

## 基于改进 S 变换的电压暂降起止时刻检测

汪 洋, 徐方维, 陈礼频, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

**摘要:** 电压暂降起止时刻是重要的暂降特征量, 在分析改进 S 变换基础上提出一种改进 S 变换基频幅值向量和基频差分平方向量相结合的暂降检测方法。首先通过改进 S 变换基频幅值向量判断信号是否发生暂降, 再利用改进 S 变换基频差分平方向量检测暂降信号起止时刻, 最后依据基频幅值向量和暂降起止时刻的检测误差曲线来确定改进 S 变换高斯窗宽调节因子, 达到更优时频分辨率。所提方法能更准确地检测发生在不同持续时间、不同波形点和不同幅值深度的暂降所对应的起止时刻。仿真和实测结果验证了方法的有效性。

**关键词:** 电压暂降; 改进 S 变换; 暂降起止时刻; 基频差分平方向量

**中图分类号:** TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8930(2014)07-0028-06

## Voltage Sag Starting-ending Moment Detection Based on Improved S-transform

WANG Yang, XU Fang-wei, CHEN Li-pin, XIAO Xian-yong

( College of Electrical Engineering and Information Technology,  
Sichuan University, Chengdu 610065 )

**Abstract:** Voltage sag starting-ending moment is an important characteristic. On the basis of analyzing improved S transform, the fundamental frequency vector and its difference squared vector of improved S transform are constructed to detect voltage sag starting-ending moment. Initially, the fundamental frequency vector is used to decide whether sag happens or not, then its difference squared vector is employed to detect the starting-ending moment of sag. According to fundamental frequency vector and sag starting-ending moment detection error curve the Gaussian window width of improved S transform can adaptively obtain better time-frequency resolution. The proposed method can detect sag starting-ending moment of different durations, waveform points and amplitudes with highee precision. Simulated and practical signals validate the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** voltage sag; improved S transform; sag starting-ending moment; difference squared vector of fundamental frequency;

电压暂降(voltage sag)也称电压凹陷、电压跌落或电压下跌, 是指供电电压的均方根值在短时间内突然下降后又自动恢复的事件, 典型持续时间为 0.5~30 个周波<sup>[1]</sup>。用户设备供电侧的电压暂降可能造成巨大经济和产品损失。据统计, 电压暂降发生的频次高, 其损失已远超过停电损失, 被认为是最严重的暂态电能质量问题<sup>[2]</sup>。不同起止时刻(对应不同波形点)、不同持续时间的暂降对用户的影响程度不同<sup>[3]</sup>。因此, 在暂降分类、定位与补偿过程中, 均需准确检测暂降起止时刻等特征量。

目前常见的电压暂降起止时刻检测方法有均

方根 RMS(root mean square)法、数学形态学、小波变换和 S 变换等。RMS 法采用 1 个周波的电压数据计算每个采样点的 RMS 值, 易出现较大检测误差; 数学形态学结构元素难以合理选取, 且抗噪性能弱, 当扰动较小时, 无法有效检测<sup>[4-5]</sup>; 小波通过寻找信号的奇异点来检测暂降, 但小波系数易受噪声和低频分量影响, 且暂降发生在过 0 点附近时, 信号几乎连续, 无幅值突变, 奇异性很小, 难以有效检测<sup>[6-7]</sup>; S 变换因其良好的时频分析能力, 能提取任意频率分量特征等, 被认为是检测电压暂降的最有效方法之一。暂降信号是具有突变特性的非

平稳信号,在幅值突变的同时会产生较宽频带的暂态分量,因此表征信号时频分布的 S 模矩阵在其高频会有突变。文献[8-10]利用 S 变换各特征量极值点对暂降进行检测,但仍对噪声敏感,且极值大小依赖于暂降信号有无幅值突变。暂降体现为扰动期间信号基频幅值发生变化,直接分析基频特征量应会得到更好结果;文献[11]采用 S 变换基频差分向量极值点检测暂降起止时刻,基频差分向量基于信号基频幅值向量突变趋势的原理,一定程度上克服了暂降幅值突变量和噪声对起止时刻检测的影响,但由于时间分辨率不足,当检测暂降持续时间小于 3 周波的暂降时,检测结果存在较大误差,且由于其基于差分原理,噪声等扰动也会使基频差分向量产生极值点,造成暂降的误判。

