

基于 S变换时频等值线图与幅值包络线的短时 电能质量扰动检测与分类

刘守亮,肖先勇,杨洪耕

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要:提出了利用 S变换时频等值线图和幅值包络线对常见短时电能质量扰动进行检测和分类的方法。介绍了 S变换的基本原理,给出了利用 S变换检测和分类短时电能质量扰动的实现方法,通过仿真验证方法的有效性。结果表明,该方法可以准确地确定扰动发生时刻和持续时间,并能简单、直观地对扰动进行分类和幅度确定。

关键词: S变换; 短时电能质量扰动; 检测; 分类

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)22-0049-04

0 引言

自 20 世纪 80 年代以来,人们对电能质量问题的研究和关注逐渐形成热点。一方面,现代电力系统中的用电负荷发生了重大变化,许多具有非线性、冲击性和不对称性等用电特性的负荷的发展,造成了大量电能质量问题^[1];另一方面,随着国民经济和科学技术的发展,微电子器件与电力电子技术的广泛应用,对电能质量的要求也越来越高^[2,3]。

短时电能质量扰动(Short Duration Power Quality Disturbance,简称 SDPQD),常见的有电压凹陷(dips或 sags)、隆起(swell)和短时断电(momentary interruptions)等,是电能质量问题的重要方面。电压凹陷是指工频电压有效值降至 0.1~0.9 pu 持续时间在 0.01 s~1 min 的电磁扰动现象;电压隆起是指工频电压的有效值升至 1.1~1.8 pu,持续时间在 0.01 s~1 min 的电磁扰动现象;短时断电是指供电电压或者负荷电流减小至小于 0.1 pu 且持续时间不超过 1 min 的电磁扰动现象。

在对 SDPQD 信号分析的方法中,傅里叶变换属于全局变换,只能分别从时域或者频域分析信号,不能把二者有机地结合起来,因而无法满足对具有暂态、突变等特性的非平稳信号进行分析的要求。小波变换是一种时频分析方法,因其具有良好的时域-频域局部化特性,适合于分析暂态、突变信号,在电能质量扰动分析中得到了广泛的应用^[4~8]。但是,用小波变换不容易实现对于以时间域信息为特征的 SDPQD 信号,如凹陷、隆起等的有效检测^[4];用小波变换进行分类,其过程不够简便,结果缺乏直观性。

S变换(S-Transform,简记为 ST)是由 Stockwell 等学者于 1996 首次提出的^[9],文献[10]将 S变换引入电能质量扰动识别,但仅对暂态电能质量的检测进行了研究,本文在此基础上提出了利用 S变换时频等值线图和幅值包络线对以上常见 SDPQD 进行检测和分类的方法。

1 S变换基本原理

1.1 一维连续 S变换

S变换是一种可逆时频分析方法,是小波变换和短时傅里叶变换的一种组合^[9]。信号 $h(t)$ 的一维连续 S变换定义如下:

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}\right) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (1)$$

其一维连续逆变换为

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t, f) df \quad (2)$$

S变换可以看作是对连续小波变换(Continuous Wavelet Transform,简记为 CWT)的一种“相位修正”,并且可以从连续小波变换推导而来。信号 $h(t)$ 的连续小波变换 $W(a, b)$ 定义为:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

其中: ψ 为母小波, a 为尺度伸缩因子, b 为时间平移因子。则信号的 S变换写成以某个特定的函数与一个相位因子的乘积作为母小波的连续小波变换。特别地,若将母小波定义为一个高斯窗函数和一个复向量的乘积

$$\psi(t, f) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{t^2 f^2}{2}\right) \exp(-i2\pi ft) \quad (4)$$

即得 S 变换。需要指出的是,由于式 (4) 中的母小波 (为明确起见,下文称之为“变换核”)不满足零均值容许条件,因此,它不是严格意义上的小波变换。

S 变换虽然是连续小波变换的一种扩展,但由于它打破了高斯窗仅能在固定时间位置进行伸缩的限制,使得高斯窗也可以平移^[10],因而具有自己独特的优点:信号 S 变换的时频谱的分辨率与频率 (即尺度) 有关,变换核不必满足容许性条件等。

