

# 基于 S 变换奇异值能量熵的 单相自适应重合闸故障符号识别法

赵妍<sup>1</sup>, 高磊<sup>2</sup>, 王永<sup>3</sup>, 彭茂君<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学 输变电技术学院, 吉林省 吉林市 132012; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 3. 北京市电力公司, 北京市 宣武区 100031)

## A Method to Recognize Fault Symbol for Adaptive Single-Phase Reclosure Based on Energy Entropy of Singular Value From S-Transform

ZHAO Yan<sup>1</sup>, GAO Lei<sup>2</sup>, WANG Yong<sup>3</sup>, PENG Maojun<sup>3</sup>

(1. School of Power Transmission and Transformation Technology, Northeast Dianli University, Jilin 132012, Jilin Province, China; 2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 3. Beijing Electric Power Company, Xuanwu District, Beijing 100031, China)

**ABSTRACT:** The S-transform, singular value decomposition and information entropy are integrated to distinguish permanent faults occurred in long-distance EHV transmission line equipped with shunt reactor from instantaneous faults in the transmission line. Firstly, S-transform is directly applied to the voltage of faulty phase to obtain module time-frequency matrix; then singular value decomposition is applied to the obtained matrix to digitize the characteristic difference; and then the energy entropy of the singular value is solved by information entropy theory and in the viewpoint of statistics the energy entropy of singular value of power grid is given; finally, the faults are classified by simple symbol recognition. Simulation results show that the proposed method is accurate and stable.

**KEY WORDS:** extra high voltage (EHV); transmission line; S-transform; singular value; energy entropy; single-phase adaptive reclosure

**摘要:** 将 S 变换、奇异值分解及信息熵理论相结合, 用于带并联电抗器的超高压长输电线路瞬时性与永久性故障的识别中。首先直接对故障相电压作 S 变换求模时频矩阵, 然后对该矩阵进行奇异值分解, 量化其特征差异, 再利用信息熵理论对奇异值求其能量熵, 从统计的角度给出系统的奇异值能量熵, 最后用简单的符号识别法进行故障的分类。仿真结果表明, 其该方法准确率高、稳定性好。

**关键词:** 超高压; 输电线路; S 变换; 奇异值; 能量熵; 单相自适应重合闸

## 0 引言

高压输电线路绝大多数故障为单相接地故障,

其中 80% 以上为瞬时性故障。超高压输电线路广泛采用单相自动重合闸技术, 以消除瞬时性故障并快速恢复供电。然而, 当自动重合闸重合于永久性故障时, 将使电力系统再次受到短路电流的冲击, 如能在重合之前正确区分瞬时性与永久性故障, 以决定重合闸是否动作, 即实现自适应的自动重合方式, 对电力系统的安全运行具有重要的意义。

近年来, 单相自适应重合闸的理论和方法日趋成熟, 为其实用化奠定了理论基础。主要研究方法有以下几类: 1) 基于故障恢复电压的方法, 如利用基于恢复电压幅值<sup>[1]</sup>、相角的判据<sup>[2]</sup>以及在此基础上的电压修正判据<sup>[3]</sup>和基于恢复电压拍频特性的判据<sup>[4]</sup>等的方法。其中, 电压幅值判据在重载长线路情况下易发生误判, 但如加上其补充判据, 正确率会有所提高, 利用相角及恢复电压拍频特性的判据有较高的灵敏度和正确率。2) 基于故障电弧特性的方法<sup>[5]</sup>, 该方法难以确定判据的使用时间, 且必须在较短时间内连续采样, 计算各次谐波, 计算复杂, 灵敏性受谐波大小的影响。3) 基于人工或模糊神经网络<sup>[6-7]</sup>、小波变换<sup>[8]</sup>、波形识别<sup>[9]</sup>等的方法, 此类方法的效果取决于特征量和分类方法的选择。在特征量的选取上有快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)、小波变换等方法; 分类的方法有人工神经网络、支持向量机、模糊分类等。FFT 的基本思想是将信号展开为正弦和余弦函数级数形式, 被分析的信号必须是稳态的、随时间周期