在分析现有方法不足的基础上,本文提出改进 S 变换基频幅值向量和基频差分平方向量相结合的暂降检测方法。通过改进 S 变换基频幅值向量判断是否发生暂降,以避免暂降的错误检测。通过调节改进 S 变换时频分辨率,确定最优窗宽系数,使改进 S 变换基频向量能更准确判定暂降,基频差分向量能更准确刻画基频幅值向量的幅值突变趋势,减小检测误差。将基频差分向量取平方,提高其噪声鲁棒性和定位能力。通过实测信号和目前的检测方法进行了比较,验证了所提方法的优势。

## 1 改进 S 变换

S 变换由 Stockwell 等于 1996 年提出<sup>[12]</sup>,结合了小波变换和短时傅里叶变换的优点。连续 S 变换可表示为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi f t} dt \quad (1)$$

式中:  $t$  为时间;  $f$  为频率;  $i$  为虚数。S 变换中高斯窗函数为

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

式中:  $\tau$  为高斯窗函数的中心位置;  $\sigma$  为高斯函数标准差,改变  $\sigma$  的值可调节高斯窗的宽度,在 S 变换中  $\sigma = 1/f$ 。在高斯窗中引入调节因子  $p$ ,得到改进 S 变换,即

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|^p}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^p}{2}} e^{-i2\pi f t} dt \quad (3)$$

改进 S 变换具有更灵活的窗函数,此时  $\sigma = 1/f^p$ ,故调节  $p$  值可改变 S 变换时频分辨率,以达

到更优检测结果。图 1 给出了同一频率不同  $p$  值的归一化高斯窗。 $p = 1.0$ , 对应标准 S 变换;  $p = 0.5$ , 时域内有更宽的高斯窗,频率分辨率更高;  $p = 1.5$ , 时域内有更窄的高斯窗,时间分辨率更高。

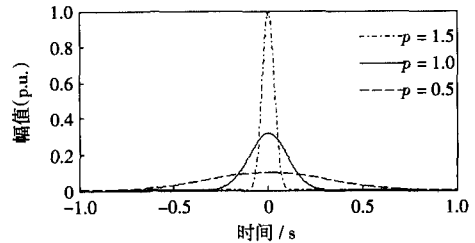


图 1 不同  $p$  值的归一化高斯窗

Fig.1 Normalized Gaussian window for different  $p$

由卷积定理可得,时域卷积在频域体现为乘积,将式(3)与傅里叶变换结合,可利用快速傅里叶变换实现其快速计算,即

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^p}} e^{i2\pi \alpha \tau} d\alpha \quad (4)$$

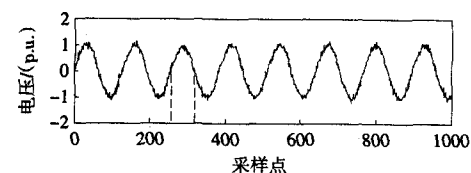
式中:  $H(\alpha + f)$  为  $h(t)e^{-j2\pi f t}$  的傅里叶变换谱;  $\alpha$  为平移频率,控制频域中高斯窗在频率轴上的移动。令  $f \rightarrow n(NT)$ ,  $\tau \rightarrow jT$ , 得到离散信号  $h(kT)$  的改进 S 变换离散,即

$$\begin{cases} S(jT, \frac{n}{NT}) = \sum_{m=0}^{N-1} H(\frac{m+n}{NT}) e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^p}} e^{i2\pi mn/N} & n \neq 0 \\ S(jT, 0) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h(\frac{m}{NT}) & n = 0 \end{cases} \quad (5)$$

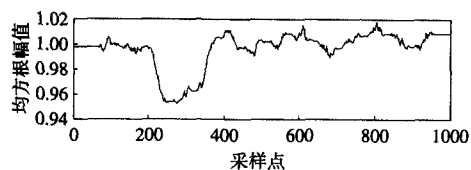
式中:  $T$  为采样间隔;  $N$  为总采样点数;  $j, m, n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。信号  $h(kT)$  的 S 变换结果是一个复时频矩阵(S 矩阵), S 矩阵的列向量表示某一时刻上各个频率的分布情况,行向量表示某一频率成分随时间的变化情况。

