

离散正交 S 变换在电能质量扰动检测中的应用

王宇¹, 赵庆生¹, 郭贺宏², 王振起², 张学军³

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 国网晋中供电公司, 山西 晋中 030600;
3. 山西大学, 山西 太原 030006)

摘要: 为了准确检测电能质量扰动信号的起止时刻, 提出了基于离散正交 S 变换的扰动信号检测方法。在传统 S 变换的基础上, 结合快速傅立叶变换对信号进行离散化处理, 而后引入频带中心、频带宽度和时间变量对算法进行改进。构造基函数向量得到离散正交 S 变换系数矩阵, 最终找到变换矩阵系数的突变点, 从而检测出扰动信号的起止时刻。将该方法的分析结果与传统 S 变换的分析结果进行比较, 结果表明离散正交 S 变换可准确有效地检测出扰动信号的起始和终止时刻。

关键词: 电能质量; 离散正交 S 变换(DOST); 系数矩阵; 基函数向量; 扰动时刻检测

Application of discrete orthonormal S-transform in detection of power quality disturbances

WANG Yu¹, ZHAO Qingsheng¹, GUO Hehong², WANG Zhenqi², ZHANG Xuejun³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. State Grid Jinzhong Electric Power Company, Jinzhong 030600, China; 3. Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Power quality disturbance signal detection method based on discrete orthonormal S-transform is proposed to detect the begin-end moment of disturbance signal accurately. Based on the traditional S-transform, this paper discretizes the signal combined with the fast Fourier transform, then introduces band center, frequency bandwidth and time variables to improve the algorithm, constructs the basis function vectors to obtain the discrete orthonormal S-transform (DOST) coefficient matrix, finally detects the disturbance moment of the disturbance signal by finding the catastrophe point of the discrete orthonormal S-transform coefficient matrix. The analysis results of this method are compared with that of traditional S-transform through simulation experiment. Results show that the DOST method can detect the begin-end moment of the disturbance signal precisely and effectively.

This work is supported by Research Fund Project for Overseas Returnees of Shanxi Province (No. 2010-34) and State Grid Project of Shanxi Electric Power Company (Shanxi Power Development [2014]No.88).

Key words: power quality; discrete orthonormal S-transform (DOST); coefficient matrix; basis function vector; disturbance moment detection

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0093-05

0 引言

随着新能源发电、逆变器并网^[1]、光伏并网^[2-3]等技术的发展, 电能质量问题也日益凸显并受到广泛关注。诸多电能质量问题当中, 复杂的电能质量扰动信号首当其冲。大量的电力电子器件和非线性元件的使用会产生扰动信号, 准确快速检测出这些

扰动信号的起始时刻, 对于保证和提高电能质量来说至关重要^[4]。短时傅立叶变换(STFT)^[5]、小波变换^[6]、卡尔曼滤波法是常见的分析检测电能质量扰动信号的方法。对于非静态信号, 短时傅立叶变换受限于窗函数的固定宽度而不能动态地检测信号的高频和低频成分; 小波变换通过可变的窗函数, 虽然能够比较有效地检测出非静态信号的频率成分, 但对于时域扰动信号(例如电压暂升、暂降)检测效果不佳^[7]; 卡尔曼滤波算法可应用于电力系统畸变信号的频率估计, 但由于卡尔曼增益和误差协方差

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(2010-34);
国网山西省电力公司科技项目资助(晋电发展[2014]88号)

阵数值小等原因, 导致算法无法直接计算频率, 对突变信号的响应速度也较慢^[8]。

S 变换^[9]是另外一种可以有效分析时频域信号的方法, 它类似于连续小波变换, 但相比于小波变换, S 变换参考绝对相位信息, 通过对时间参数的全部遍历大大提高频率分辨率。本文对 S 变换作离散化正交化处理, 得到离散正交 S 变换^[10], 并运用离散正交 S 变换对几种电能质量扰动信号进行分析处理, 提取有效参数, 检测电能质量扰动的起止时刻, 为电能质量扰动时刻检测提供了一种新的方法。

