

# 电能质量的 S 变换仿真\*

谷金宏, 刘琪, 程超会  
(河南师范大学, 河南 新乡 453007)

**摘要:**针对电能质量扰动信号的特征, 介绍了一种基于 S 变换的信号检测与分类的方法。该方法利用 S 变换模矩阵来检测电能质量扰动信号, 并对其进行分类。对影响电能质量的 8 种扰动信号(电压凹陷、电压隆起、短时中断、电压尖峰、电压缺口、谐波、间谐波和瞬态振荡)进行了仿真。仿真结果表明, 该方法可以准确地确定扰动发生时刻和持续时间, 能够对电能质量扰动信号进行简单、直观地分类。

**关键词:** 电能质量扰动, S 变换, S 变换模矩阵, 短时傅里叶变换

**中图分类号:** TM933; TN911.72

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1390(2009)06-0051-05

## Simulation of Power Quality Using S-Transform

GU Jin-hong, LIU Qi, CHENG Chao-hui  
(Henan Normal University, Xinxiang 453007, Henan, China)

**Abstract:** According to the signal characteristics of power quality disturbances, a detection and classification method based on S-Transform is proposed. The S-transform module matrix is used to detect and classify power quality disturbance signal. Eight disturbance signals (voltage sag, voltage swell, momentary interruption, voltage spike, voltage notch, harmonic, inter-harmonic and oscillatory transients) which influence power quality have been simulated. The results show that the method can be used to localize the disturbance time and duration precisely and classify them simply.

**Key words:** power quality disturbance, S-transform, S-transform module matrix, short-time Fourier transform

### 0 引言

现代电力系统中, 电力电子设备的应用越来越广泛, 各种非线性、冲击性、波动性负载也大量增加, 使电力系统所遭受的电能质量污染也日趋严重。同时信息科技的发展则对电能质量及供电可靠性提出更高的要求。对电能质量进行监测和分析是发现电力质量问题并进行治理和改善的前提条件, 而如何从大量的电能质量扰动信号中自动提取特征并进行正确分类则是电能质量监测分析系统首先要解决的问题。

目前, 常用的电能质量扰动信号分析方法有短时傅里叶变换(STFT)和小波变换(WT)<sup>[1]</sup>。STFT 选取了不同时窗宽度的窗函数, 但对于任一个固定的窗函数, 时频窗不随时间和频率变化, 因而它不能随着要分析的信号成分为高频信息或低频信息而相应变化, 所以它只适合于分析平稳信号, 而不适合分析时变信号, 当然也就不能实现信号突变点的精确定位。

小波变换是一种比较新的时频分析方法, 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。但是小波变换也存在局限性, 它在检测高频扰动信号方面很有优势, 但对于低频扰动, 如电压暂降、电压暂升等, 却不好很好的检测和定位, 尤其在噪声环境下, 而且过程不够简便, 结果缺乏直观性。

S 变换是由连续小波变换(CWT)和短时傅里叶变换(STFT)结合发展起来的另一种时频分析方法<sup>[1]</sup>, 其引入了宽度与频率成反向变化的高斯窗, 具有与频率相关的分辨率。由于 S 变换具有很好的时频特性, 因而在很多领域中都被广泛应用<sup>[2,3]</sup>, 并且非常适合电能质量扰动信号的提取。本文利用 S 变换模矩阵的时频等值线图对常见的 8 种电能质量扰动信号(电压凹陷、电压隆起、短时中断、电压尖峰、电压缺口、谐波、间谐波和瞬态振荡)进行了仿真, 并与 STFT 在检测瞬时振荡信号进行比较。

\* 国家自然科学基金资助项目(10704060A040505)

# 1 S 变换的基本原理

## 1.1 一维连续S变换

S 变换由 R.G.Stockwell 于 1996 年提出，是一种可逆的局部时频分析方法，其思想是对连续小波变换和短时傅立叶变换的发展。信号  $x(t)$  的 S 变换  $S(t,f)$  定义如下：

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

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

式中  $w(\tau-t,f)$  为高斯窗口 (Gaussian Window)  $\tau$  为控制高斯窗口在  $t$  轴位置的参数。由式可以看出 S 变换不同于短时傅立叶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立叶变换窗口高度和宽度固定的缺陷。