## 2 现有暂降检测法比较

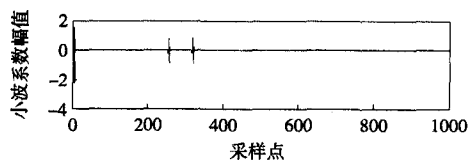
采用 Matlab7.8 仿真故障引起的一次暂降波形,数学模型采用文献[13]中的模型。采样频率 6.4 kHz,每周波采样 128 点。生成暂降幅值为 0.9 p.u. 的故障信号,暂降起止时刻均设定在正弦信号过零处,即采样点 256(40 ms)和 320(50 ms),并加入 20 dB 高斯白噪声。此信号暂降持续时间仅为 0.5 倍周波且幅值突变量小,检测难度很大。分别用 RMS 值、连续小波变换及 S 变换特征量对暂降信号进行检测,其检测波形如图 2 所示。



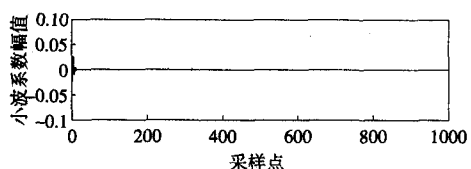
(a) 故障引起的一次暂降电压波形



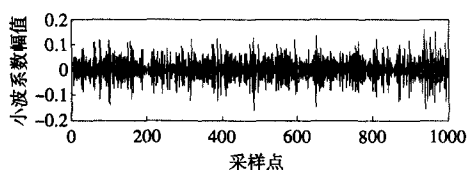
(b) 暂降信号 RMS 值



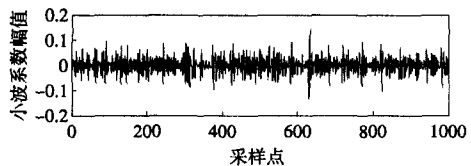
(c) 无噪声下第 1 尺度小波系数分布



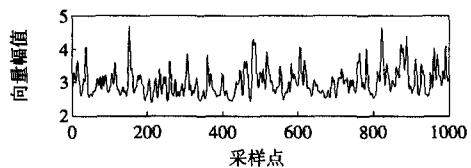
(d) 无噪声下第 2 尺度小波系数分布



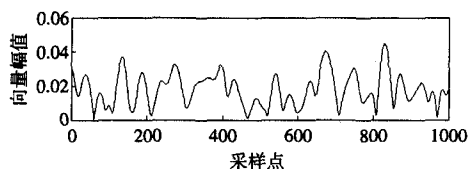
(e) 20 dB 噪声下第 1 尺度小波系数分布



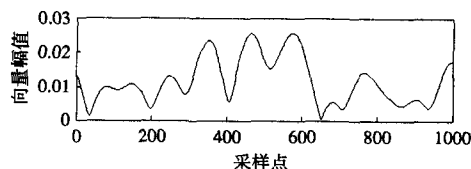
(f) 20 dB 噪声下第 2 尺度小波系数分布



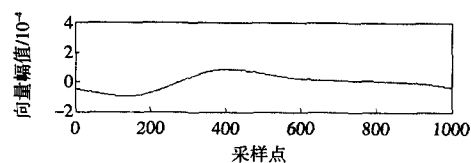
(g) S 变换幅值平方和向量



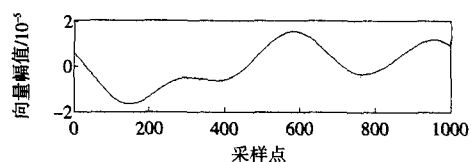
(h) S 变换 10.5 倍基频向量



(i) S 变换 2 倍基频向量



(j) S 变换基频差分向量



(k) 正常信号 S 变换基频差分向量

图 2 暂降信号检测方法比较

Fig.2 Sag signal detection method comparison

## 2.1 RMS 值

信号 RMS 值采用 1 个周波的滑动采样值计算,如图 2(b)所示。可见由于 RMS 值是 1 个周期的平均值,当暂降持续时间短时,难以通过设置有效的 RMS 阈值来检测暂降。