变化的, 因而不适用于故障时产生的暂态信号; 小波变换虽具有时频局部化特征, 但易受噪声影响, 无法实现扰动的定量分析; 人工神经网络、支持向量机和模糊识别等方法较好地实现了电能质量扰动识别, 但上述方法需要一定量的样本, 且识别系统具有黑匣子的特征, 难于直观理解和定量分析。

S 变换<sup>[10]</sup>是由连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)和短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, STFT)结合发展起来的另一种时频分析方法, 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 变换具有良好的时频特性, 其变换结果在时频平面上比 CWT 的结果更为清晰和直观, 而且对于信号的高频部分也比 CWT 分解得更细致, 因而非常适合于进行扰动信号特征提取。文献[11-13]应用 S 变换并结合人工神经网络、支持向量机和模糊识别等方法较好地实现了电能质量扰动识别。本文提出基于 S 变换模时频矩阵奇异值能量熵的单相自适应重合闸故障符号识别分类方法。

## 1 S 变换

S 变换由 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 CWT 和 STFT 的发展。信号  $x(t)$  的 S 变换  $S(\tau, f)$  定义如下

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(\tau - t, f) \exp(-2\pi ft) dt \quad (1)$$

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}\right] \quad (2)$$

式中:  $w(\tau - t, f)$  为高斯窗口;  $\tau$  为控制高斯窗口在  $t$  轴位置的参数。可以看出, S 变换不同于 STFT 之处在于高斯窗口的高度和宽度随频率变化, 这样就克服了 STFT 窗口高度和宽度固定的缺陷。S 变换可以利用 FFT 实现快速计算。S 变换的离散表示形式为

$$S(m, n) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{N-1} X(n+k) e^{-2\pi^2 k^2/n^2} e^{j2\pi km/N}, & n \neq 0 \\ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k), & n = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j2\pi kn/N}$ 。

## 2 奇异值能量熵

### 2.1 奇异值分解

奇异值分解(singular value decomposition, SVD)是一种非线性滤波, 广泛应用于信号的检测中<sup>[14-16]</sup>。

在 SVD 理论中, 任何  $m \times n$  阶的矩阵  $A$  的奇异值分解表示为

$$A = U \Lambda V^T \quad (4)$$

式中:  $U$  和  $V$  分别是  $m \times m$  阶和  $n \times n$  阶正交阵;  $\Lambda = \text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$  是对角矩阵, 其对角元素为  $A$  的奇异值, 并按降序排列。

由于  $\Lambda$  是一对角阵, 因此 SVD 可以将一个秩为  $k$  的  $m \times n$  阶矩阵  $A$  表示为  $k$  个秩为 1 的  $m \times n$  阶子矩阵的和。其中, 每个子矩阵由 2 个特征矢量(分别来自于  $U$  和  $V$ )和权值相乘得到, 如下式所示

$$A = U \Lambda V^T = \sum_{i=1}^k a_i u_i v_i^T = \sum_{i=1}^k a_i A_i \quad (5)$$

式中:  $k$  为  $A$  的秩;  $u_i$ 、 $v_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ ) 分别是  $U$  和  $V$  的第  $i$  列奇异值矢量;  $A_i$  为包含  $u_i$  和  $v_i$  的子矩阵。在实际应用中, 矩阵  $A$  表示故障扰动信号的时频信息, 相应的  $u_i$  和  $v_i$  分别表示频率和时间信息, 而奇异值的大小则表示出了在该时频段信息量的大小, 这样 SVD 从矩阵的角度出发, 将包含信号信息的矩阵分解到一系列奇异值和奇异值矢量对应的时频子空间中, 而奇异值的大小则定量地表示出了在该时频段信息量的大小, 从而区分故障扰动类型。

### 2.2 奇异值能量熵

信息熵<sup>[17]</sup>  $I(x_i)$  是指信源(物理)某一事件  $x_i$  发生时, 所包含的信息量, 物理系统内不同事件发生时, 其信息量不同。Shannon 定义自信息的数学期望为信息熵, 即信源的平均信息量

$$H(x) = E[-\lg P(x_i)] = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \lg P(x_i) \quad (6)$$