信号  $x(t)$  可以由其 S 变换  $S(t,f)$  很好地重构，其 S 逆变换为：

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

S 变换可以看作是对连续小波变换的一种相位修正，并可以从连续小波变换推导而来。信号  $x(t)$  的连续小波变换可以定义如下：

$$W(\tau,d) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t-\tau,d) dt \quad (4)$$

式中  $d$   $\tau$  分别为伸缩参数和时移参数； $W(t-\tau,d)$  为母小波的伸缩时移变换。如果选取变换核为一高斯窗和一复向量的乘积，即：

$$w(t,f) = \frac{f}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2|f|}} e^{-j2\pi ft} \quad (5)$$

注意，此时伸缩参数  $d$  为频率  $f$  的倒数。

于是，信号  $x(t)$  的 S 变换式(1)可以表示为以式(5)作为变换核进行连续小波变换再乘上一个相位校正因子，即：

$$S(\tau,f) = e^{j2\pi f\tau} W(\tau,d) \quad (6)$$

## 1.2 一维离散S变换

对(1)右边先做传统的 Fourier 变换，再做 Fourier 反变换，最后进行变量代换，将 S 变换转换成信号  $x(t)$  的傅里叶反变换  $X(f)$  的函数，即：

$$S(\tau,f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(v+f) e^{\frac{-2\pi^2 v^2}{f}} e^{j2\pi v\tau} dv \quad f \neq 0 \quad (7)$$

对(7)式进行离散化，可以得到 S 变换的离散表示形式：

$$S[kT, \frac{n}{NT}] = \sum_{m=0}^{N-1} X[\frac{m+n}{NT}] e^{-\frac{-2\pi^2 m^2}{n}} e^{\frac{j2\pi mk}{N}} \quad (8)$$

$$S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(\frac{m}{NT}) \quad (9)$$

$$\text{其中 } X[\frac{n}{NT}] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} h(kT) e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (10)$$

式中  $k, m, n=0, 1, 2, \dots, N-1 (n \neq 0)$ 。

信号 S 变换时，频矩阵中元素的幅值为：

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

显然，时间序列  $x(t)$  的 S 变换结果是一个复时频矩阵，记为 S 矩阵，其行对应频率，列对应时间，将 S 矩阵各个元素求模后得到的矩阵记为 S 模矩阵<sup>[4]</sup>，其列向量表示信号某一时刻的幅值随频率变化的分布，其行向量表示信号某一频率处的幅值随时间变化的分布。因此 S 模矩阵某位置元素的大小就是相应频率和时间处信号 S 变换的幅值，S 变换的结果二维等高线图直观地表示。

## 2 基于 S 变换的电能质量仿真分析

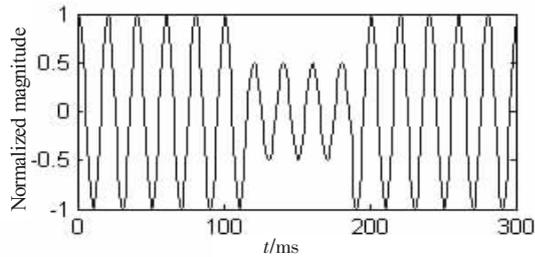
对经采样得到的电压信号进行离散 S 变换，得到变换结果 S 时频矩阵，然后对矩阵中的每个元素求其模平方，记为 S 模矩阵平方，再由 S 模矩阵平方绘制时频等值线图<sup>[5]</sup>。在图 1 至图 9 中，时频等值线图的横轴是时间，纵轴为频率，图中相同颜色的围线表示信号中具有相同幅值的频率成分的分布，也就是说，该图在反映信号时频分布的同时，也反映了信号不同频率成分的幅值分布情况。

对电能质量扰动信号的系统仿真分为两部分。第一部分考虑的电能质量扰动信号有：电压凹陷、电压隆起、短时中断、电压尖峰、电压缺口、谐波和间谐波。通过 Matlab 产生这些信号，采样频率是 1kHz，电压工频取 50Hz，取 15 个周波的波形数据。图 1~7 显示了电能质量的扰动波形和 S 变换的结果。S 变换的输出结果显示了给定电能质量扰动信号时频幅度曲线，从 S 变换时频幅度曲线上可以很准确的定位扰动发生的时刻<sup>[6]</sup>。

