

基于 S 变换的间谐波检测算法研究与仿真分析

林 林

(江苏省电力公司南通供电公司 南通 226006)

摘要: 间谐波是反映电能质量的一个重要参数,其测量算法有多种。研究了一种基于改进 S 变换的间谐波检测方法,它是一种短时傅里叶(STFT)和连续小波(CWT)变换相结合的时频分析法。与 STFT 相比,S 变换的窗口高度、宽度都可随频率调整;与 CWT 相比,实现了相位的修正,提高了间谐波的测量精度。本文在 MATLAB 平台上对稳态信号、非稳态信号以及不同信噪比时的信号进行了仿真分析,给出了间谐波的频率和幅值测量精度。

关键词: 间谐波;S 变换;MATLAB

中图分类号: TM71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Algorithm research of the inter-harmonics detection and simulation analysis based on S transform

Lin Lin

(Nantong Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Nantong 226006, China)

Abstract: Interharmonics are an important parameter of reflecting the power quality, and there are many measuring algorithms. This paper puts forward a detection method of inter-harmonics based on the S transform, it is a time-frequency analysis method combined STFT with CWT. Compared with STFT, the window height and width of S transform can be adjusted with frequency. Compared with CWT, phase correction is achieved and the measurement accuracy of Interharmonics is improved. The steady state signal, non steady state signal and different signal to noise ratio (SNR) signal are simulated and analyzed on the MATLAB platform. The frequency and amplitude measurement accuracy of Interharmonics is given in this paper.

Keywords: inter-harmonics; S transform; MATLAB

0 引 言

最近几年,间谐波^[1-3]问题已引起人们的关注,间谐波检测估计的方法也在逐步改善,电子器件变得多元化和复杂化之后,更需要快速地进行实时性检测以及对非稳态信号的在线监控测量和锁定跟踪。新的对非稳态信号间谐波的测量以及多种方法相结合的检测方法^[4-6]应运而生,取代过去只检测稳态信号、单个的精度不高的检测方法。间谐波自身非线性、随机性、分布性和非平稳性等特性,导致了它的检测难度比对谐波的检测要高得多。对间谐波参数的估算和测量,就是为了测出间谐波的频率、幅值和相位。

1996年,Stockwell等学者提出了S变换^[7](S transform),它是在短时傅里叶变换(STFT)和连续小波(CWT)变换的基础上发展起来的一种时频分析方法。目前,S变换^[8-10]在电能质量中的应用研究还处于起步阶段,

主要集中在扰动检测^[11-15]方面。S变换有两个特点:1)S变换是CWT的进一步发展,是对CWT的相位的修改纠正;2)S变换的Gauss窗的窗高和窗宽都可以随着频率改变而改变,改善了短时傅里叶变换窗高和窗宽限定不变的缺点。另外,S变换和小波变换一样具有良好的时-频域局部化特性,而其变换核却不必满足容许性条件等。S变换的结果与Fourier谱保持直接的联系。因此,借助FFT可以实现S变换的快速计算。S变换具有局部性、线性性质、时移性、无损可逆性、较好的时频分辨率、多分辨率等优良特性,使得信号从时域与频域之间的变换没有信息损失,其分辨率是随着频率的高低而自动调节。

本文提出的基于S变换的检测算法不但能够很好地分析含有谐波、间谐波的平稳信号,并能够通过MATLAB仿真图清晰直观地读出谐波、间谐波的频率与幅值,同时也能直观估测出含有扰动的非平稳信号中的间谐波含量。

1 传统 S 变换的基本原理

1.1 连续 S 变换

将任何一种属于 $L^2(R)$ 空间的信号 $h(t)$ 在小波基下做相应的积分展开,称这样的积分展开为信号 $h(t)$ 的 CWT,具体的公式为:

$$W(\tau, d) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \omega(t - \tau, d) dt \quad (1)$$

若是要得到 CWT 的相位特征,就必须修改纠正小波基的相角。是以将连续小波变换与一个相位因数相乘,就得到 S 变换:

$$S(\tau, f) = \exp(i2\pi f\tau) \cdot W(\tau, d) \quad (2)$$

式中: τ 为时移变量, d 为伸缩变量(或者尺度变量),小波基为:

$$W(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau - t)^2 f^2}{2}\right) \quad (3)$$

其中,频率 f 是伸缩因子 d 的倒数。 $W(\tau - t, f)$ 为 Gauss 窗, τ 为操控 Gauss 窗在时间轴上变化的位置因数。该 Gauss 窗的窗宽和窗高是随着频率改变而改变的,这样也就改善了短时傅里叶变换的窗宽和窗高固定不变的缺点。式(2)达不到小波的零均值允许要求,进而进一步将 S 变换写成