对 S 变换模时频矩阵进行奇异值分解得到奇异值  $a_1, a_2, \dots, a_n$ 。对每个  $a$  求其能量分别为  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , 进行归一化就有  $\sum_{i=1}^n E_i = 1$ , 符合计算信息熵的初始归一化条件, 根据信息熵的定义来构造奇异值能量熵, 计算公式为

$$E_{SE}(n) = -\sum_{i=1}^n E_i \ln E_i \quad (7)$$

信息熵表征了信源整体的统计特征, 是总体的平均不确定性的一种度量<sup>[17]</sup>。对于某一特定的信息, 其信息熵只有一个。由于统计特征不同, 信息熵也不同。奇异值能量熵具有同样的特点, 是从能量的角度表征了信源整体的统计特征。

## 3 单相自适应重合闸故障符号识别法

装设并联电抗器的超高压输电系统如图 1 所

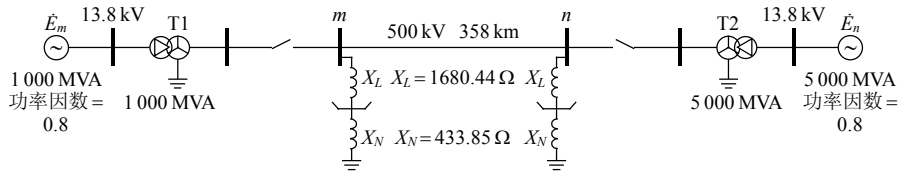


图1 装设并联电抗器的输电系统

Fig. 1 The shunt compensated EHV transmission system

示<sup>[18]</sup>。其中： $r_1=0.0195\Omega/\text{km}$ ； $l_1=0.9134\text{mH}/\text{km}$ ； $c_1=0.014\mu\text{F}/\text{km}$ ； $r_0=0.1675\Omega/\text{km}$ ； $l_0=2.719\text{mH}/\text{km}$ ； $c_0=0.00834\mu\text{F}/\text{km}$ ； $r_1$ 、 $l_1$ 、 $c_1$ 分别是线路  $mn$  的正序电阻、电感及电容； $r_0$ 、 $l_0$ 、 $c_0$ 分别是线路的零序电阻、电感及电容。

对图1所示的系统，利用 Matlab 建立数学模型并进行仿真。图2(a)(b)分别为线路发生瞬时性故障和永久性故障时，在线路首端得到的故障相电压波形(以A相故障为例)。

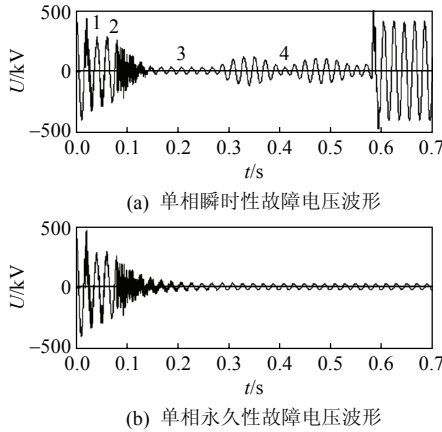


图2 故障相电压波形

Fig. 2 Voltage waveform of fault phase

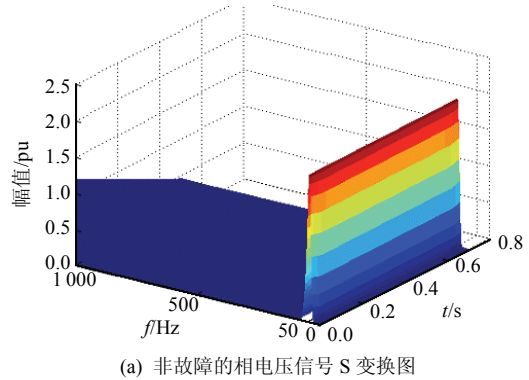
图2中：波段1为故障前的正常运行状态电压波形；波段2为从故障发生后到断路器跳闸之前，即一次电弧阶段的电压波形；波段3为断路器跳闸后的二次电弧状态电压波形；波段4为电弧熄弧后的恢复电压阶段电压波形；波段5为重合后的电压波形。