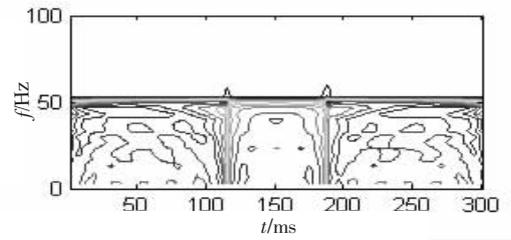
第二部分对瞬态振荡信号进行分析，在这一部分把 S 变换的结果和 STFT 变换的结果做了一个比较，结果显示，S 变换具有很好的检测时变信号的能力<sup>[7]</sup>。

### 2.1 各类电能质量的 S 变换分析

(1)电压凹陷：电压凹陷是指在工频条件下电压有效值减小到 0.1~0.9pu 之间且持续时间为 0.5 个周波到 1min 的短时电压变动现象。通常由电机启动或



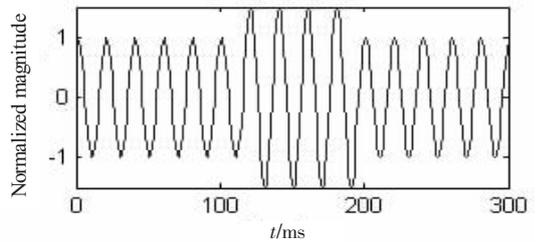
(a) 电压凹陷



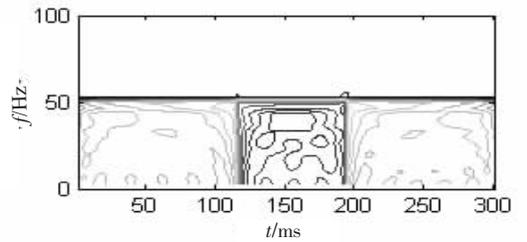
(b) S 变换等值线图

图 1 电压凹陷及 S 变换等值线图

Fig.1 Voltage sag and S-transform contour.



