

短时傅里叶变换和 S 变换用于检测电压暂降的对比研究

徐 健, 张语勍, 李彦斌, 樊 一

(西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对电压暂降的特征值检测问题, 介绍了短时傅里叶变换 (STFT) 和 S 变换两种时频分析法, 并对两种方法进行了对比分析。在 STFT 变换中选取不同窗宽的窗函数对同一电压暂降信号进行时频分解, 分析不同窗宽对检测结果的影响。提出用时频等值曲线定位暂降的起、始时刻, 用基频幅值曲线检测暂降幅值, 用相位跳变曲线判定暂降发生时相位是否跳变。仿真结果表明, 在 STFT 变换中窗口越小, 检测结果越准确; 与 STFT 变换相比, S 变换的检测结果更准确, 并且抗噪声能力强, 有助于电能质量的治理。

关键词: 短时傅里叶变换; S 变换; 电压暂降; 仿真; 特征值

Comparative study of STFT and S transform on detecting voltage sag

XU Jian, ZHANG Yu-qing, LI Yan-bin, FAN Yi

(School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to deal with the detection problem of the voltage sag features, this paper introduces two kinds of time-frequency methods, the STFT and S-transform, then the two methods are compared and analyzed. The different widths of the window function in the STFT is selected to decompose the same voltage sag signal in time-frequency. And the effect on the test results of different width is analyzed. This paper proposes to use time-frequency isopleth to position the start and end time of the sag, use the fundamental frequency amplitude curve to detect the sag amplitude, and use the phase hopping curve to determine whether the phase hopping happened when the sag occurred. The simulation results show that the smaller the window is in STFT, the more accurate the test results are; compared with STFT transform, S-transform test results are more accurate and has high anti-noise ability, which is helpful to power quality management.

Key words: short-time Fourier transform; S-transform; voltage sag; simulation; characteristic values

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0044-05

0 引言

电压暂降(Voltage sag)是指电网在系统频率时电压均方根值瞬时减小到额定值的 10%~90%范围内, 其持续时间一般为半个工频周期到数秒钟^[1], 输电线路短路故障和气候条件(雷电、大风等)是引起电压暂降的主要原因。文献[2]中对电压暂降引起的经济损失进行了评估分析, 可见由电压暂降造成的损失和危害非常严重, 因此对电压暂降特征参数的准确检测具有十分重要的意义。目前, 对电压暂降扰动特征提取常用的方法有小波变换^[3]、dq 变换^[4]、HHT 变换^[5]和瞬时无功功率理论^[6]等。本文主要采用 STFT 变换和 S 变换对电压暂降信号的幅值、

起始时刻和相位跳变进行仿真分析, 结果表明 STFT 变换中窗函数宽度的选取比较困难, 在选择合理的窗口的条件下可以减少误差; 与短时傅里叶变换相比, S 变换对暂降信号特征值的检测更为准确, 抗噪能力强, 速度快。

1 短时傅里叶变换

1964 年 Dennis Gabor 提出的短时傅里叶变换 (Short-time Fourier transform, STFT) 解决了 Fourier 变换无法反映信号局部特征的缺陷。STFT 变换的基本思想是用窗函数截断非平稳信号, 将截断的窗内信号看做是平稳的, 再对这一系列短时平稳信号进行 Fourier 变换, 得到二维时频矩阵。

1.1 连续短时傅里叶变换

信号 $x(t) \in L^2(R)$, 其数学表达式为

基金项目: 陕西省教育厅科研专项《PCI 数据采集的电能质量监测和评估系统研究》(2013JK1015)

$$x(t)=A\sin(\omega t+\varphi) \quad (1)$$

式中: A 为幅值; ω 为角频; φ 为初相角。信号 $x(t)$ 的 STFT 变换定义如式 (2)。

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t-\tau)\exp(-j2\pi ft)dt \quad (2)$$

其中, $g(t-\tau)$ 为窗函数, 随着 τ 的不断变化, 窗函数在时间轴上滑动, 对信号进行分析。在短时傅里叶变换中窗函数一旦确定, 整个时频窗就保持不变, 即它只有单一的分辨率, 短时傅里叶变换频谱分析结果受信号截取位置和窗长的影响。