对于单相接地短路故障，故障发生后，线路故障相两端断开，非故障相与故障相之间存在电磁与静电耦合联系，会使故障点电弧通道中在一定时间内仍然流有潜供电流。在永久性故障情况下，电弧会相对较快地熄灭；而在瞬时性故障情况下，其电弧要经过燃烧、熄灭、重燃、熄灭的反复过程，而且对于超高压系统电弧燃烧的持续时间较长。所以，2类故障的断开相电压无论在时域还是频域分布上都是不同的。

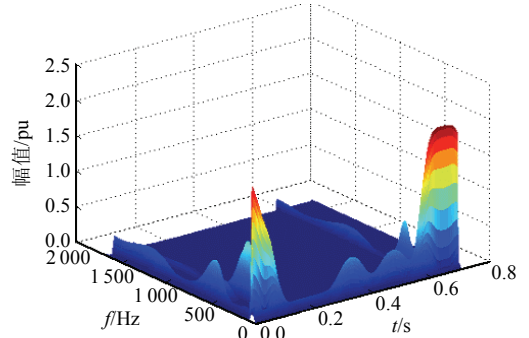
分别对图2中故障相和非故障相的相电压信号作离散 S 变换。S 变换所得的结果为一复时频矩阵，

行向量对应频率，列向量对应时间，矩阵元素的模值为对应时间和频率处的 S 变换的幅值。故可根据 S 变换时频矩阵作出信号的三维时频分布图，如图3所示。

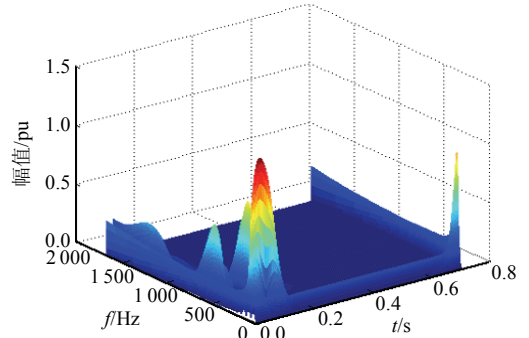
从图3中可以清楚直观地看出信号各频率成分随时间变化的分布情况，其中突起的峰值代表着对应时间、频率下信号的能量。在频率发生变化时信号能量随之迅速变化到另一频率，能量的变化时刻对应了信号的突变时刻，各类信号的轮廓清晰可见，S 变换的三维时频图表明了这3类信号的时频



(a) 非故障的相电压信号 S 变换图



(b) 瞬时性故障 S 变换图



(c) 永久性故障 S 变换图

图3 信号 S 变换三维时频分布图

Fig. 3 3-D distributions of signal by S transform

特征。以上这些特征，为其进行正确的识别提供了依据。

依赖信号的时频直观分布还不足以识别故障类型，且变换后的数据量很大，有必要用奇异值理论对变换系数矩阵进一步处理，对 S 变换的模系数矩阵求奇异值。由于奇异值基于 S 变换的模时频矩阵，定量体现了 3 类信号在各时频子空间能量的大小，利用奇异值反映了 S 变换的模时频矩阵固有特性。奇异值特征量曲线如图 4 所示。图 4 中可见非故障的电压信号奇异值相对不平均，即不确定性较小，而瞬时和永久 2 类故障信号的奇异值相对来说比较平均，即不确定性较大，而且永久性故障的不确定性最大。进一步求信号的奇异值能量熵，就可将这种不确定性用统计量熵值来表示。由于 2 类故障的统计特征不同，奇异值能量熵也不同。

为了反映各种因素对结果造成的影响，本文对两侧系统的不同相对阻抗角、不同故障地点、金属性接地以及经过渡电阻  $R_g$ (取  $R_g = 300 \Omega$ ) 接地的瞬时性故障和永久性故障进行了大量仿真，结果如表 1