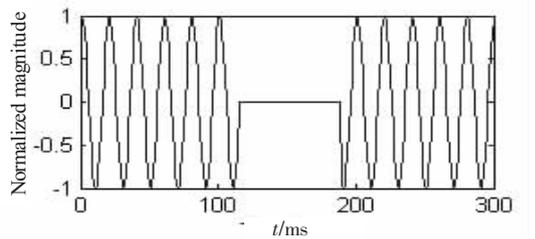
(a) 电压隆起



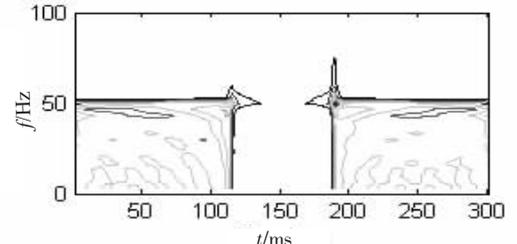
(b) S 变换等值线图

图 2 电压隆起及 S 变换等值线图

Fig.2 Voltage swell and S-transform contour



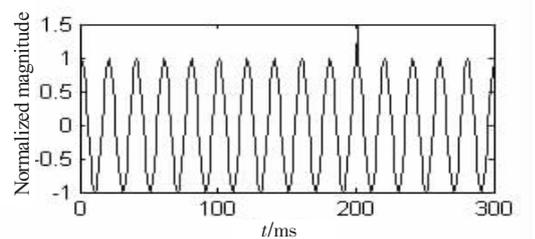
(a) 电压中断



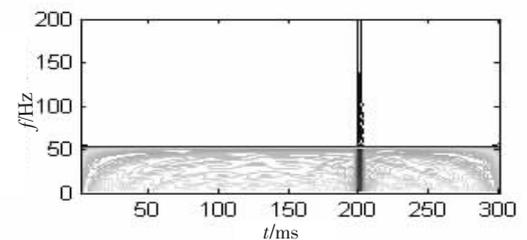
(b) S 变换等值线图

图 3 电压中断及 S 变换等值线图

Fig.3 Voltage interruption and S-transform contour



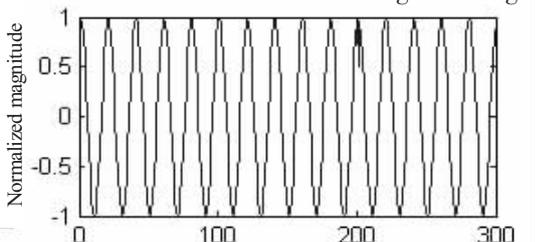
(a) 电压尖峰



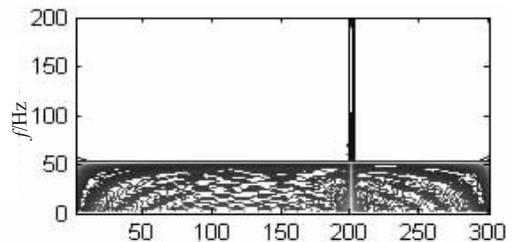
(b) S 变换等值线图

图 4 电压尖峰及 S 变换等值线图

Fig.4. Voltage spike and S-transform contour



(a) 电压缺口



(b) S 变换等值线图

图 5 电压缺口及 S 变换等值线图

Fig.5 Voltage notch and S-transform contour

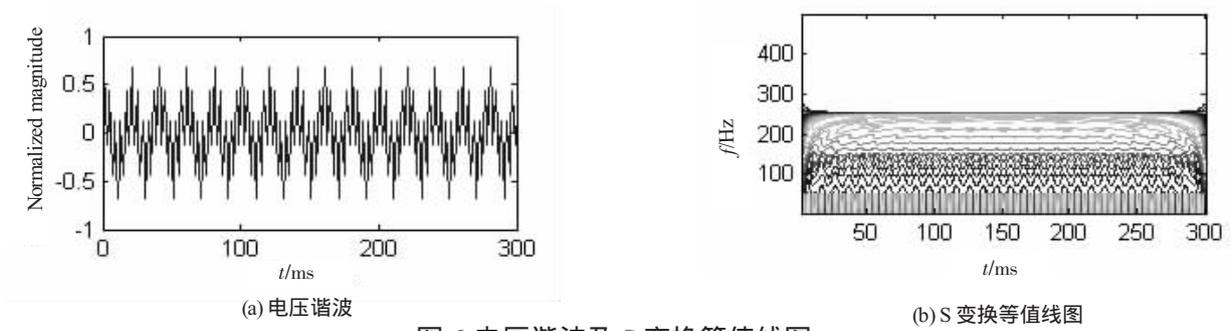


图 6 电压谐波及 S 变换等值线图

Fig.6 Voltage harmonics and S-transform contour

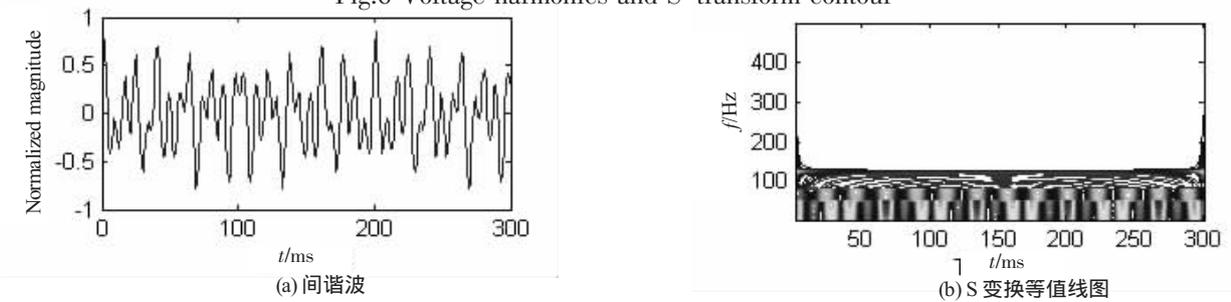


图 7 间谐波及 S 变换等值线图

Fig.7 Inter-harmonic and S-transform contour.