1 S 变换原理

1996 年, Stockwell 首次提出了 S 变换这一方法。不同于小波分析, 该方法参考绝对相位信息(即 $t=0$ 时的相位信息)对信号进行时频分解, 进而得到有价值的时频信息。信号 $h(t)$ 的 S 变换表达式为

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

式中: $h(t)$ 为原始信号; f 代表频率; t 和 τ 为时间变量; $\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-(\tau-t)^2 f^2/2}$ 为高斯窗函数部分, 同时也是频率敏感窗函数。对于高频段, 高斯窗宽度相对较窄; 对于低频段, 高斯窗宽度相对较宽。参数 τ 代表窗函数的中心, S 变换通过遍历尽可能多的 τ 值, 使得分析结果涵盖时间轴的部分增大, 因此也几乎覆盖各个频率段的各个频率, 大大提到了频率分辨率。

2 离散正交 S 变换原理

由于需要将信号中各个频率段所含的频率信息计算并表征出来, 将式(1)经过傅立叶变换得到式(2)^[11-12]。

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

式(2)中 $H(\alpha + f)$ 定义为

$$H(\alpha + f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi(\alpha+f)t} dt \quad (3)$$

下面为了验证式(2)和式(1)等价, 引用文献[13]中的公式

$$\int e^{-(ax^2+2bx+c)} dx = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left(\frac{b^2-ac}{a}\right) \operatorname{erf}\left(\sqrt{a}x + \frac{b}{\sqrt{a}}\right) \quad (4)$$

其中, $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 。

对于式(2)做适当变形, 得到

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi^2 \alpha^2 / f^2} e^{-2\pi i \alpha (t-\tau)} d\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-((2\pi^2 / f^2) \alpha^2 + 2\pi i (t-\tau) \alpha)} d\alpha \quad (5)$$

式(5)中的 $2\pi^2 / f^2$ 对应式(4)中的系数 a , $2\pi i (t-\tau)$ 对应式(4)中的系数 b , 系数 c 为零。将系数 a 、 b 、 c 代入式(4)得到

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi^2 \alpha^2 / f^2} e^{-2\pi i \alpha (t-\tau)} d\alpha &= \\ \int_{-\infty}^{\infty} e^{-((2\pi^2 / f^2) \alpha^2 + 2\pi i (t-\tau) \alpha)} d\alpha &= \\ \frac{1}{2} \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}\right) \operatorname{erf}\left(\sqrt{2} \frac{\pi}{f} \alpha + \sqrt{2} i (t-\tau) f\right) \Big|_{-\infty}^{\infty} &= \\ \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}\right) & \end{aligned} \quad (6)$$

而式(2)可以变形为

$$\begin{aligned} S(\tau, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-2\pi^2 \alpha^2 / f^2} e^{i2\pi \alpha \tau} d\alpha = \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi(\alpha+f)t} dt e^{-2\pi^2 \alpha^2 / f^2} e^{i2\pi \alpha \tau} d\alpha &= \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi(\alpha+f)t} e^{i2\pi \alpha \tau} dt e^{-2\pi^2 \alpha^2 / f^2} d\alpha &= \\ \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi^2 \alpha^2 / f^2} e^{-i2\pi \alpha (t-\tau)} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i2\pi ft} dt d\alpha & \end{aligned} \quad (7)$$

可以看出, 式(6)代入式(7)后, 与式(2)等价。

对式(2)做离散化处理, 根据信号 $h(t)$ 的 N 个采样点($t=0, 1, \dots, N-1$), 得到式(8)。

$$S(t, n) = \sum_{m=0}^{N-1} H(m+n) e^{-2\pi^2 m^2 / n^2} e^{i2\pi m t / N} \quad (8)$$

