ ，高斯窗随 p 的变化
Fig. 3 $q=\lambda=0.5$, $f=50$, Gaussian window for different p

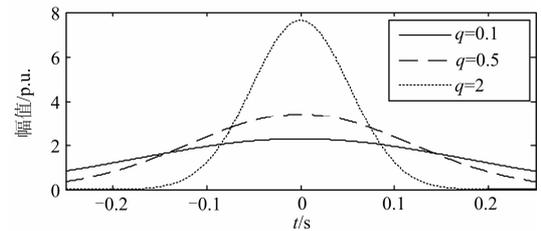


图 4 $p=5$ ， $\lambda=0.5$ 、 $f=50$ ，高斯窗随 q 的变化
Fig. 4 $p=5$, $\lambda=0.5$, $f=50$, Gaussian window for different q

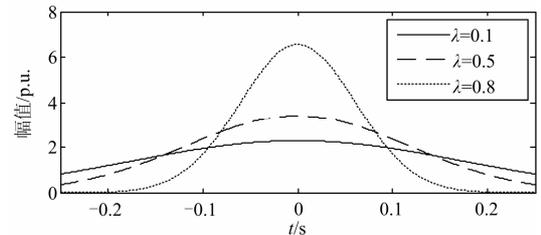


图 5 $p=5$ 、 $q=0.5$ 、 $f=50$ ，高斯窗随 λ 的变化
Fig. 5 $p=5$, $q=0.5$, $f=50$, Gaussian window for different λ

3 基于 MST 的电力系统谐波检测

目前，电力系统的谐波源主要包括各种电力电子整流换流装置，含有铁芯设备的各磁饱和装置，电弧焊、电弧炉等强冲击性的、非线性的负载等。这些谐波源产生的谐波特点主要有：谐波次数是基波频率 50 Hz 的整数倍，幅度比基波幅值小，相位

不确定, 并且可能包含晶闸管突发电流脉冲产生的瞬态谐波等。因此, 利用 MST 对电力系统的谐波进行检测时需考虑的特征量主要有谐波次数、谐波幅度、瞬态谐波的起止时刻和持续时间等。

1) 谐波次数检测

对谐波信号进行 MST 后, 得到含有谐波特征分量的复值矩阵 $MST(\tau, f)$, 利用其幅值矩阵 $A(\tau, f)$ 中每个采样点 n/NT 的最大幅值所组成的向量可得到信号随频率变化的最大频谱幅值曲线 $A(n/NT, f)$, 通过观察该幅值曲线上的峰值点个数确认谐波的种次, 其峰值点对应的频率即为谐波的频率。

2) 谐波幅值检测

谐波幅度 a 可由基波电压 u_0 , 最大频谱幅值曲线 $A(n/NT, f)$ 上基波 f_0 对应的幅值 $A(n/NT, f_0)$ 和谐波 f_k 对应的幅值 $A(n/NT, f_k)$ 计算得到。

$$a = \frac{A(\frac{n}{NT}, f_k)}{A(\frac{n}{NT}, f_0)} \times u_0 \quad (8)$$

3) 瞬态谐波起止时间检测

利用 MST 幅值矩阵 $A(\tau, f)$ 中谐波频率点 f_k 对应的列向量可得到谐波信号随时间变化的幅值曲线 $A(t, f_k)$, 而谐波发生的起止时刻将对应着曲线 $A(t, f_k)$ 的突变时刻。因此, 通过观察曲线 $A(t, f_k)$ 幅度的变化即可确定谐波发生的起止时刻, 并计算出该瞬态谐波的持续时间。