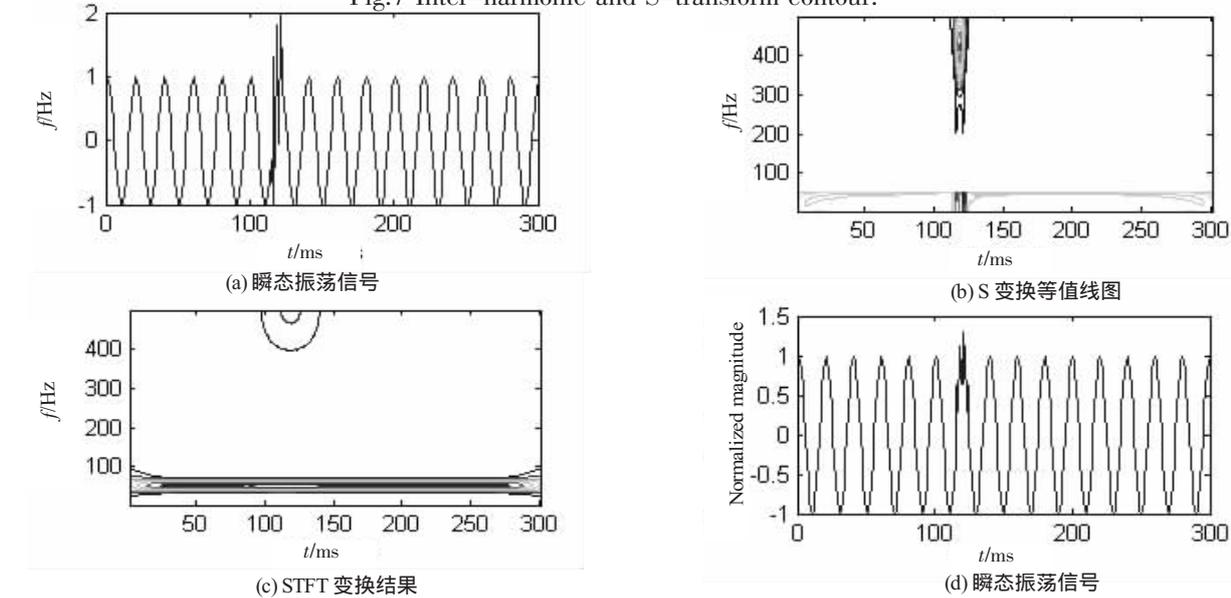


图 8 瞬态振荡信号以及 S 变换和 STFT 变换结果

Fig.8 Oscillatory transients S-transform contour and STFT

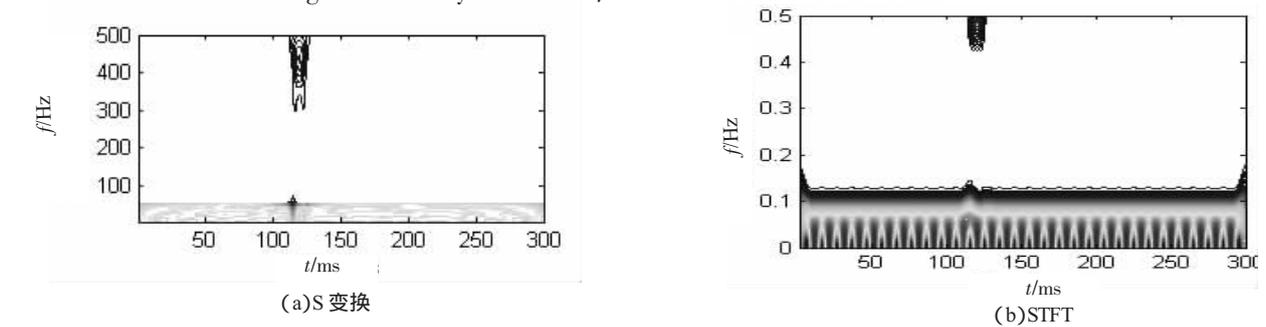


图 9 瞬态振荡信号以及 S 变换和 STFT 变换结果

Fig.9 Oscillatory transients S-transform contour and STFT

者远端发生故障所引起的。图 1(b)显示了幅度凹陷 50% 的电压信号的 S 变换的时频等值线图。从图(b)上可以看出,在扰动发生时刻有两个尖峰突起,并且尖峰之间围线的颜色明显不一样,幅度有明显地衰减。由此可以大致地判断出扰动发生的时刻、持续时间、幅度的变化和扰动的类型。另外通过给信号加 SNR 为 30dB 的随机噪声,可以发现 S 变换具有很好的抗噪声干扰的能力。

(2)电压隆起:电压隆起是指在工频条件下电压有效值增加到 1.1-1.8pu 之间且持续时间为 0.5 个周波到 1min 的短时电压变动现象。图 2(b)显示了幅度隆起 50% 的电压信号的 S 变换的时频图,与图 1(b)类似,可以从 S 变换的时频等值线图中检测扰动发生的时刻和对其进行分类。