$$t = 0, \dots, N-1$$

离散正交 S 变换将 N 个点的时域信号变换为 N 个相互独立的点表征的时频信号, 因此最大限度地保留了信号中有效信息点的个数, 使得时频分辨率最大化。变化矩阵是正交矩阵, 意味着矩阵中的向量模值是唯一的。通过引入变量 ν (频率变量, 表示一个频带的中心)、 β (表示频带的宽度)和 τ (时间变量, 表示一个时间点)三个变量, 实现时频域内离散正交 S 变换的时频分辨率最大化。规定三个变量的取值: $\tau = 0, 1, \dots, \beta-1$; ν 和 β 的选取必须保证每个频率点使用一次而且只使用一次。为了满足上述规定, 并方便对 ν 、 β 和 τ 三个变量进行赋值, 我们引入变量 p 。

$$\begin{aligned}
 p &= 2, \dots, \log_2(N) - 1 \\
 v &= 2^{(p-1)} + 2^{(p-2)} \\
 \beta &= 2^{(p-1)} \\
 \tau &= 0, 1, \dots, 2^{(p-1)} - 1
 \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)的 v 、 β 和 τ 三个变量代入式(8), 并在其基础上构造 N 个离散正交 S 变换基函数向量, 第 k 个表达式为

$$S[k]_{[v, \beta, \tau]} = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \sum_{f=v-\frac{\beta}{2}}^{v+\frac{\beta}{2}-1} \exp(-i2\pi \frac{k}{N} f) \exp(i2\pi \frac{\tau}{\beta} f) \exp(-i\pi \tau) \quad (10)$$

进一步, 离散正交 S 变换的表达式为

$$S(\tau T, \frac{v}{NT}) = \sum_{k=0}^{N-1} h[kT] S[k]_{[v, \beta, \tau]} \quad (11)$$

综上所述, 离散正交 S 变换(DOST)算法步骤如下。

步骤 1: $h(t)$ 经过快速傅立叶变换, 得到频谱矩阵 $H(f)$ 。

步骤 2: 引入变量 p 、 v 、 β 和 τ , 对 p 赋值 $p = 2, \dots, \log_2(N) - 1$, 然后根据式(9)计算变量 v 、 β 和 τ 的值。

步骤 3: 将计算得到的 v 、 β 和 τ 代入式(10), 得到各个 DOST 基函数向量。

步骤 4: 步骤 1 得到的频谱矩阵 $H(f)$, 经过逆傅立叶变换后与步骤 3 得到的 DOST 基函数向量相乘, 根据式(11), 求出 DOST 系数矩阵。

步骤 5: 结合式(11), 根据 $h(t)$ 采样总点数 N , 得到 DOST 变换后的 $N \times N$ 离散正交 S 变换系数矩阵。

步骤 6: 步骤 5 得到的离散正交 S 变换系数矩阵, 根据系数矩阵中数值的大小, 绘制彩色图形。数值大小不同, 对应的颜色不同。

3 仿真验证

实验选取电力系统中电压暂降暂升、暂态振荡、暂态脉冲、含谐波的电压暂升暂降和电压中断这五种常见的电能质量扰动信号作为仿真信号^[14-15]; 实验环境: Matlab 2010a, 32-bit win7 系统, Pentium(R) Dual-Core 3.00 GHz。对仿真信号采样, 采样时间为 0.2 s, 采样率为 2 560 Hz, 采样点数为 512 点。信号基频均为 50 Hz。本文将信号经过 S 变换后得到的 10 倍基频幅值结果图绘制出来, 作为与离散正交 S 变换的对比, 用来验证算法的准确性。

3.1 电压暂降暂升

电压暂降暂升: $h(t) = \sin(2\pi \times 50 \times t)$ $t=0 \sim 0.2$ s。在 $t=0.056 \sim 0.134$ s 的时间段内, 加入调制信号

$y(t) = -0.4 \sin(2\pi \times 50t)$, 使得电压幅值降低而后升高。离散正交 S 变换和 S 变换的分析结果分别见图 1(b)和图 1(c)。