1.2 一维离散 S 变换

由于信号 $h(t)$ 的 S 变换与其傅里叶变换 $H(f)$ 存在如下关系:

$$S(j\omega, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f + f_0) \exp(-j2\pi f_0 t) \exp(j2\pi f t) dt \quad (5)$$

因此离散 S 变换可以通过以下方式获得:设 $h[kT]$ ($k=0, 1, 2, \dots, N-1$) 是对连续时间信号 $h(t)$ 进行采样得到的离散时间序列,采样间隔为 T ,总采样点数为 N 。那么该序列的离散傅里叶变换是:

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] \exp(-j\frac{2\pi nk}{N}) \quad (6)$$

其中: $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

式 (1) 中,使 $f = n/NT$ 且 $j\omega = jT$, 则得一维离散 S 变换

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} H\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp(-j\frac{2\pi m^2}{N}) \cdot \exp(j\frac{2\pi mn}{N}) \quad (7)$$

其中: $j, m, n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

特别地,当 $n=0$ 时的离散 S 变换定义为:

$$S[jT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h\left(\frac{m}{NT}\right) \quad (8)$$

显然,采样时间序列 $h(t)$ 的 S 变换结果是一个负的时频矩阵,本文记为 S 矩阵,其列对应时间,行对应频率,某一时间和频率处 S 变换的幅值就是 S 矩阵相应元素的模值。因此, S 变换的结果可以用时频图像来表示。图 1 所示为文献 [9] 提供的合成信号的 S 变换时频图像。图中横坐标为时间,纵坐标为频率,图像的灰度反映了信号在相应时刻和频率处幅度的大小。在 $t=0 \sim 63$ 之间为一段低频正弦信号,在 $t=64 \sim 127$ 之间是一段中频正弦信号,而在低频信号的中,即 $t=20 \sim 30$ 间又叠加了一个高频正弦信号。

从图 1 中可以看出, S 变换的时频图像清楚地反映了该信号从低频到高频其频率成分随时间

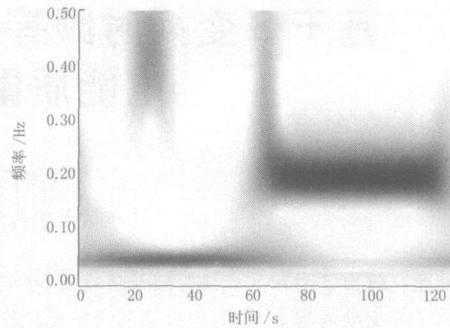


图 1 信号 $h(t)$ 的 S 变换时频图像

Fig 1 Time-frequency image of $h(t)$ from ST

变化的分布情况。而且,其分辨率随着频率和时间的变化而变化:在高频段,其时间分辨率高而频率分辨率低;在低频段则恰好相反,这与小波变换的时频特性相仿。但是, S 变换的结果在时频平面上比连续小波变换的结果更为清晰和直观,而且对于信号的高频部分也比连续小波变换分解得更细致^[11]。

2 SDPQD 的 S 变换分析

2.1 基于 S 变换的 SDPQD 定位

对经采样得到的电压信号进行离散 S 变换,得到变换结果 S 时频矩阵,再由 S 矩阵绘制时频等值线图。与时频图像相似,时频等值线图的横轴为时间,纵轴为频率,图中相同颜色的围线表示信号中具有相同幅值的频率成分的分布,换言之,该图在反映信号时频分布的同时,也反映了信号不同频率成分的幅值分布情况。而 SDPQD 信号的发生表现为幅值和频率的突然变化,这种变化也必然会在信号的时频等值线图中表现为频率和幅值分布的突变,因此可以实现对扰动发生时刻以及持续时间的确定。