4 仿真实验与结果分析

本文利用 Matlab 对谐波信号进行仿真, 分别从稳态谐波、瞬态谐波以及含不同信噪比的谐波几种情况来验证 MST 对电力系统谐波检测的有效性。仿真时采样频率为 2.5 kHz, 信号基波频率为 50 Hz。通过第 2 部分的参数特性讨论以及大量的仿真实验, 稳态谐波的检测参数选取分别为 $p=5$ 、 $q=0.25$ 、 $\lambda=0.8$, 可以满足检测稳态时所需要较高的频域分辨率; 瞬态谐波的检测参数选取分别为 $p=10$ 、 $q=1$ 、 $\lambda=0.75$, 可以满足检测瞬态时所需要较高的时域分辨率。

4.1 稳态谐波信号分析

给定一电压信号

$$g(t) = 220\sqrt{2} \sin(\omega_0 t) + 80\sqrt{2} \sin(3\omega_0 t) + 50\sqrt{2} \sin(5\omega_0 t) + 25\sqrt{2} \sin(7\omega_0 t) + 15\sqrt{2} \sin(11\omega_0 t)$$

其波形如图 6(a)所示, 该信号由基波及 3、5、7、11 次谐波线性组合而成。首先对该信号进行改进 S 变换, 获得复值矩阵 $MST(\tau, f)$, 然后对该复值矩阵取模, 获得其幅值矩阵 $A(\tau, f)$, 画出其最大幅

度随频率变化的曲线如图 6(b)所示, 由图中的峰值坐标点可知, 该信号包含有基波和 3、5、7、11 次谐波, 其对应的峰值分别为 311.1 V、113.1 V、70.71 V、35.36 V 和 21.21 V, 如表 1 所示, 其准确率为 100%。取基波频率点的幅度随时间变化的曲线如图 6(c)所示, 从图中可以看出其幅值不随时间变化, 表明该信号为稳态信号。另外由 $A(\tau, f)$ 得到信号 MST 后的幅度-时间-频率曲线如图 6(d)所示, 从图中可以明显看出信号的谐波含量。以上结果表明 MST 方法对于稳态谐波的检测精度高, 效果好。

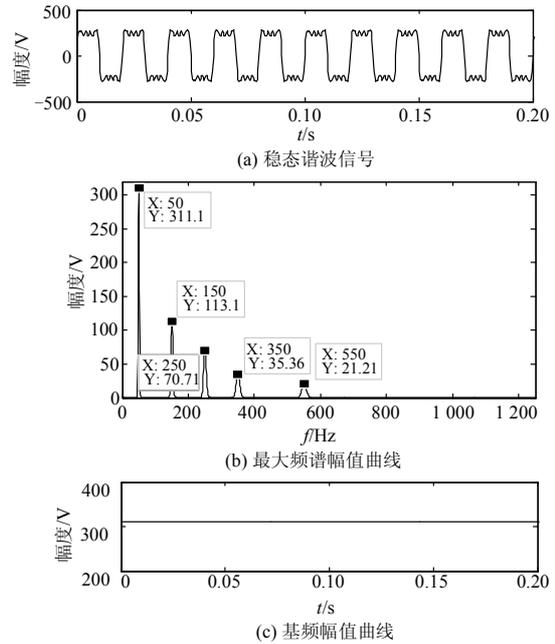


图 6 稳态谐波 MST 检测结果

Fig. 6 Detection results of MST on steady-state harmonics

表 1 稳态谐波检测结果

Table 1 Detection results of steady-state harmonics

指标	基波与各次谐波幅值/V				
	基波	3 次	5 次	7 次	11 次
理论值	311.1	113.1	70.71	35.36	21.21
检测值	311.1	113.1	70.71	35.36	21.21

4.2 暂态谐波信号分析

当信号中存在暂态谐波时，我们不仅要知道谐波的频率和幅度，还需知道其发生的起止时间，这样有助于采取快速有效的保护措施，避免对电力系统设备产生严重的危害。给定一电压信号：

$$g(t) = 220\sqrt{2} \sin(\omega_0 t) + 40\sqrt{2} \sin(5\omega_0 t), (0.4 \leq t_1 \leq 0.6)$$