## 2.2 小波变换

小波变换具有良好的时频局部特性,对信号奇异点敏感,采用 dB4 小波对信号进行离散小波变换,无噪声情况下第 1 尺度和第 2 尺度小波系数见图 2(c)和(d),加入 20 dB 噪声后第 1 尺度和第 2 尺度小波系数见图 2(e)和(f),可见当暂降发生在过零点时,小波模极大值较小,且小波系数受噪声影响较大。

## 2.3 S 变换非基频特征量

S 变换模矩阵幅值平方和向量<sup>[8]</sup>、10.5 倍基频向量<sup>[9]</sup>、2 倍基频向量<sup>[10]</sup>分别见图 2(g)~图 2(i),可见非基频特征量受噪声和暂降幅值突变量影响大,湮没突变峰值。

## 2.4 S 变换基频特征量

图 2(j)给出了文献[11]所提 S 变换基频差分向量,其检测到暂降起止时刻为采样点 151 和 402,即 23.59 ms 和 62.81 ms,与理论值误差较大。图 2(k)给出了 20 dB 噪声下正常正弦信号的基频差分向量,基频差分向量因噪声扰动产生了极值点。

### 3 电压暂降起止时刻检测

#### 3.1 改进 S 变换调节因子和暂降触发阈值选取

由第2节可知, RMS 值、dB4 小波变换及 S 变换非基频向量均不是检测暂降起止时刻的有效方法。而 S 变换基频差分向量在此情况下检测误差较大, 本文对其进行改进。在 20 dB 噪声下生成 0.9 p.u. 的暂降信号, 暂降起止时刻均设定在正弦信号过零处, 即采样点 256(40 ms) 和 320(50 ms) 采用改进 S 变换基频差分向量对其进行检测, 其基频差分向量  $D(f_0, k)$  为

$$D(f_0, k) = A(f_0, k) - D(f_0, k-1) \quad (6)$$

式中:  $k = 1, 2, \dots, N-1$ ;  $A(f_0, k)$  为基频幅值向量;  $f_0 = 50$  Hz。

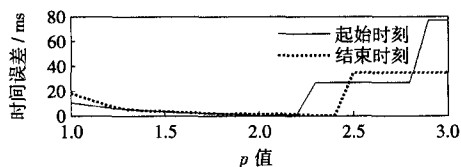
增大改进 S 变换高斯窗调节因子  $p$  值以增大时间分辨率,  $p$  值的增大一是减小检测误差, 即  $D(f_0, k)$  极值检测到暂降起止时刻与理论起止时刻误差; 二是减小  $A(f_0, k)$  从正常段下降到最小值的过渡时间<sup>[14]</sup>。但  $p$  值过度增大, 即时间分辨率过高, 低频率分辨率会使噪声条件下无法从信号中有效提取基频分量, 以致错误检测。

选择  $p = 2.05$  作为改进 S 变换的窗宽因子, 原因在于决定改进 S 变换时频分辨率的主要因素是暂降持续时间, 暂降持续时间越短的信号, 其特征值就越难检测, 对改进 S 变换时间分辨率要求就越高。故选取强噪声下暂降持续时间最短为 0.5 倍周波的信号进行测试, 测试结果如图 3 所示。由于暂降幅值低且受噪声影响,  $D(f_0, k)$  出现一定波动, 因噪声幅值较小, 取平方可减小其所占比例, 提高其平直性及定位能力。故采用基频幅值差分平方向量, 但保留差分向量的正负性, 以识别暂降的起止时刻。改进 S 变换基频差分平方向量  $SD(f_0, k)$  定义为

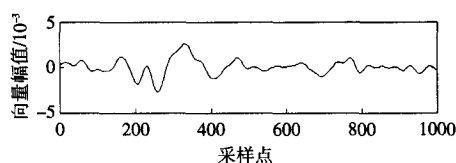
$$\begin{cases} SD(f_0, k) = D^2(f_0, k) & D(f_0, k) > 0 \\ SD(f_0, k) = -D^2(f_0, k) & D(f_0, k) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