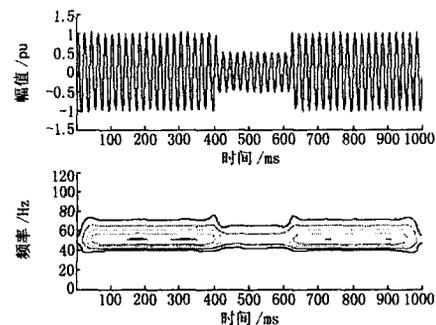


图 2 S 变换等值线图检测电压凹陷

Fig 2 Detection of voltage dip using ST contour

仿真信号为模拟 50 Hz 工频交流电压信号,采样频率为 1 kHz,并加入信噪比为 30 dB 的高斯白噪

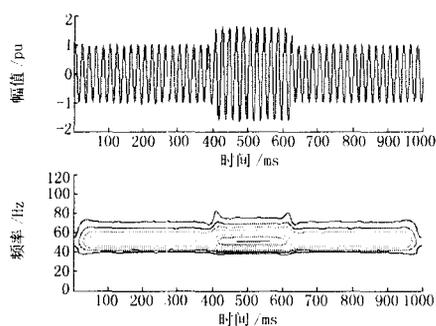


图3 S变换等值线图检测电压隆起

Fig 3 Detection of voltage swell using ST contour

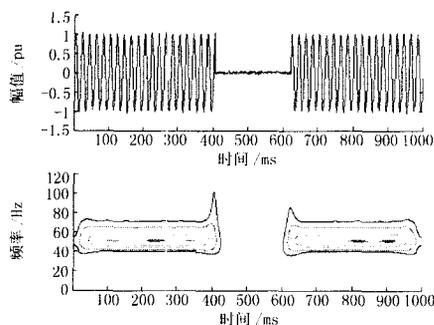


图4 S变换等值线图检测电压中断

Fig 4 Detection of momentary interruption using ST contour

声。为了便于说明问题,将凹陷、隆起和断电的持续时间均设置为 $t = 406 \text{ ms} \sim 623 \text{ ms}$,且凹陷幅度为 0.5 pu ,隆起幅度为 1.6 pu ,短时断电为 0 pu 。

从仿真结果图 2~4 中可以看出,三种 SDPQD 的 S 变换时频等值线图在扰动起止时刻均有相应的尖峰凸起,并且在持续时段内有不同的幅值分布。可见,时频等值线图能正确反映 SDPQD 在相应时刻的频率和幅值的突变,从而实现了对抗动发生时刻的定位和持续时间的确定。另外,对于所加噪声,S 变换表现出了较好的抑制噪声性能。

2.2 基于 S 变换的 SDPQD 分类与幅度确定

三种 SDPQD 最明显的区别是其幅值的不同变化。S 矩阵中各个元素的模值恰好反映了信号在相应时刻和频率的幅值,通过求取 S 矩阵各列最大模值,可得到信号 S 变换的幅值包络线,从而可以直观地判断 SDPQD 的类别并得到变化幅度的大小。

图 5~7 所示依次为以上三种 SDPQD 的 S 变换幅值包络曲线。从图中可以看出,该曲线不但直观地区分出了三种 SDPQD,如凹陷显示为向下凹陷,隆起显示为向上凸起,而且其凹凸幅度亦与设定值相符,准确地反映了 SDPQD 的变化幅度。

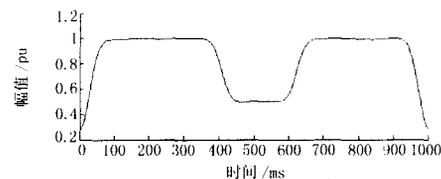


图5 电压凹陷的 S 变换幅值包络线

Fig 5 Amplitude envelope of voltage dip from ST

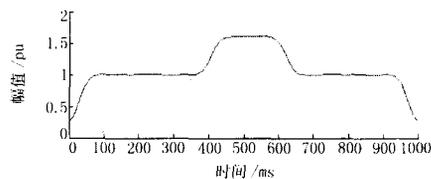


图6 电压隆起的 S 变换幅值包络线

Fig 6 Amplitude envelope of voltage swell from ST

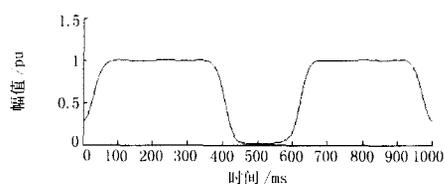


图7 短时断电的 S 变换幅值包络线

Fig 7 Amplitude envelope of momentary interruption from ST

3 结论

本文提出了利用 S 变换时频等值线图与幅值包络线检测与分类 SDPQD 的方法。仿真验证,该方法能准确地定位扰动发生时刻、确定扰动持续时间,简单直观地对 SDPQD 进行分类并确定变化幅度。本文仅对三种设定的 SDPQD 信号进行了分析,关于 S 变换对于其他电力系统实际扰动信号的分析还需要做更深入的研究。