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau - t)^2 f^2}{2}\right) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (4)$$

将 S 变换的结果作下列运算:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau \quad (5)$$

从式(5)能够很容易地就获得信号 $h(t)$ 的频谱 $H(f)$,而且由其经过式(6)能够恢复出原来的信号:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau \right\} \exp(i2\pi ft) df \quad (6)$$

从上面可以看出,S 变换就能够通过 FFT 得到快速的计算,其结果就可以用三维立体图、二维等高线图以及灰度图等直观形象地描绘出来,或者从中截取一个剖面用二维曲线描绘。

1.2 离散 S 变换

对式(4)先做傅里叶变换,再进行傅里叶反变换,最后再做变量代换,就可以将 S 变换变成信号 $h(t)$ 的傅里叶反变换 $H(f)$ 的表达式,即:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(v + f) \exp\left(\frac{-2\pi^2 v^2}{f^2}\right) \exp(i2\pi v\tau) dv, f \neq 0 \quad (7)$$

对式(7)做离散化处理,能够获得 S 变换的离散表达式:

$$S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp$$

$$\left(\frac{-2\pi^2 m^2}{n^2}\right) \exp\left(\frac{i2\pi nk}{N}\right) \quad (8)$$

其中,

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} h(kT) \exp\left(-\frac{i2\pi nk}{N}\right) \quad (9)$$

式中: $n=1, 2, \dots, N-1$ 。

$$S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h(mT) \quad (10)$$

对信号做 S 变换处理时,频矩阵中每个元素的幅度为:

$$A\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \left| S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] \right|, \quad (k, n = 0, 1, \dots, N-1) \quad (11)$$

显而易见,时间序列 $h(t)$ 的 S 变换计算结果是一个复数时间频率矩阵,记为 S 矩阵,它的行表示频率,列表示时间。S 模阵列就是对 S 阵列中每个量求模后获得的阵列,其列向量描述的是信号在某一时间点的幅值随着频率改变而改变的趋势。所以,S 模阵列中每个位置处的元素的大小表示的是对应频率和时间处 S 变换的幅值。

1.3 改进 S 变换算法

正是 S 变换中采用了褶积定理和 FFT 的缘故,所以它的计算速度快。在实际应用(如估计间谐波参数)中,可以按以下步骤计算 S 变换:

1) 首先算出 $h(t)$ 的快速傅里叶变换(FFT),得出 $H\left[\frac{m}{NT}\right]$ 后,将谱 $H\left[\frac{m}{NT}\right]$ 移位 n 后可以获 $H\left[\frac{m+n}{NT}\right]$ 得, n 为频率采样点数。

2) 再直接计算得到, $w(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2 f^2}{2}\right)$ 的快速傅里叶变换频谱为 $W(m, n) = \exp\left(-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}\right)$ 。

3) 接着按频率采样点计算 $H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \cdot W(m, n)$ 。

4) 最后计算 $H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \cdot W(m, n)$ 的快速傅里叶反变换(IFFT),可以得出 S 变换谱 $S\left[kT, \frac{n}{NT}\right]$ 。

1.4 仿真实验与结果分析

本文用 MATLAB 对稳态信号、非稳态信号以及不同信噪比时的信号进行了仿真分析。

基波频率 $f_0 = 50$ Hz, 抽样频率 $f_s = 3$ kHz

1) 含有谐波、间谐波的稳态信号

$$x(t) = 220\sqrt{2}\sin(\omega_0 t) + 80\sqrt{2}\sin(1.8\omega_0 t) + 50\sqrt{2}\sin(3\omega_0 t) + 25\sqrt{2}\sin(7.7\omega_0 t)$$