信号  $SD(f_0, k)$  波形如图 3(d) 所示, 可见其受噪声影响小, 定位能力强, 此时  $SD(f_0, k)$  更准确检测到信号暂降起止时刻分别为采样点 261 和 334, 即 40.78 ms 和 52.19 ms。而对于未知信号, 应先通过改进 S 变换  $A(f_0, k)$  的幅值判断是否发生暂降, 对于持续时间长的暂降信号, 能提供  $A(f_0, k)$  更长的下降过渡时间, 而持续时间短的暂降能提供  $A(f_0, k)$  下降到信号暂降幅值的过渡时间少,  $A(f_0, k)$  达到信号理论暂降幅值的难度大。故选择

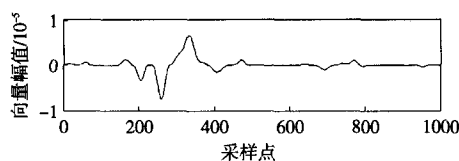
图 3(a) 最短为 0.5 倍周波的暂降信号为基准验证  $A(f_0, k)$  有效性, 其  $A(f_0, k)$  如图 3(e) 所示, 可见虽然由于不确定原理的约束,  $A(f_0, k)$  难以准确描述信号的幅值变化规律<sup>[14-15]</sup>, 但  $p = 2.05$  的时间分辨率能使  $A(f_0, k)$  达到暂降信号的理论幅值。而本文仅是用  $A(f_0, k)$  判断是否发生暂降, 故设置 0.9 p.u. 的阈值足以对暂降进行有效触发。



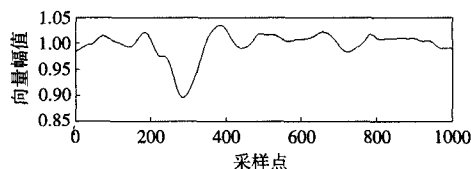
(a) 不同  $p$  值改进 S 变换暂降起止时刻检测误差



(b) 改进 S 变换基频差分向量



(c) 改进 S 变换基频差分平方向量



(d) 改进 S 变换基频向量

图 3 改进 S 变换暂降起止时刻检测

Fig.3 Improved S transform sags starting-ending moment detection

#### 3.2 暂降检测步骤

暂降起止时刻检测步骤如下。

(1) 改进 S 变换提取测试信号  $A(f_0, k)$ , 取  $A(f_0, k)$  最小值以判断是否发生暂降。若其触发 0.9 p.u. 阈值则认为发生暂降(但还需检测持续时间); 否则结束。

(2) 由  $A(f_0, k)$  求得  $D(f_0, k)$  及  $SD(f_0, k)$ , 进行暂降起止时刻检测。

### 4 仿真和实测暂降验证

#### 4.1 理想暂降仿真

Matlab7.8 分别生成 20 dB 噪声下暂降幅值为 0.9 p.u. 和 0.1 p.u. 的信号, 暂降持续时间从 0.5 倍

周波以 0.125 倍周波的步长增大到 9 倍周波, 文献 [11] 的方法检测暂降起止时刻与理论暂降起止时刻的误差如图 4(a) 和 (c) 所示, 可见其存在一定检测误差, 尤其在暂降持续时间小于 3 倍周波时, 误差随持续时间减少而迅速增大。图 4(b) 和 (d) 给出了本文改进 S 变换  $SD(f_0, k)$  检测暂降起止时刻与理论暂降起止时刻的误差, 可见本文改进 S 变换的  $SD(f_0, k)$  能对不同持续时间和幅值的暂降波形进行更准确有效地检测, 另外, 暂降幅值为 0.9 p.u. 的信号检测误差相对于暂降幅值为 0.1 p.u. 的信号检测误差较大, 这是由于暂降幅值浅的信号幅值突变趋势小, 其  $SD(f_0, k)$  相对受噪声影响更大。经实验, 在 30 dB、40 dB 噪声下, 信号受噪影响更小, 所提方法同样具有有效性。