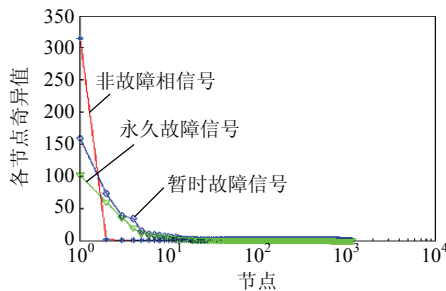


图 4 奇异值特征量曲线

Fig. 4 Curve of singular value features

表 1 部分仿真测试结果

Tab. 1 The results of simulation testing

两侧系统的相 对抗角/(°)	过渡电阻/ $\Omega$	短路位置/ %	故障类型	奇异值 能量熵	判定结果 (符号)
0	300	20	瞬时	0.797 2	-
			永久	1.040 8	+
		45	瞬时	0.808 2	-
			永久	1.024 2	+
		84	瞬时	0.858 3	-
			永久	1.070 8	-
30	0	20	瞬时	0.654 3	-
			永久	1.034 7	+
		45	瞬时	0.818 2	-
			永久	1.124 3	+
		84	瞬时	0.848 3	-
			永久	1.071 8	+
60	0	20	瞬时	0.798 2	-
			永久	1.064 2	+
		45	瞬时	0.857 3	-
			永久	1.170 8	+
		84	瞬时	0.785 4	-
			永久	1.201 2	+

所示。大量仿真结果表明，非故障相的奇异值能量熵在 0 附近，是一个很小的数，以表 1 中一个例子为例：短路位置 84%，两侧系统的相对阻抗角  $0^\circ$ ，B 相、C 相奇异值能量熵分别为 0.000 62 和 0.000 24；而瞬时故障的奇异值能量熵稳定在 0.8 附近，不会超过 1；永久故障的奇异值能量熵在 1.0 以上。从熵值的大小可见，非故障相电压信号的奇异性最小，几乎为零。而永久性故障的熵值最大，说明了永久性故障比瞬时性故障严重。另外，3 个取值区间无重叠部分，为判据的选择奠定了基础。

根据仿真的结果，并考虑判据的简化性和适用性，对判据进一步改进，可对熵值取对数，这样就可以通过简单的符号识别方法来进行故障的分类。制定新的判据如下：奇异值能量熵小于 0.2 判断为非故障相；大于 0.2 为故障相。对故障相 S 变换的奇异值能量熵取对数，负的判断为瞬时故障，正的判断为永久故障。部分数据及判断结果列在表 1 中。

#### 4 实测信号验证

图 5 为川电东送电系统调试时 500 kV 万龙线 C 相瞬时人工接地试验万县侧 C 相故障波形图<sup>[19]</sup>。故障点在万县侧，故障发生时刻电压接近过零点。C 相电流直流分量约在故障后 184 ms 衰减至 0，在此期间，故障未消失，近故障侧故障相端电压接近 0。184 ms 后故障消失，储能元件构成的振荡回路开始振荡，振荡电压的最大值约为 77 kV，为额定电压的 25%左右。根据本文的方法计算得到 S 变换的奇异值能量熵为 0.812 6，取对数后符号为负，故判定为瞬时性故障，与事实相符。

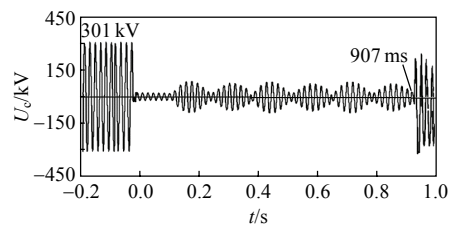


图 5 万龙线 C 相瞬时人工接地万县侧试验故障波形

Fig. 5 Temporary fault phase voltage and current waves with shunt reactor compensation