其波形如图 7(a)所示。首先对该信号进行改进 S 变换，获得其幅值矩阵 $A(\tau, f)$ ，取 $A(\tau, f)$ 每时刻的最大幅值，并画出其幅值随频率变化的曲线如图 7(b)所示，从图中可以清晰地看出曲线有两个峰值点，并且峰值点对应的频率为 50 Hz 和 250 Hz。因此，该信号包含有基波和 5 次谐波，且其幅值分别为 311.1 V、56.79 V。分别取基波频率点和 5 次谐波频率点的幅值随时间变化的曲线如图 7(c)所示，可以看出，5 次谐波属于暂态谐波，其起止时刻对应基波幅值变化的两峰值点，这从图 7(d)中的幅度-时间-频率-曲线中也可以反映出来。对该信号的检测结果如表 2 所示，谐波幅值的检测误差控制在 1% 以内，远小于国家标准《电能质量公用电网谐波》中对电力系统谐波检测装置所允许的 5%，表明了 MST 方法对于暂态谐波检测的有效性和准确性。

表 2 暂态谐波检测结果

Table 2 Detection results of transient harmonics

指标	基波与谐波幅值/V		发生时间/s		
	基波	5 次	起始时刻	结束时刻	持续时间
理论值	311.1	56.56	0.4	0.6	0.2
检测值	311.1	56.79	0.401 2	0.600 8	0.200 4
误差	0	0.23	0.001 2	0.000 8	0.000 4

4.3 噪声影响分析

向式(8)中的稳态信号中分别加入信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR)为 20 dB、30 dB、40 dB 的高斯白噪声，用 MST 方法分别对其进行检测，限于篇幅，本文仅给出了 SNR 为 20 dB 的检测波形，如图 8 所示。通过与图 6 比较可见，MST 谐波检测方法在噪声环境中得到的检测波形与非噪声环境下相似，表明该方法对高斯白噪声具有一定的抑制作用。对谐波幅值的检测结果如表 3 所示，可以看出，SNR 越大(噪声越小)，检测的误差越小。随着信号中的噪声增加，幅值的检测误差略有增加，但受噪声的影响并不显著，保证了较高的检测准确率。