参考文献:

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12
LN Hai-xue Main Problems of Modern Power Quality [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 5-12
- [2] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展 (一) [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 1-5.
YANG Hong-geng, XIAO Xian-yong, LIU Jun-yong Issues and Technology Assessment on Power Quality, Part I [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 1-5.
- [3] Barros J, Diego R I Effects of Non-sinusoidal Supply on Voltage Tolerance of Equipment [J]. Power Engineering

- Review, IEEE, 2002, 22 (1): 46-47.
- [4] Gaodua A M, Salama M M A, Sultan M R, et al Power Quality Detection and Classification Using Wavelet Multi-resolution Signal Decomposition[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14 (4): 1469-1475.
- [5] Karimi M, Mokhtari H, Iravani M R. Wavelet Based Online Disturbance Detection for Power Quality Applications [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (4): 1212-1220.
- [6] 胡铭,陈珩. 基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位[J]. 电网技术, 2001, 25 (3): 12-16
HU Ming, CHEN Heng. Detection and Location of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform Modulus Maximum [J]. Power System Technology, 2001, 25 (3): 12-16.
- [7] 严居斌,刘晓川,杨洪耕,等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析系统[J]. 电网技术, 2002, 26 (4): 16-18
YAN Ju-bin, LIU Xiao-chuan, YANG Hong-geng, et al Analysis of Short-term Power System Disturbance Based on Modulus Maximum Principle and Energy Distribution Curve of Wavelet Transform [J]. Power System Technology, 2002, 26 (4): 16-18.
- [8] Chung J, Powers E J, Grady W M, et al Power Disturbance Classifier Using a Rule-based Method and Wavelet Packet-based Hidden Markov Model [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (1): 233-241.
- [9] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the Complex Spectrum: the S Transform [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1996, 44 (4): 998-1001.
- [10] Reddy J B, Mohanta D K, Katan B M. Power System Disturbance Recognition Using Wavelet and S-Transform Techniques [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2004, (2).
- [11] 王成栋,张优云,夏勇. 基于 S变换的柴油机气阀机构故障诊断研究 [J]. 内燃机学报, 2003, 21 (4): 271-275.
WANG Cheng-dong, ZHANG You-yun, XIA Yong. Fault Diagnosis for Diesel Valve Train Based on S Transform [J]. Transactions of CSICE, 2003, 21 (4): 271-275.

收稿日期: 2005-03-29; 修回日期: 2005-06-10

作者简介:

刘守亮(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量与电力市场;E-mail: liushouliang@126.com

肖先勇(1968-),男,副教授,从事电能质量分析与控制、电力市场等方面的教学和科研工作;

杨洪耕(1949-),男,教授,从事电能质量分析与控制、电力市场等方面的教学和科研工作。

Detection and classification of short duration power quality disturbances based on time-frequency contour and amplitude envelope of S transform

LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong, YANG Hong-geng

(School of Electric Engineering & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper proposes a method, which is known as S-transform, by using its time-frequency contour and amplitude envelope to detect and classify STPQD (Short Duration Power Quality Disturbances). The principle of S-transform is introduced. The method used in this paper is described and its effectiveness is validated using some simulated examples. The results show that this method can localize the disturbances precisely and classify them simply and distinctly.

Key words: S-transform; short duration power quality disturbances (SDPQD); detection; classification

(上接第 40 页 continued from page 40)

Abstract: This paper analyses the reason that induction voltage induces on the non-energized lines of 500 kV double circuit transmission lines and calculates the induction voltage by simulation. The effects of all factors such as the position of ground wire and the value of earth connection's ground resistance, cross section of the lines, bads, lines throwing in and switching off on the energized lines, the tower ground resistance are analyzed. The conclusion is that the position of ground wire and the value of earth connection's ground resistance are two of the most important factors.

Key words: transmission line; induction voltage; double circuit transmission line; static induction; electromagnetic induction; ground resistance