原始信号波形如图 1 所示。

S 变换检测结果如图 2、图 3 所示。

S 变换检测间谐波频率、幅值结果如表 1 所示。

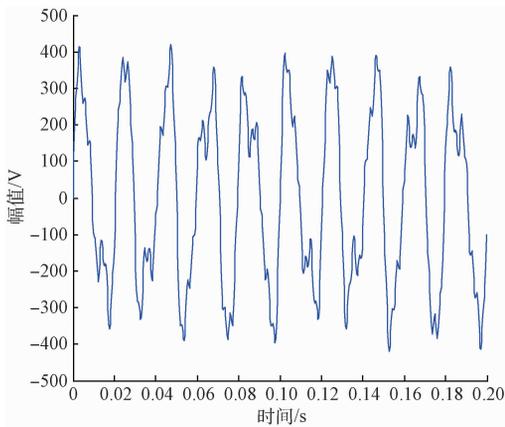


图 1 原信号波形

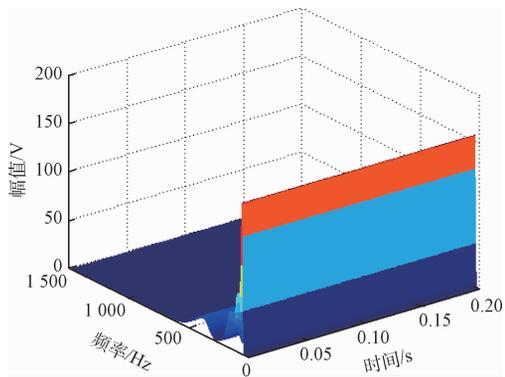


图 2 S 变换三维时频图

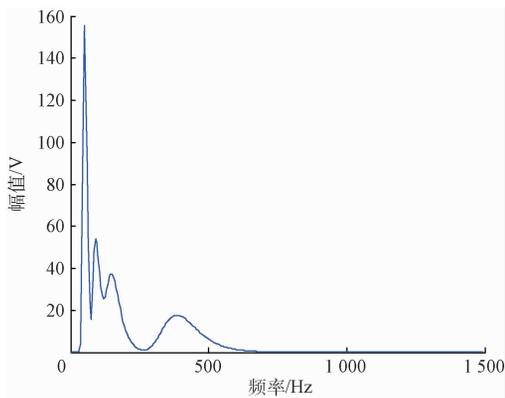


图 3 幅频曲线

表 1 S 变换参数值

	频率真 值/Hz	频率检测 值/Hz	幅值真 值/V	幅值检测 值/V
谐波 1	50	50	$220\sqrt{2}$	311.1
谐波 2	150	150	$50\sqrt{2}$	74.6
间谐波 1	90	90	$80\sqrt{2}$	108.1
间谐波 2	385	385	$25\sqrt{2}$	35.4

S 变换检测误差分析如表 2 所示。

表 2 S 变换检测误差 (%)

	谐波 1	谐波 2	间谐波 1	间谐波 2
频率误差	0.0	0.0	0.0	0.0
幅值误差	0.0087	5.5	4.5	0.1

由仿真结果可知,稳态信号检测参数时,检测频率基本没误差,幅值误差大约在 5% 左右。

2) 含有噪声的暂态信号(信噪比为 50 dB)

$$x(t) = 220\sqrt{2}\sin(\omega_0 t) + 80\sqrt{2}\sin(1.8\omega_0 t)$$

$$+ 50\sqrt{2}\sin(3\omega_0 t) + 25\sqrt{2}\sin(7.7\omega_0 t) + \xi(t)$$

原信号波形如图 4 所示。

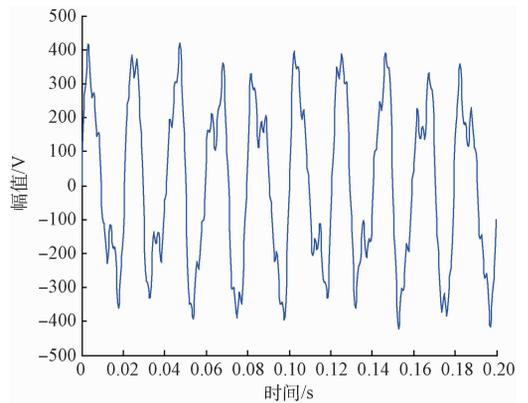


图 4 原信号波形

S 变换的检测结果如图 5、图 6 所示。

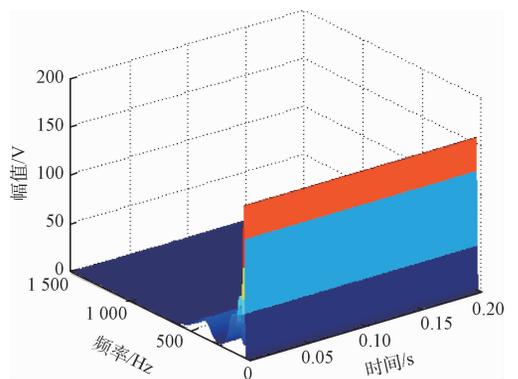


图 5 S 变换三维时频图

加入噪声之后的 S 变换检测间谐波参数结果如表 3 所示。

当噪声加入时,会产生一些杂散的频率分量,但这些分量的幅度很小,可以筛选去除;信噪比越小,噪声干扰越强,噪声比越高,测量精确度就越高。S 变换检测频率基本没误差,但在检测幅值存在 5% 左右的误差。