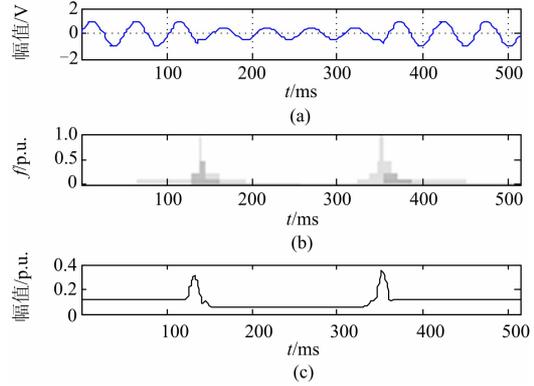


图 1 电压暂降分析结果
Fig. 1 Voltage sag analysis results

图1(a)为原始信号, 图1(b)为离散正交S变换分析结果图, 图1(c)为10倍基频幅值S变换分析结果。图1(b)中横纵坐标分别代表采样点数和频率标么值, 深色区域根据离散正交S变换系数矩阵得到, 表示信号幅值的标么值。从图1(b)中可以看出, 在第142个采样点电压暂降时, 高频段出现尖峰, 然后底层色带中断, 表示幅值减小; 第348个点电压暂升时, 图中高频段出现尖峰, 底层色带重新出现, 表示幅值增大。同图1(c)变化趋势一样, 图1(b)显示的幅值变化趋势, 也可以明显地看出幅值的突变点(即第142个点和第348个点), 从而准确地检测出扰动起始和终止时刻。

3.2 暂态振荡

暂态振荡 $h(t) = \cos(2\pi \times 50 \times t)$, $t=0 \sim 0.2$ s。在 $t=0.06 \sim 0.14$ s 的时间段内, 信号 $h(t)$ 加入调制信号 $y(t) = 0.8e^{[-20 \times (t-0.08)]} \cos(8 \times 2\pi \times 50 \times t)$, 使得信号在 0.06 ~ 0.14 s 出现短暂振荡。离散正交 S 变换和 S 变换的分析结果分别见图 2(b)和图 2(c)。

图2(a)为原始信号, 图2(b)为离散正交S变换分析结果图, 图2(c)为10倍基频幅值S变换分析结果。图中横纵坐标分别代表采样点数和频率标么值, 深色区域根据离散正交S变换系数矩阵得到, 表示信号幅值的标么值。从图2(b)中可以看出, 第152个点扰动振荡开始时, 在高频段出现色带和尖峰, 表示扰动开始; 第354个点扰动振荡结束, 高频段色带消失, 表示扰动结束。由图2(b)可清晰地看出振荡信号扰动的起始和终止时刻(第152个点和第354个点)。

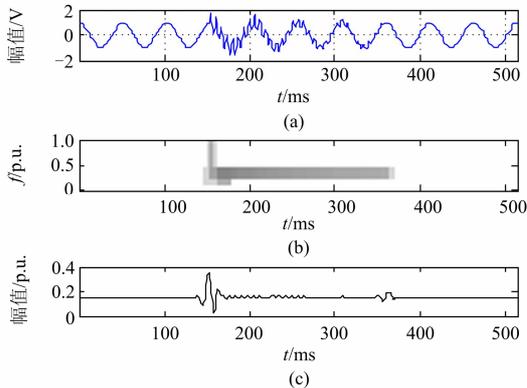


图2 暂态振荡分析结果
Fig. 2 Transient oscillation analysis results

3.3 暂态脉冲

暂态脉冲： $h(t) = \cos(2\pi \times 50 \times t)$ ， $t=0\sim 0.2$ s。

在 $t=0.1049\sim 0.1051$ s的时间段内，信号 $h(t)$ 加入调制信号 $y(t)=1.6$ ，使得信号在 $0.1049\sim 0.1051$ s出现幅值为1.6的扰动脉冲信号。离散正交S变换和S变换的分析结果分别见图3(b)和图3(c)。