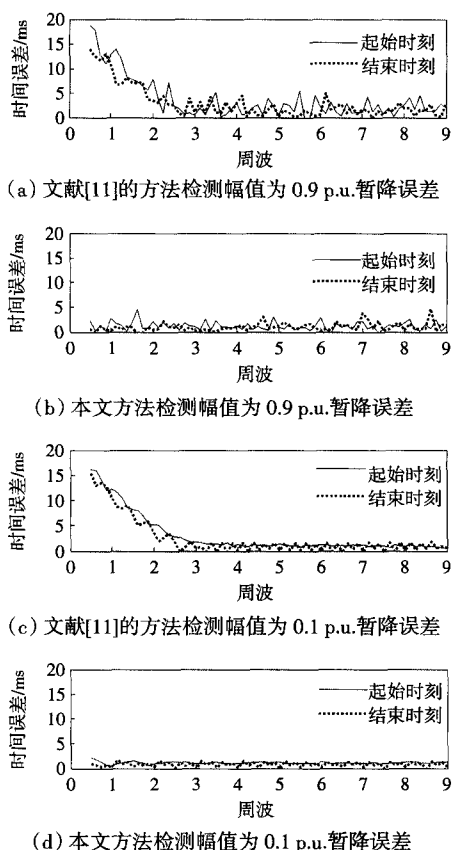


图 4 不同持续时间和幅值信号检测结果

Fig.4 Detection results of signals with different durations and amplitudes

## 4.2 实测暂降验证

对实测信号进行分析, 数据来源于 IEEE Project Group 1159.2。信号采样频率 15 360 Hz, 60 Hz 信号即每周波 256 点, 获得暂降波形如图 5(a) 所示, 波形中含有大量高频分量, 且故障清除后波形未立即回到正常幅值。小波分析结果如图 5(b)

和 (c) 所示, 可见小波并不擅长检测低频扰动, 也易受噪声和低频分量影响。RMS 值阈值取 0.9 p.u., 结果如图 5(d) 所示, 因故障清除后波形只恢复到接近正常幅值的 0.9 p.u., RMS 只检测出了暂降的起始时刻。改进 S 变换  $A(f_0, k)$  结果如图 5(e) 所示,  $SD(f_0, k)$  如图 5(f) 所示。将 RMS 和改进 S 变换  $SD(f_0, k)$  的检测结果用虚线标注在图 5(a) 中, 显然  $SD(f_0, k)$  对暂降起止时刻的检测更加准确。这里也说明了  $SD(f_0, k)$  特点,  $SD(f_0, k)$  检测的是基频分量的突变点, 即故障发生和清除的时刻, 此法适用于幅值瞬时变化的矩形暂降, 对幅值逐渐变化

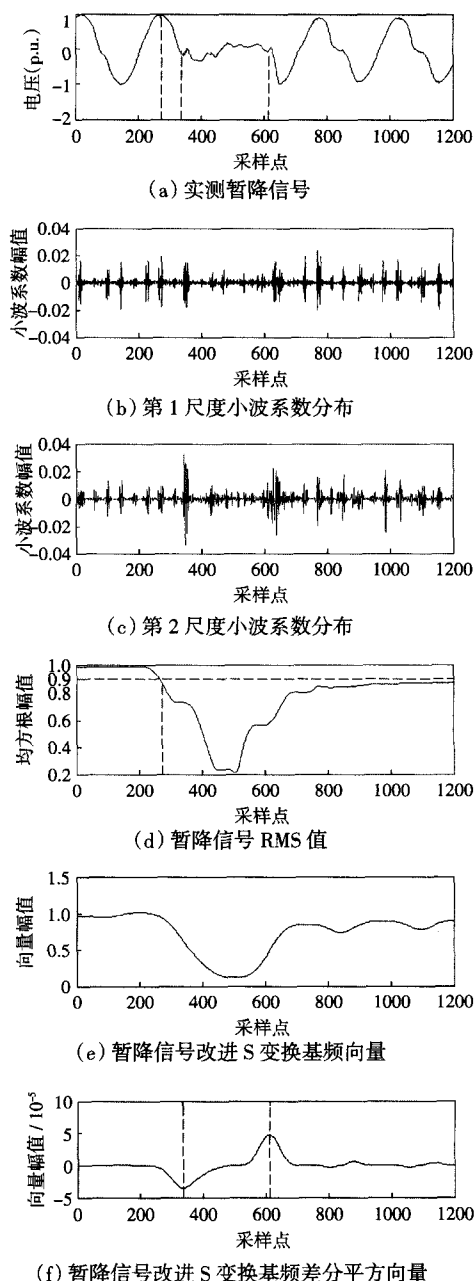


图 5 实测暂降信号

Fig.5 Practical sag signal

的非矩阵暂降是不适用的。

## 5 结论

(1) 噪声等扰动也会使基频差分向量产生极值点, 通过基频幅值向量判断信号是否发生暂降可避免基频差分向量对暂降的误判。

(2) 改进 S 变换在 S 变化的基础上优化了窗函数, 通过强噪声下持续时间 0.5 倍周波的信号起止时刻检测误差, 确定了改进 S 变换更优的时频分辨率。基频差分平方向量加强了基频差分向量的平直性和定位能力。