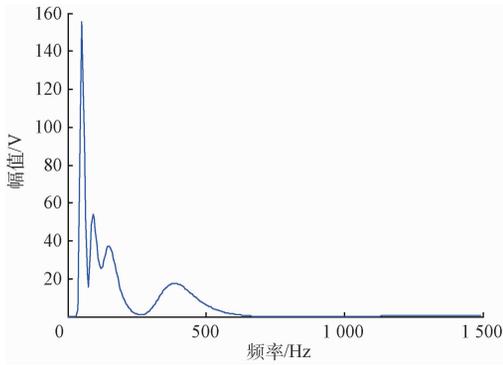


图 6 幅频曲线

表 3 S 变换参数值

	频率真 值/Hz	频率检测 值/Hz	幅值真 值/V	幅值检测 值/V
谐波 1	50	50	$220\sqrt{2}$	311.2
谐波 2	150	150	$50\sqrt{2}$	74.6
间谐波 1	90	90	$80\sqrt{2}$	108.1
间谐波 2	385	385	$25\sqrt{2}$	35.4

加噪声的 S 变换检测误差分析如表 4 所示。

表 4 S 变换检测误差 (%)

	谐波 1	谐波 2	间谐波 1	间谐波 2
频率误差	0.0	0.0	0.0	0.0
幅值误差	0.023	5.5	4.5	0.1

不同信噪比下的检测数据以及误差分析如表 5、6 所示。

表 5 噪声比为 20 dB 下的暂态信号数据以及误差

频率/Hz	50	90	150	380	835
频率误差/%	0.0	0.0	0.0	1.2	100
幅值/V	313.2	107.8	73.5	34.2	16.8
幅值误差/%	0.6	4.7	3.9	3.4	100

表 6 噪声比为 30 dB 下的暂态信号数据以及误差

频率/Hz	50	90	150	380	830
频率误差/%	0.0	0.0	0.0	1.2	100
幅值/V	311.8	108.0	74.3	34.7	5.3
幅值误差/%	0.2	4.5	5.0	1.8	100

2 结 论

电力系统间谐波检测参数的研究是一个很有价值和具有重要意义的课题,本文研究了一种基于 S 变换的间谐波检测方法,分析了 S 变换的优良时频特性,结果显示 S 变换具有良好的局部时频特性,可以很好应用于实际电网的间谐波的检测和分析处理。由仿真结果可知,基于 S 变换的检测算法不但能够很好地分析含有谐波、间谐波的平稳信

号,并能够通过 MATLAB 仿真图清晰直观地读出谐波、间谐波的频率与幅值,同时也能直观估测出含有扰动的非平稳信号中的间谐波含量。但是如果信号中谐波、间谐波频率十分接近,检测的直观性和准确度会受到影响而下降。S 变换作为一种时频分析方法,具有自适应时频窗,没有交叉和负频率的问题,比较适合于分析处理非平稳信号和平稳信号。

参考文献

- [1] 林海雪. 公用电网间谐波国家标准介绍[J]. 供用电, 2010, 27(6): 8-13.
- [2] 崔晓荣, 王军, 曹太强, 等. 电力系统间谐波检测方法现状与发展趋势[J]. 电测与仪表, 2012, 49(557): 6-10.
- [3] 魏学良, 程婷. 谐波治理设备在供电系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(1): 80-83.
- [4] 薛凌云, 黄伟, 陈超, 等. 基于空间谱估计技术的谐波小波检测算法[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 46-49.
- [5] 唐求, 王耀南, 郭斯羽. 电力系统谐波及其检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(5): 29-33.
- [6] 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): 7-13.
- [7] STOCKWELL R G, MANSINHA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: The S-transform; [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1996, 44(4): 998-1001.
- [8] 张淑清, 李盼, 师荣艳, 等. 基于改进 S 变换的电能质量扰动分类新方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 927-934.
- [9] 金智, 尹柏强. 基于广义 S 变换的高斯领域时频滤波方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 124-131.
- [10] 唐求, 滕召胜, 郭斯羽, 等. 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.
- [11] 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.
- [12] 易吉良. 基于 S 变换的电能质量扰动分析; [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
- [13] 沈跃, 张瀚文, 刘国海, 等. 基于判别字典学习的电能质量扰动识别方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2167-2173.
- [14] 沈跃, 刘国海. 随机降维映射稀疏表示的电能质量扰动多分类研究 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1371-1376.
- [15] 桑博, 刘洪文, 尹志勇. 单一电能质量扰动的分类识别研究 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(7): 56-59.

作者简介

林林, 本科, 高级工程师, 主要研究方向电能质量检测、电力系统维护等。

E-mail: ntlinlin2002@126.com