1.2 离散短时傅里叶变换

运用计算机对信号进行分析时, 先要将连续信号进行离散化, 从而实现在计算机中进行高效运算。用 $x(k)$ 表示离散信号, Δt 为采样时间间隔, N 为采样点数, $k, m, n = 0, 1, \dots, N-1$, 则 STFT 的离散形式为

$$STFT(m\Delta t, \frac{n}{N\Delta t}) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t)g(k\Delta t - m\Delta t)\exp(\frac{-j2kn\pi}{N}) \quad (3)$$

由式 (3) 可知 STFT 变换的结果是一个二维的复矩阵, 其行对应采样时间点, 列对应频率值, 矩阵元素为对应的频谱幅值^[7]。

2 S 变换

1996 年 Stockwell 等学者提出了一种无损可逆的时频分析方法—S 变换^[8], 它不同于 STFT 变换之处在于高斯窗口的高度和宽度随频率而变化, 这样就克服了短时傅里叶变换窗口高度和宽度固定的缺陷^[9]。

2.1 一维连续S变换

信号 $x(t)$ 的一维连续 S 变换定义如下。

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\omega(\tau-t, f)\exp(-j2\pi ft)dt \quad (4)$$

$$\omega(\tau-t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}) \quad (5)$$

式中: j 为虚数单位; τ 为控制高斯窗口在 t 轴位置的参数; f 为频率; $\omega(\tau-t, f)$ 是高斯窗函数。由式 (5) 可以看出频率的改变使高斯窗口的宽度和高度也随之变化, 使得在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。

2.2 一维离散S变换

对连续信号 $x(t)$ 进行采样, 采样时间间隔为 T , 采样总点数为 N , $\tau = kt$, $f = n/NT$, $k, m = 0,$

$1, \dots, N-1$, 一维离散 S 变换的表达式如式 (6)、式 (7) 所示。

当 $n = 0, 1, \dots, N-1$ 时

$$S(kT, \frac{n}{NT}) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(\frac{m+n}{NT}) \exp(\frac{-2\pi^2 m^2}{n^2}) \quad (6)$$

当 $n = 0$ 时,

$$S(kT, 0) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} X(\frac{m}{NT}) \quad (7)$$

S 变换的结果是一个复时频矩阵, 其列为信号某一时刻的幅值在不同频率上的分布, 行为信号某一频率处的幅值在不同时刻的分布。通过该复时频矩阵可以对电压暂降信号进行特征提取, 从而确定暂降发生起始时刻、幅度以及相位的变化。

3 仿真分析

用 Matlab 建立的电压暂降模型公式为

$$y(t) = \{1 - a[u(t_2) - u(t_1)]\} \sin(\omega t) \quad (8)$$

其基频为 50 Hz, 采样频率为 1 kHz, 采样长度为 $50T$, 暂降的起、始时刻分别为 0.275 s 和 0.525 s, 暂降幅值为 0.625 pu, 图 1 是 $y(t)$ 的 Matlab 仿真图。

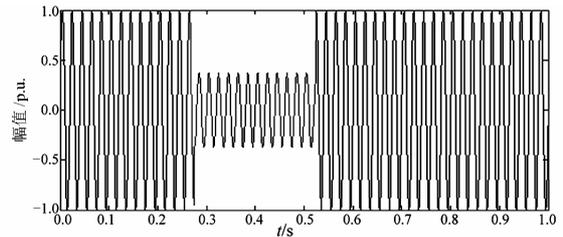


图 1 电压暂降信号

Fig. 1 Voltage sag signal

3.1 电压暂降扰动定位

本文采用时频等值曲线对电压暂降信号进行定位, 时频等值曲线在扰动发生时会有明显变化, 即在扰动的起、始时刻会出现尖峰, 通过检测尖峰的位置得到 T_{start} 和 T_{end} 。

在 Matlab 环境下, 用 STFT 变换对电压暂降信号作时频分解。取 80 点的 Hamming 窗作为窗函数, 得到的时频等值曲线如图 2 (a) 所示。通过对图 2 (a) 中尖峰位置检测得到暂降发生的起始时刻为 $T_{start}=0.28$ s 和 $T_{end}=0.52$ s, 误差为 0.5%。