(3) 此方法对单一暂降的检测能达到较好效果, 但使其在一个检测窗口内能有效检测多个暂降还需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] IEEE Std 1159-1995, IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality[S].
- [2] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海, 等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] Djokic S Z, Milanovic J V, Kirschen D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruptions, and undervoltage transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299-1307.
- [4] 欧阳森, 王建华, 陈德桂, 等 (Ouyang Sen, Wang Jianhua, Chen Degui, *et al.*). 一种基于数学形态学的电能质量信号快速定位方法 (A new fast disturbance location method based on mathematical morphology for power quality signal)[J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(19): 25-29.
- [5] 周林, 吴红春, 孟婧, 等 (Zhou Lin, Wu Hongchun, Meng Jing, *et al.*). 电压暂降分析方法研究 (Study of the voltage sag analysis methods)[J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2008, 34(5): 1010-1016.
- [6] 李天云, 陈晓东, 赵为红, 等 (Li Tianyun, Chen Xiaodong, Zhao Weihong, *et al.*). 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法 (Double wavelets measurements and classification of short duration power quality disturbances)[J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2003, 27(22): 26-30.
- [7] 石敏, 吴正国, 尹为民 (Shi Min, Wu Zhengguo, Yin Weimin). 基于双小波的短时电压波动信号检测 (Detection of short duration voltage variation signal based on double wavelet)[J]. 电网技术 (Power System Technology), 2005, 29(6): 17-21.
- [8] 全惠敏, 戴瑜兴 (Quan Huimin, Dai Yuxing). 基于 S 变换模矩阵的电能质量扰动信号检测与定位 (Detection and localization of power quality disturbances based on S-transform module matrixes)[J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2007, 22(8): 119-125.
- [9] 杨洪耕, 刘守亮, 肖先勇, 等 (Yang Honggeng, Liu Shouliang, Xiao Xianyong, *et al.*). 基于 S 变换的电压凹陷分类专家系统 (S-transform-based expert system for classification of voltage dips)[J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2007, 27(1): 98-104.
- [10] 付娟, 周汉勇, 姜勤 (Fu Juan, Zhou Hanyong, Jiang Qin). 基于 S 变换的暂态电能质量扰动检测与仿真 (Power quality detection and simulation using S-transform)[J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2009, 37(21): 86-89.
- [11] 易吉良, 彭建春, 谭会生 (Yi Jiliang, Peng Jianchun, Tan Huisheng). 采用不完全 S 变换的电能质量扰动检测方法 (Detection method of power quality disturbances using incomplete S-transform)[J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2009, 35(10): 2562-2567.
- [12] 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.
- [13] Youssef A M, Abdel-Galil T K, El-Saadany E F, *et al.* Disturbance classification utilizing dynamic time warping classifier[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 272-278.
- [14] 易吉良, 彭建春 (Yi Jiliang, Peng Jianchun). 电压凹陷的改进 S 变换检测方法 (Detection method of voltage sag using modified S-transform)[J]. 湖南大学学报: 自然科学版 (Journal of Hunan University: Natural Sciences), 2010, 37(10): 52-56.
- [15] 冯宇, 唐轶, 石延辉, 等 (Feng Yu, Tang Yi, Shi Yanhui, *et al.*). 电能质量分析与参数估计的研究方法综述 (Survey on research method of power quality analysis and parameter estimate)[J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSA), 2010, 22(3): 78-85.

## 作者简介:

汪 洋 (1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量监测和识别。Email: wangyangscu@qq.com

徐方维 (1978—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量分析与控制。Email: chuandaxufangwei@163.com

陈礼频 (1986—), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量分析与控制。Email: chenlipin235@163.com