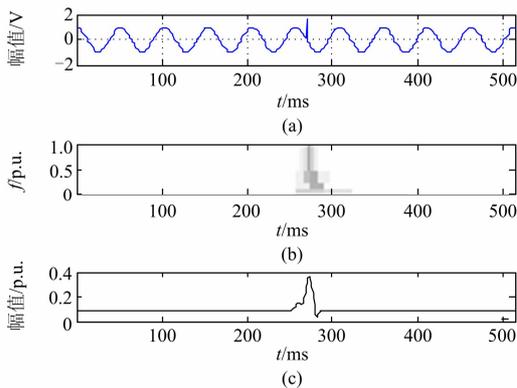


图3 暂态脉冲分析结果
Fig. 3 Transient pulse analysis results

图3(a)为原始信号，图3(b)为离散正交S变换分析结果图，图3(c)为10倍基频幅值S变换分析结果。图中横纵坐标分别代表采样点数和频率标么值，深色区域根据离散正交S变换系数矩阵得到，表示信号幅值的标么值。从图3(b)中可以看出，第275个点扰动脉冲开始时，图中出现尖峰，表示幅值增大；第277个点扰动脉冲结束时，尖峰消失，表示幅值减小。由图3(b)可清晰地看出脉冲扰动的起止时刻(第275个点和第277个点)。

3.4 含谐波的电压暂升暂降

含谐波的电压暂升暂降信号为

$$h(t) = \sin(2\pi \times 50 \times t) + 0.25\sin(2\pi \times 150 \times t) + 0.2\sin(2\pi \times 250 \times t) + 0.1\sin(2\pi \times 350 \times t)$$

$t=0\sim 0.2$ s。在 $0.08\sim 0.12$ s的时间段内，使 $h(t)$ 的

幅值增大0.6。离散正交S变换和S变换的分析结果分别见图4(b)和图4(c)。

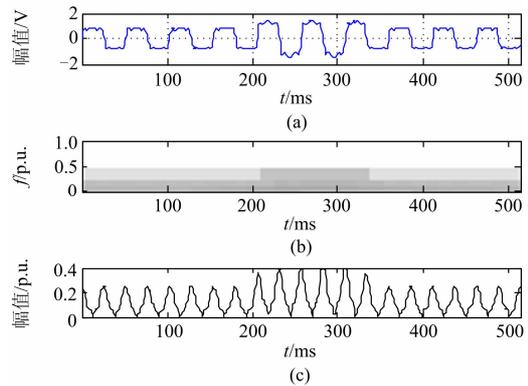


图4 含谐波的电压暂升暂降分析结果
Fig. 4 Voltage swell and voltage sag with harmonics analysis results

图4(a)为原始信号，图4(b)为离散正交S变换分析结果图，图4(c)为10倍基频幅值S变换分析结果。图中横纵坐标分别代表采样点数和频率标么值，深色区域根据离散正交S变换系数矩阵得到，表示信号幅值的标么值。从图4(b)中可以看出，第203个点电压暂升开始时，高频段显现深色，表示幅值开始增大；第343个点电压暂降，高频段深色消失，表明幅值减小。由图4(b)可清晰地看出脉冲扰动的起始和终止时刻(第203个点和第343个点)。