为了说明窗宽对时频分辨率的影响, 取 45 点的 Hamming 窗对信号进行 STFT 变换, 图 2 (b) 是其时频等值曲线图。图 2 (b) 检测结果显示, 暂降发生的起、始时刻分别为 $T_{start}=0.2725$ s 和 $T_{end}=0.5225$ s, 误差为 0.25%。图 2 (b) 与图 2 (a) 相比, 前者的时间分辨率高, 暂降发生时尖峰明显、易于检测,

并且检测结果更准确，误差更小。在满足文献[10]中的“海森堡测不准原理”的前提下，窗口越小越好，因此下面 STFT 变换均选用 45 点的 Hamming 窗对信号进行分析。

图 2 (c) 是电压暂降信号经 S 变换后的时频等值曲线，从图中可以看出 S 变换具有良好的时频分辨能力，并且与短时傅里叶变换相比暂降发生时尖峰又细又长，易于找到尖峰的最大值点。检测结果显示暂降发生的起、始时刻分别为 $T_{start}=0.275$ s 和 $T_{end}=0.525$ s，误差为 0，仿真结果表明 S 变换对电压暂降的定位更准确。

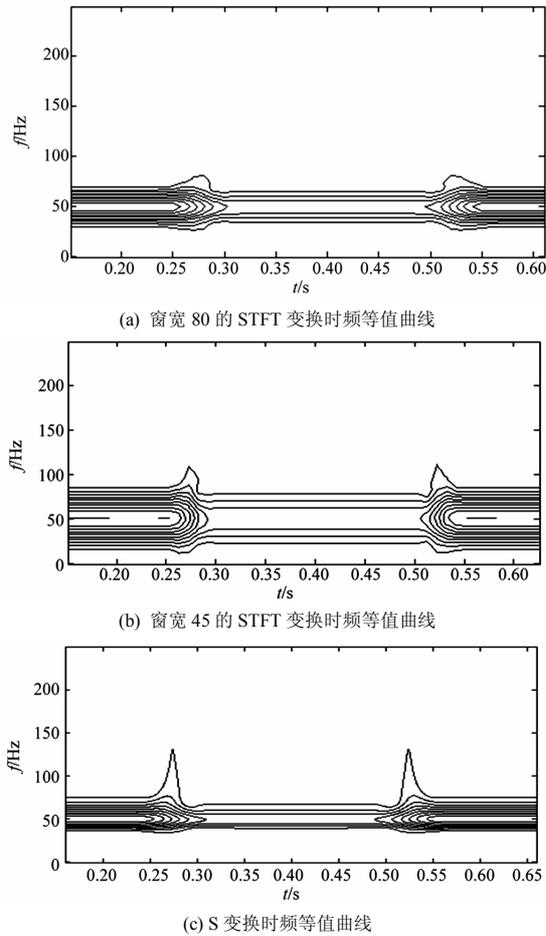


图 2 电压暂降时频等值曲线

Fig. 2 Time-frequency isopleth of voltage sag

3.2 电压暂降幅值和相位跳变检测

电压暂降信号经过 STFT 变换和 S 变换后得到二维的复时频矩阵，提取该矩阵中基频对应的幅值，作基频幅值随时间变化的曲线，扰动使信号幅值改变的大小可以通过该曲线检测出来。图 3 即为电压暂降基频幅值曲线，从图 3 (a)、图 3 (b) 中均可以看出，在暂降发生时，电压有明显的凹陷，暂降的幅值等于最大值与最小值之差。仿真结果显

示 STFT 变换和 S 变换检测到的电压暂降幅值均为 0.625 p.u.，因此两种方法都可以准确地检测出电压暂降的幅值。当电压暂降信号中含有噪声时，对 STFT 变换和 S 变换的检测结果有什么影响，本文做了以下验证。在仿真模型信号中加入信噪比为 40 dB 的高斯白噪声，电压暂降幅值的检测结果如图 4 所示。结果显示，在含有噪声的情况下，STFT 变换的基频幅值曲线存在波动，暂降的幅值在 0.622~