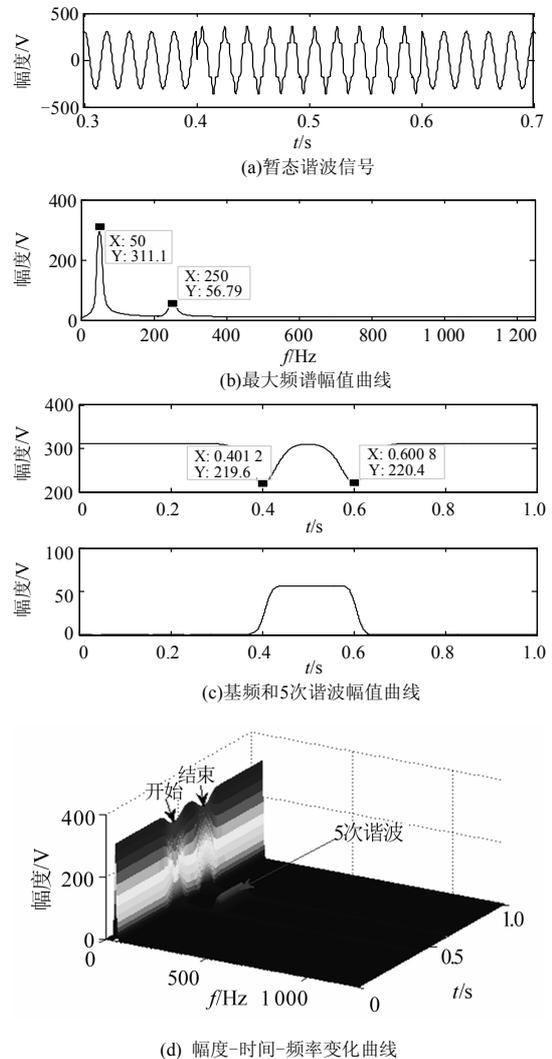


图 7 暂态谐波 MST 检测结果

Fig. 7 Detection results of MST on transient harmonics

表 3 含噪声的谐波检测结果

Table 3 Detection results of harmonics with noise

指标	基波与各次谐波幅值/V				
	基波	3 次	5 次	7 次	11 次
理论值	311.1	113.1	70.71	35.36	21.21
SNR=20 dB					
检测值	311.7	114.8	71.91	38.81	25.83
误差	0.6	1.7	1.2	3.45	4.62
SNR=30 dB					
检测值	311.8	114.2	71.95	36.96	23.08
误差	0.7	1.1	1.24	1.6	1.87
SNR=40 dB					
检测值	311.2	113.4	70.88	35.68	21.92
误差	0.1	0.3	0.17	0.32	0.71

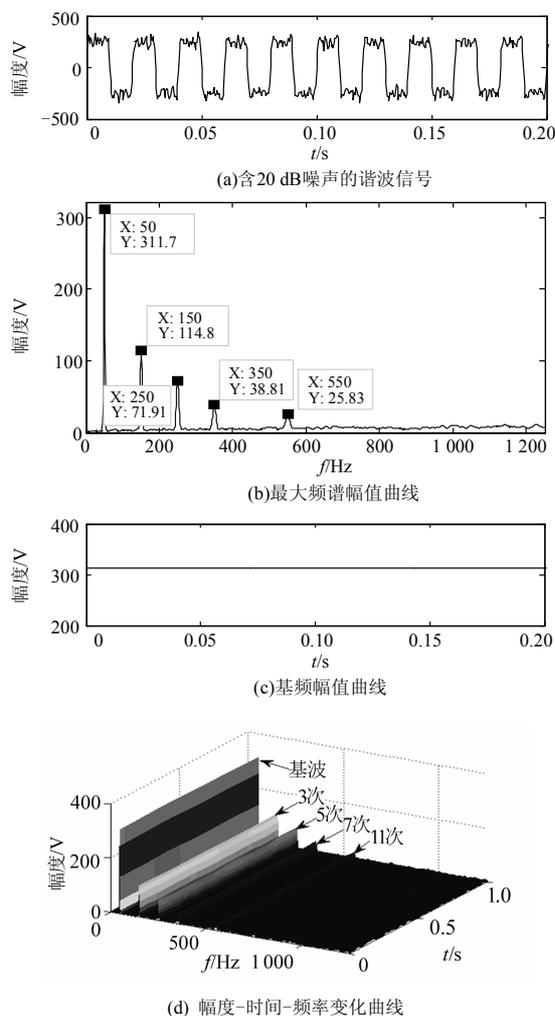


图 8 含噪声的谐波 MST 检测结果

Fig. 8 Detection results of MST on harmonics with noise

5 结论

本文提出了一种基于改进 S 变换的电力系统谐波检测方法, 通过理论分析和实例验证, 可以得出如下结论:

1) 在高斯窗函数中引入三个参数, 提高 S 变换的时频分辨率, 实现了对电力系统谐波的检测, 但检测性能的优劣取决于参数的选取。

2) MST 检测方法具有简洁有效, 性能稳定的优点, 不仅适用于稳态谐波的检测, 对暂态谐波也同样具有非常好的检测效果, 并且对噪声干扰具有一定的抑制能力。

3) MST 方法可以有效地提取信号中的基波分量和各次谐波分量, 并且能够快速检测出暂态谐波信号发生的起始时间和结束时间, 精度高。同时该方法还可应用于间谐波、次谐波和电压闪变等其他