#### 5 结论

1) 本文方法不受过渡电阻、故障位置等因素的影响，灵敏度高；而且还可进行故障选相，实现简单，便于在实际现场应用。

2) 本文算法的快速性主要取决于 S 变换的时间，而 S 变换是用 FFT 实现快速计算的，因而基本

可以满足故障分类实时性的要求。

## 参考文献

- [1] Ge Yaozhong, Sui Fonghai, Xiao Yuan. Prediction methods for preventing single-phase reclosing on permanent fault[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 114-121.
- [2] 李斌, 李永丽, 黄强, 等. 单相自适应重合闸相位判据的研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 41-44.  
Li Bin, Li Yongli, Huang Qiang, et al. Study on phase criterion for single-pole adaptive reclosure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 41-44(in Chinese).
- [3] 范越, 施围. 输电线路单相自动重合闸中电压判据的修正[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 44-47.  
Fan Yue, Shi Wei. Modification of voltage criterion in the single-pole automatic reclosing of transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(6): 44-47(in Chinese).
- [4] 李斌, 李永丽, 盛鹏, 等. 带并联电抗器的超高压输电线路单相自适应重合闸的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 52-56.  
Li Bin, Li Yongli, Sheng Kun, et al. The study on single-pole adaptive reclosure of EHV transmission lines with the shunt reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 52-56(in Chinese).
- [5] 孙静, 李兴源, 李立. 基于小波变换和 ANN 的最佳重合闸时刻的研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(15): 6-10.  
Sun Jing, Li Xingyuan, Li Li. Study on the optimal reclosing time based on wavelet transform and artificial neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(15): 6-10(in Chinese).
- [6] 聂宏展, 董爽, 李天云, 等. 基于模糊神经网络的单相自适应重合闸[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 75-79.  
Nie Hongzhan, Dong Shuang, Li Tianyun, et al. Single-phase adaptive auto-reclosure based on fuzzy neural network[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 75-79(in Chinese).
- [7] 郁惟镛, 潘荣贞, 李翔, 等. 自适应单相自动重合闸的神经网络方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(2): 1-6.  
Yu Weiyong, Pan Rongzhen, Li Xiang, et al. The neural network method to adaptive single pole autoreclosure[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(2): 1-6(in Chinese).
- [8] 林湘宁, 刘沛, 程时杰. 超高压输电线路故障性质的复值小波识别[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 33-38.  
Lin Xiangning, Liu Pei, Cheng Shijie. Identification of the instant faults occurred on the extra high voltage transmission line with a complex wavelet algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 33-38(in Chinese).
- [9] 郁惟镛, 胡炎, 黄登峰. 基于波形识别的永久性和瞬时性故障的判别[J]. 继电器, 1999, 27(4): 10-13.  
Yu Weiyong, Hu Yan, Huang Dengfeng. Research of self\_adaptive reclose based on wave identification[J]. Relay, 1999, 27(4): 10-13(in Chinese).
- [10] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Trans on Signal Process, 1996(44): 998-1001.
- [11] Lee I W C, Dash P K. S-transform-based intelligent system for classification of power quality disturbance signals[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 800-805.
- [12] 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): 51-56.  
Zhan Yong, Cheng Haozhong, Ding Yifeng, et al. S-transform-based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 51-56(in Chinese).
- [13] Dash P K, Panigrahi B K, Panda G. Power quality analysis using S-transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(2): 406-411.
- [14] 王太勇, 王正英, 胥永刚, 等. 基于 SVD 降噪的经验模式分解及其工程应用[J]. 振动与冲击, 2005, 24(4): 96-99.  
Wang Taiyong, Wang Zhengying, Xu Yonggang, et al. Empirical mode decomposition and its engineering applications based on SVD denoising[J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(4): 96-99(in Chinese).
- [15] Konstantinides K, Yao K. Statistical analysis of effective singular values in matrix rank determination[J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Process, 1988, 36(5): 757-763.
- [16] Hou Zujun. Adaptive singular value decomposition in wavelet domain for image deposing[J]. Pattern Recognition, 2003, 36(8): 1747-1763.
- [17] Rezek I A, Roberts S J. Stochastic complexity measures for physiological signal analysis[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1998, 45(9): 1186-1191.
- [18] 聂宏展, 董爽, 段玉兵. 基于神经网络的单相自适应重合闸的研究[J]. 东北电力学院学报, 2005, 25(2): 37-41.  
Nie Hongzhan, Dong Shuang, Duan Yubing. The study on single-pole adaptive reclosure based on neural network[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2005, 25(2): 37-41(in Chinese).
- [19] 四川电力试验研究院. 万龙线单相瞬时人工接地试验报告[R]. 成都: 四川电力试验研究院, 2002.



赵妍

收稿日期: 2010-08-24.

作者简介:

赵妍(1974), 女, 讲师, 硕士, 主要研究方向为非线性系统理论在电力系统中的应用, E-mail: zjb\_112006@163.com;

高磊(1980), 男, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统建模、电力系统稳定与控制等方面的工作;

王永(1981), 男, 工程师, 博士, 研究方向为电力系统调度自动化、电力系统分析与控制。

(编辑 褚晓杰)