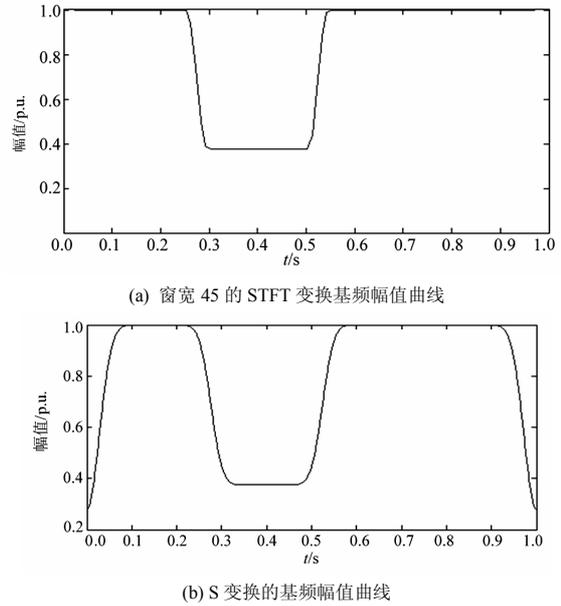


图 3 电压暂降基频幅值曲线

Fig. 3 Fundamental frequency amplitude curve of voltage sag

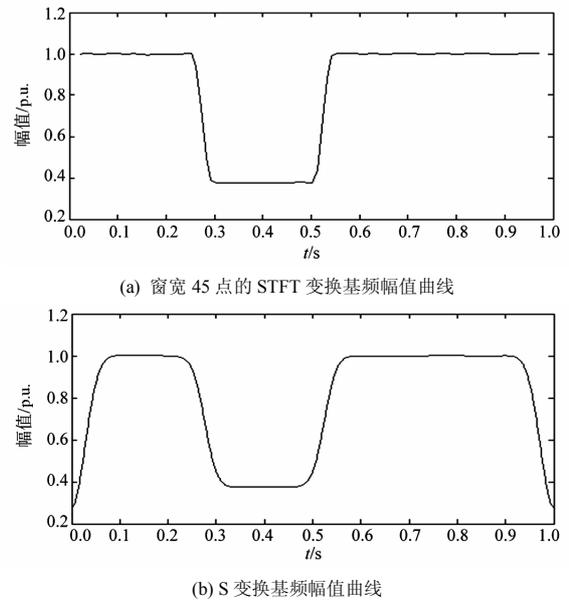


图 4 含噪声的电压暂降基频幅值曲线

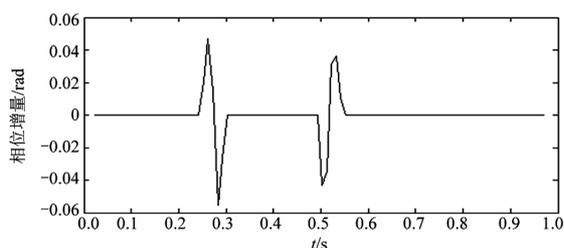
Fig. 4 Fundamental frequency amplitude curve of voltage sag with noise

0.628 p.u.之间; S 变换的基频幅值曲线基本无波动, 检测结果是 0.625 p.u., 由此可以看出 S 变换的抗噪能力较强, 检测结果准确。

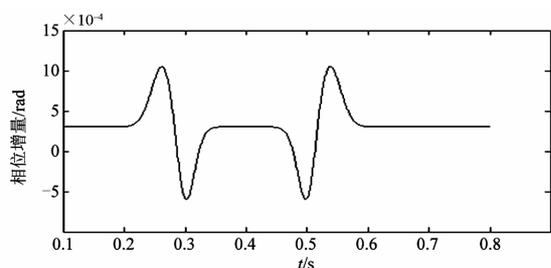
电压暂降相位跳变是指电压暂降发生前后相位角发生跳变^[11], 由式 (9) 得到基频瞬时相位, 在计算相邻两点的相位差, 便得到了相位跳变曲线。电压暂降相位跳变曲线如图 5 所示, 由图 5 (a) 和图 5 (b) 可以看出在暂降发生时刻相位有明显的跳变。与 STFT 变换检测到的相位跳变相比, S 变换检测的相位增量值更准确。

$$\theta = \arctan \left(\frac{I \left(\text{STFT} \left[m\Delta t, \frac{n}{N\Delta t} \right] \right)}{R \left(\text{STFT} \left[m\Delta t, \frac{n}{N\Delta t} \right] \right)} \right) \quad (9)$$

$$\text{或 } \theta = \arctan \left(\frac{I \left(S \left[jT, \frac{n}{NT} \right] \right)}{R \left(S \left[jT, \frac{n}{NT} \right] \right)} \right)$$