动态信号的检测分析。

在保证检测精度和抗干扰能力的前提下, 如何进一步提高检测的实时性, 并寻求改进 S 变换参数的自适应选择是值得深入研究的课题。

参考文献

- [1] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-60.
ZHAN Yong, CHENG Haozhong, DING Yifeng, et al. S-transform-based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 51-60.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] VENKATESH C, SIVA SARMA D V S S, SYDULU M. Detection of voltage sag/swell and harmonics using discrete S-transform[C] // TENCON 2008-2008 IEEE Region 10 Conference, Hyderabad, India, 2008.
- [6] 付娟, 周汉勇, 姜勤. 基于 S 变换的暂态电能质量扰动检测与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 86-89.
FU Juan, ZHOU Hanyong, JIANG Qin. Power quality detection and simulation using S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 86-89.
- [7] 何英杰, 刘进军, 王兆安, 等. 一种基于瞬时无功功率理论的数字谐波检测[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 185-192.
HE Yingjie, LIU Jinjun, WANG Zhaoan, et al. A digital method for detecting harmonic currents based on instantaneous reactive power theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 185-192.
- [8] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous

- reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984, 20(3): 625-630.
- [9] 汤胜清, 程小华. 一种基于多层前向神经网络的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 90-94.
TANG Shengqing, CHENG Xiaohua. A harmonic measuring approach based on multilayered feed forward neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 90-94.
- [10] LAI L L, TSE C T, CHAN W L, et al. Real-time frequency and harmonic evaluation using artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 52-59.
- [11] 高云鹏, 滕召胜, 温和, 等. 凯塞窗插值 FFT 的电力谐波分析与应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 43-48.
GAO Yunpeng, TENG Zhaosheng, WEN He, et al. Harmonic analysis based on kaiser window interpolation FFT and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 43-48.
- [12] 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.
- [13] 杜天军, 陈光禹, 雷勇. 基于混叠补偿小波变换的电力系统谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 43-48.
DU Tianjun, CHEN Guangyu, LEI Yong. A novel method for power system harmonic detection based on wavelet transform with aliasing compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 43-48.
- [14] 曾瑞江, 杨震斌, 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 Ruijiang, YANG Zhenbin, LIU Huichao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.
- [15] GHARTEMANI K M, IRAVANI M. Measurement of harmonics/inter-harmonics of time-varying frequency[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 23-31.
- [16] 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.
- [17] WANG Yifei, LI Yunwei. Three-phase cascaded delayed signal cancellation PLL for fast selective harmonic detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1452-1463.
- [18] 刘亚栋, 杨洪耕, 陈丽, 等. 非稳态谐波和间谐波检测的新方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 170-175.
LIU Yadong, YANG Honggeng, CHEN Li, et al. A new method to detect non-stationary harmonics and inter-harmonics[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 170-175.
- [19] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 998-1001.
- [20] 唐求, 滕召胜, 郭斯羽. 基于广义 S 变换的电压骤降特征量检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(2): 113-119.
TANG Qiu, TENG Zhaosheng, GUO Siyu. Research on detection method for voltage sag characteristics based on generalized S-transform[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(2): 113-119.
- [21] 徐方维, 杨洪耕, 叶茂清, 等. 基于改进 S 变换的电能质量扰动分类[J]. 中国电机工程学报, 2013, 32(4): 77-84.
XU Fangwei, YANG Honggeng, YE Maoqing, et al. Classification for power quality short duration disturbances based on generalized S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 77-84.
- [22] 沈跃, 刘国海, 刘慧. 基于改进 S 变换和贝叶斯相关向量机的电能质量扰动识别[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 587-591.
SHEN Yue, LIU Guohai, LIU Hui. Classification identification of power quality disturbances based on modified S-transform and Bayes relevance vector machine[J]. Control and Decision, 2011, 26(4): 587-591.
- [23] BISWALA M, DASH P K. Detection and characterization of multiple power quality disturbances with a fast S-transform and decision tree based classifier[J]. Digital Signal Processing, 2013, 23: 1071-1083.

收稿日期: 2014-04-22

作者简介:

肖助力(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置; E-mail: x282718048@yeah.net

龚仁喜(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事新型半导体器件、新能源、电力电子技术研究。E-mail: rxgong@gxu.edu.cn