(3)短时断电:短时断电是指供电电压或者负荷电流减少至 0.1pu 且持续时间不超过 1min 的短时电压变动现象。从图 3(b)S 变换的时频图可以清楚地看出扰动持续时间。并且在持续时间内电压中断,所以也很明显地能判断出扰动发生的时刻、扰动持续时间和电能质量扰动信号的类型。

(4)电压尖峰和电压缺口:是指持续时间比电压凹陷和电压隆起短的瞬时振荡现象。图 4(b)和图 5(b)信号的 S 变换时频图中可以确定扰动发生的时刻大致在 200ms,并且从围线不同的颜色可以对电能质量扰动类型进行大致判别。

(5)谐波:谐波是指含有基波整数倍频率的正弦波电压或电流称为谐波,产生畸变后的波形可分解为基波和许多谐波分量之和。谐波是由于电力系统和电力负荷中的非线性特性造成的。图 6 的谐波是由基波的 3 倍频和 5 倍频组成。从图 6(b)信号 S 变换的时频图中可以清晰地看出谐波的频率成分是 150Hz 和 250Hz,由此可以判断该信号的扰动类型。

(6)间谐波:间谐波是指含有基波的非整数倍频率的电压和电流称为间谐波。其主要是由静止变频器、循环换流器、感应电动机和电弧发生装置所引起的。图 7 的间谐波是由基波的 1.5 倍频和 2.5 倍频组成。从图 7(b)信号经 S 变换的时频图中可以清晰地看出间谐波的频率成分是 75Hz 和 125Hz,由此可以判断该信号的扰动类型。

从第一部分所给的例子中,可以明显地知道,电能质量扰动信号经 S 变换后产生的等值线图非常适合对信号进行简单视觉的检测,从而对信号进行分类。而小波变换对电压凹陷、电压隆起、短时中断信号变换后产生的图形几乎是一样的,很难从视觉上判

断。对 S 变换的结果进行特征提取再配合简单的规则或者神经网络或者支持向量机<sup>[8]</sup>可对电能质量扰动信号进行进一步准确的分类。

## 2.2 瞬态振荡信号的仿真

瞬态振荡电压信号主要由电容器组的投切、闪电电击线路、感性电路开合引起的。图 8(a)、图 9(a)是瞬态振荡信号,图 8(b)、图 9(b)和图 8(c)、图 9(c)分别是对信号做 S 变换和 STFT 变换后的时频图,通过对几个图作比较可以得出 S 变换可以准确地定位扰动发生的时刻,而 STFT 因其窗函数的大小和宽度固定不变,所以只能检测扰动信号的发生,却对扰动信号发生时刻的定位不准确。

## 3 结论

提出了用 S 变换对电能质量扰动进行检测、定位和分类的方法。利用 S 变换模矩阵的时频曲线对几种常见的电能质量扰动信号(电压凹陷、电压隆起、短时中断、电压尖峰、电压缺口、谐波、间谐波和瞬态振荡)进行仿真,并与 STFT 在检测瞬时振荡信号进行比较,结果表明该方法能准确地定位扰动发生时刻、确定扰动持续时间。S 变换能够对电能质量扰动信号进行简单直观地分类。

## 参考文献

- [1] R. G. Stockwell, L. Mansinha, and R. P. Lowe, Localization of the complex spectrum: The S-transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44: 998-1001.
- [2] R.G. Stockwell, A basis for efficient representation of the S-transform, Science Direct. Digital Signal Processing, 2007, 17: 371-393.
- [3] 刘传武,张智军,毕笃彦. S 变换在雷达目标识别中的应用[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(12): 3290-3292.
- LIU Chuan-wu, ZHANG Zhi-jun, BI Du-yan. Radar Targets Recognition Using S Transform [J]. Journal of System Simulation, 2008, 12 (20): 3290-3292.
- [4] 全惠敏,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): 120-126. 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): 120-126.
- [5] 杨洪耕,刘守亮,肖先勇. 利用 S 变换时频等值线图与幅值包络向量实现电压凹陷的分类[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 75-76. YANG Hong-geng, LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong. Classification of Voltage Dips Using Time-Frequency Contour and Amplitude Envelope Vectors by S-Transform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 75-76.
- [6] P. K. Dash, B. K. Panigrahi, and G. Panda, Power Quality Analysis Using S-Transform [J], IEEE Trans. Power Del. 2003, 18: 406-411.
- [7] Fengzhan Zhao, Rengang Yang, power-Quality Disturbance Recognition Using S-transform [J], IEEE Trans. (下转第 62 页)