(a) 窗宽 45 点的 STFT 变换相位跳变曲线



(b) S 变换相位跳变曲线

图 5 电压暂降相位跳变曲线

Fig. 5 Phase hopping of voltage sag

4 结论

文章提出了两种电压暂降扰动特征值的检测算法, 通过仿真比较, 得出以下结论:

(1) 电压暂降信号经过 S 变换得到的时频等值曲线能准确检测到暂降起、始时刻, 但 STFT 变换检测的起始时刻存在误差, 并且在满足海森堡测

不准原则前提下窗宽越小误差越小, 因此, 窗函数的选择影响 STFT 变换的分析精度。

(2) STFT 变换和 S 变换的基频幅值曲线能准确检测暂降的幅值, 但在电压暂降信号中含有噪声的情况下, 显然 S 变换检测效果更好, 具有较强的抗噪能力。

(3) STFT 变换和 S 变换的相位跳变曲线都可以判断出暂降发生时相位是否跳变。

由以上结论可知 S 变换在电压暂降检测中的优势, 其对电能质量问题的综合治理有重要的经济意义。

参考文献

- [1] 吕干云, 吴育聪. 电压暂降源定位的优化综合判据法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 66-71.
LÜ Gan-yun, WU Yu-cong. Optimization comprehensive criterion for voltage sag source location[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 66-71.
- [2] 丁泽俊, 陈波, 雷金勇, 等. 电压暂降的经济损失评估[J]. 现代电力, 2011, 28(5): 90-94.
DING Ze-jun, CHEN Bo, LEI Jin-yong, et al. Economic loss assessment of voltage sag[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(5): 90-94.
- [3] 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 Guo-zhi, 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.
- [4] 杜熊, 周维维, 许可夫. 基于双 dq 变换的引起电压暂降的短路故障分类[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 86-92.
DU Xiong, ZHOU Luo-wei, XU Ke-fu. Classification of short circuit faults causing voltage sags based on double dq transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 86-92.
- [5] 李文帆, 刘志刚, 孙婉璐. 基于 HHT 的电能质量检测系统研制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 123-127.
LI Wen-fan, LIU Zhi-gang, SUN Wan-lu. Development of power quality detection system based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 123-127.

- 123-127.
- [6] 魏磊, 张伏生, 耿忠行, 等. 基于瞬时无功功率理论的电能质量扰动检测、定位与分类方法[J]. 电网技术, 2004, 28(6): 53-58.
WEI Lei, ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, et al. Detection, localization and identification of power quality disturbance based on instantaneous reactive power theory[J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 53-58.
- [7] 赵凤展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34.
ZHAO Feng-zhan, YANG Ren-gang. Voltage sag disturbance detection based on short time Fourier transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 28-34.
- [8] STOCKWELL R G, MANSINA L, LOWE R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Trans on Signal Process, 1996, 44(4): 998-1001.
- [9] 全慧敏, 戴瑜兴. 基于 S 变换模矩阵的电能质量扰动信号检测与定位[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 119-125.
- QUAN Hui-min, DAI Yu-xing. Detection and localization of power quality disturbances based on S-transform module matrixes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 119-125.
- [10] 周林, 吴红春, 梦婧, 等. 电压暂降分析方法研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 1010-1016.
ZHOU Lin, WU Hong-chun, MENG Jing, et al. Study of the voltage sag analysis methods[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 1010-1016.
- [11] 程浩忠, 吕干云, 周荔丹. 电能质量监测与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
-
- 收稿日期: 2014-03-20
- 作者简介:
- 徐健(1963-), 男, 副教授, 研究生导师, 当前研究课题为电能质量监测与分析, 主要研究方向为控制理论与控制工程; E-mail: xu0910@sina.com
- 张语勃(1990-), 女, 硕士研究生, 当前研究课题为电能质量监测与分析, 主要研究方向为电力电子。