3.5 电压中断

电压中断信号： $h(t) = \cos(2\pi \times 50 \times t)$ ， $t=0\sim 0.2$ s。

在 $t=0.07\sim 0.12$ s的时间段内，信号 $h(t)$ 出现电压中断。离散正交S变换和S变换的分析结果分别见图5(b)和图5(c)。

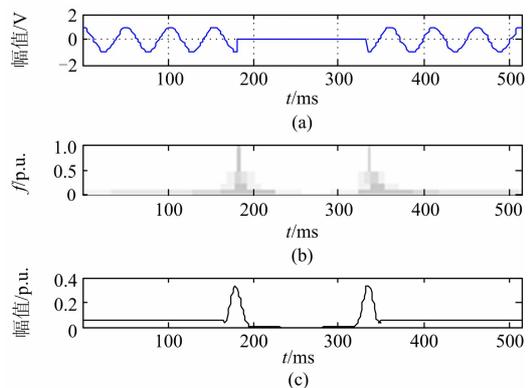


图5 电压中断分析结果
Fig. 5 Voltage interruption analysis results

图5(a)为原始信号，图5(b)为离散正交S变换分析结果图，图5(c)为10倍基频幅值S变换分析结果。图中横纵坐标分别代表采样点数和频率标么值，

深色区域根据离散正交 S 变换系数矩阵得到, 表示信号幅值的标幺值。从图 5(b)中可以看出, 第 191 个点电压中断时, 图中出现峰值, 底层色带中断, 表示幅值大幅度减小, 近似为零; 第 345 个点电压恢复时, 图中出现峰值, 底层色带出现, 表示幅值逐渐增大。由图 5(b)可清晰地看出电压中断扰动的起始和终止时刻(第 191 个点和第 345 个点)。

4 结语

本文利用离散正交 S 变换对扰动信号进行分析, 进而提取出信号中用于检测电能质量扰动信号扰动时刻的有效参数, 绘制图形以定位电能质量扰动信号的扰动时刻。通过实验对五种常见电能质量扰动信号进行分析, 仿真结果表明离散正交 S 变换能够准确检测扰动起止时刻, 为电能质量信号扰动时刻检测开辟了一种新的思路。

参考文献

- [1] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-124.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-124.
- [2] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 33(36): 17-28.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 33(36): 17-28.
- [3] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [4] 易吉良, 彭建春, 谭会生. S 变换在电能质量扰动分析中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 141-146.
YI Jiliang, PENG Jianchun, TAN Huisheng. Review of application of S-transform in power quality disturbances analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 141-146.
- [5] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [6] MALLAT S. 信号处理的小波导引[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [7] SURIYA K. Detection of power quality events using DOST-based support vector machines[C] // International Symposium on Computer Science and Its Applications, 2008, 60: 68-69.
- [8] 吴智利, 赵庆生, 陈惠英, 等. 低频采样下基于卡尔曼滤波的同步相量测量算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 94-95.
WU Zhili, ZHAO Qingsheng, CHEN Huiying, et al. A Kalman-filter based phasor measurement algorithm under low sampling frequency[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 94-95.
- [9] STOCKWELL R G. A basis for efficient representation of the S-transform[J]. Digital Signal Process, 2007, 17(1): 371-393.
- [10] ORCHARD J, WANG Yanwei. The discrete orthonormal stockwell transform for image restoration[J]. IEEE, 2009: 2761-2764.
- [11] 满蔚仕, 王育刚, 张志禹, 等. 电能质量扰动识别的快速 DOST 方法和 FST 方法比较[J]. 智能电网, 2014, 2(6): 23-26.
MAN Weishi, WANG Yugang, ZHANG Zhiyu, et al. Comparative study on fast DOST and FST for identification of power quality disturbance[J]. Smart Grid, 2014, 2(6): 23-26.
- [12] 徐方维, 杨洪耕, 叶茂清, 等. 基于改进 S 变换的电能质量扰动分类[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 78-83.
XU Fangwei, YANG Honggeng, YE Maoqing, et al. Classification for power quality short duration disturbances based on generalized S-transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 78-83.
- [13] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series and products[M]. 7th revised. Academic Press Inc: 107-109.
- [14] 李中华, 聂忠伟. 基于广义 S 变换的暂态电能质量检测方法[J]. 电气技术, 2013(3): 15-17.
LI Zhonghua, NIE Zhongwei. The method of detecting transient power quality based on the generalized S-transform[J]. Electric Technology, 2013(3): 15-17.
- [15] 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.
FU Juan, ZHOU Hanyong, JIANG Qin. Power quality detection and simulation using S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 86-89.

收稿日期: 2014-11-18; 修回日期: 2015-01-27

作者简介:

王宇(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

赵庆生(1969-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制 and 电力系统建模与仿真. E-mail: zhaoqs1996@163.com

(编辑 周金梅)