图3 2007年8月—2008年8月,金欢喜小区的月线损率  
Fig.3 Shows the August 2007 – August 2008, the monthly line loss rate of JinHuanXi area



其中红色为关口考核表总电量,绿色为计费表总电量

图4 2007年8月—2008年8月河口小区关口考核表总电量与计费表总电量的对比图

Fig.4 Shows comparison chart of HeKou area's assessment meter's total electric quantity and billing meter's total electric quantity in August 2007 – August 2008

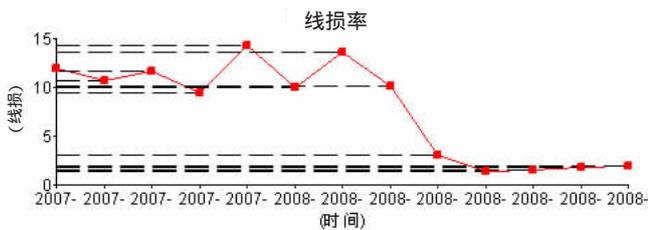


图5 2007年8月—2008年8月,河口小区的月线损率  
Fig.5 Shows the August 2007 – August 2008, the monthly line loss rate of HeKou area

安装防窃电电表可带来20%的线损降低,该小区月均供电量34408千瓦时,经测算全年可追回电量82579千瓦时,折算电费约为38341.24元。

工商管理河口小区,安装单相防窃电电能表245台,截至8月份,线损分析的跟踪数据如图4、图5所示。

可以看出,自从2008年3月安装了单相防窃电电能表以来,该小区线损率从10%左右逐渐降至2%以下,安装完毕之后降低幅度较明显,与去年同期相比,线损率也有了显著的降低。该小区月均供电量78918千瓦时,经测算全年可追回电量75761千瓦时,折算电费约为35175.85元。

#### 4 结束语

从试点的线损数据分析可以看出,安装了防窃电表的各个小区用户的线损率基本都有下降且效果十分明显,效果十分明显,从中可以看出由于居民集中小区线路进出清晰便于巡查,在线路上进行窃电容易被查出,居民集中小区的窃电多是在电能表上非法操作来达到窃电的目的。因此,通过表计进行反窃电效果较好。从近六个月的电量分析可以看出,防窃电电表在降低线损以及防止集中小区居民窃电方面具备良好的有效性以及先进性。

#### 参考文献

- [1] GB/T17215 – 2002, 1级和2级静止式交流有功电度表[S].
- [2] DL/T645 – 1997, 多功能电能表通讯规约[S].
- [3] JJG596 – 1999, 电子式电度表检定规程[S].
- [4] GB/T17626–1998, 电磁兼容试验和测量技术[S].

#### 作者简介:

邵强(1972–),男,福建福州人,汉族,工程师,主要从事电力系统计量技术管理工作及计量方面的研究。Email:Shaqiang@tom.com  
李丹(1966–),女,贵州遵义人,汉族,工程师,主要从事电力系统计量管理工作及计量方面的研究。  
刘晓湘(1980–),女,福建福州人,汉族,主要从事电力系统计量工作及计量方面的研究。

收稿日期 2008-12-04

(田春雨 编发)

(上接第 55 页)

Power Del. 2007, 22:944–951.

[8]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).

ZHAN Yong, CHENG Hao-zhong, DING Yi-feng. S-Transform Based Classification of Power Quality Disturbance Signals By Support Vector Machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4).

#### 作者简介:

谷金宏(1965–),男,汉族,河南新乡人,河南师范大学特聘教授,博士,

主要研究方向为信号处理,大规模集成电路应用,医学超声成像等  
Email: gujinhong@htu.cn.

刘琪(1982–),女,汉族,河南通许人,硕士研究生,主要研究方向为信号处理。

程超会(1986–),男,汉族,河南嵩县人,硕士研究生,主要研究方向为信号处理。

收稿日期 2009-02-10

(杨长江 编发)