

# 基于 S 变换图像灰度量化的短时电能质量扰动识别分类

张中全, 赵俊

(成都电业局, 四川 成都 610041)

**摘要:**针对短时电能质量扰动分类大多依赖分类器, 分类准确率不高这一难题, 提出了基于 S 变换模时频矩阵灰度图像法。首先对常见的几种扰动进行 S 变换分析, 得到模时频矩阵, 再应用数字图像灰度方法, 将模矩阵各元素值用灰度图方式表示, 分析其灰值分布特征, 引入灰度期望和灰度方差两指标, 量化灰度图像灰值分布, 并根据量化结果建立扰动标准判据, 实现扰动分类。仿真实验表明, 该方法不依赖于分类器, 能准确地对扰动进行分类且对噪声不敏感, 是一种有效的短时电能质量分类方法。

**关键词:**短时电能质量扰动; S 变换; 模时频矩阵; 灰度图像; 扰动分类

**Abstract:** A classification method for short duration power quality disturbance by measuring the grey scale image of S-modal time-frequency matrix is proposed. Firstly, the common power quality disturbance signals are decomposed with S-transform analysis and the S-modal time-frequency matrix is constructed, the grey scale image of which could be easily calculated according to digital image grey scale method. Then, the grey value and grey variance are introduced to quantify the characteristics of S-modal time-frequency image in order to achieve the disturbance classification. The simulation results show that the proposed method can classify the disturbances exactly and is not sensitive to noise, so it is an effective classification method of short duration power quality.

**Key words:** short duration power quality disturbance; S-transform; module time-frequency matrix; disturbance classification of grey scale image

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2010)06-0045-06

## 0 引言

随着科学技术和国民经济的快速发展, 电能的需求量也极大增长, 同时电能质量越来越显示其重要性, 电力部门和用户对电能质量的关注也日益增加<sup>[1]</sup>。典型的短时电能质量扰动 (short duration power quality disturbance SDPQD) 现象有: 电压凹陷、电压凸起、电压中断、谐波、振荡暂态等。对各种电能质量扰动进行准确辨识和分类是控制和治理电能质量问题的前提<sup>[2]</sup>。

从国内外的研究情况来看, 在短时电能质量扰动分析领域中, 大多采用傅里叶变换 (FFT)<sup>[3,4]</sup>、小波变换 (WT)<sup>[5-9]</sup>、S 变换 (S-Transform, ST)<sup>[10]</sup> 等进行扰动检测及特征提取, 然后采用人工神经网络 (ANN)<sup>[6,11]</sup>、模糊分类<sup>[12]</sup>、支持向量机 (SVM)<sup>[13]</sup>、相似度<sup>[14]</sup> 等方法进行扰动的识别及分类。傅里叶变换只适用于平稳信号的分析, 如谐波, 对时变非平稳信号难以充分描述。小波变换具有良好的时频局部化

特性, 适合于分析暂态、突变信号而得到广泛应用<sup>[5-9]</sup>。但是小波变换易受噪声影响, 且结果缺乏直观性。S 变换克服了短时傅里叶变换窗函数长度不易确定的问题, 变换结果在时频表明上比小波变换直观, 信号在高频部分分解得更细致, 并逐渐应用于电能质量扰动识别中<sup>[11-14]</sup>。文献 [11] 将 S 变换与神经网络方法相结合对多种短时电能质量扰动进行了分类识别, 分类正确率比较高, 但该方法存在神经网络学习样本不易收敛、对噪声敏感且计算量大等问题。文献 [12] 提出基于模糊分类的电能质量扰动分类识别, 通过简单明了的“IF-THEN”形式的知识规则形成判断, 识别率较高, 但该方法存在提取特征量较多、分类规则复杂等问题。文献 [13] 提出支持向量机理论, 取得了很好的分类效果, 该方法克服了人工神经网络对噪声敏感、训练时间长、计算量大等问题。但该方法仍然需要一定量的样本, 且分类过程不够直观。以上文献方法均依靠分类器实现扰动分类。文献 [14] 提出基于数字图像处理中相似度的思想, 通过直接计算不同扰动 S 变换模时频矩阵间相似度, 量化其特征差异来实现

分类, 由于不依赖分类器, 简化了分类算法并取得了良好的分类效果。但不同持续时间的扰动建立的标准模时频矩阵不唯一, 使分类有局限性。

下面结合 S 变换局部化时频特性的优势和各种 SDPQD 特征频率处灰度图像灰值分布的差异性, 提出基于 S 变换模时频矩阵灰度图像法。通过直接计算扰动模时频矩阵灰度图像的灰度期望和灰度方差, 量化灰度图像的灰值分布, 根据量化结果建立扰动标准判据, 实现扰动分类。大大简化了分类算法, 克服了现有分类方法大多采用分类器建立分类判据所带来的分类不明确、计算量大等问题。

## 1 S 变换基本原理及灰度图像特征提取

### 1.1 S 变换基本原理

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

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

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

其中,  $w(\tau - t, f)$  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 (2) 中可以看出, S 变换不同于短时傅里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里叶变换窗口高度和宽度固定的缺陷。

S 变换的离散表示形式为 ( $n \neq 0$ )

$$S[m, n] = \sum_{k=0}^{N-1} H[n+k] \exp\left(-\frac{2\pi^2 k^2}{n^2}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (3)$$

$$\text{式中: } H[n] = \frac{1}{N} \sum h[k] \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (4)$$

当  $n=0$  时的离散 S 变换定义为

$$S[m, n] = \frac{1}{N} \sum h[k] \exp\left(-\frac{j2\pi kn}{N}\right) \quad (5)$$

式中,  $h[k]$  是对连续时间信号,  $h[t]$  进行采样得到的离散时间序列。S 变换可以由 FFT 实现快速计算。  $h[k]$  经 S 变换后得到一个复时频矩阵, 对矩阵中的各个元素求模值后便得到与之对应的模时频矩阵。

### 1.2 灰度图像构造

数字图像是在空间坐标上和亮度上都已经离散化了的图像; 一幅数字图像可以考虑为一个矩阵, 其行和

列标出了图像中的一个点, 而矩阵中的相应元素的值则标出了该点的灰度等级<sup>[11]</sup>。模时频矩阵中各个元素表示扰动信号在对应时刻和频率上的幅值, 这样的矩阵类似于数字图像。应用数字图像灰度方法, 将模时频矩阵各元素值用灰度图的方式表示出来, 元素值越大, 则能量越大, 颜色越亮。这种表示方法能直观地表达 SDPQD 信号 S 变换分析的结果。几种典型 SDPQD 信号 S 变换时频模矩阵灰度图 1、图 2、图 3 所示。

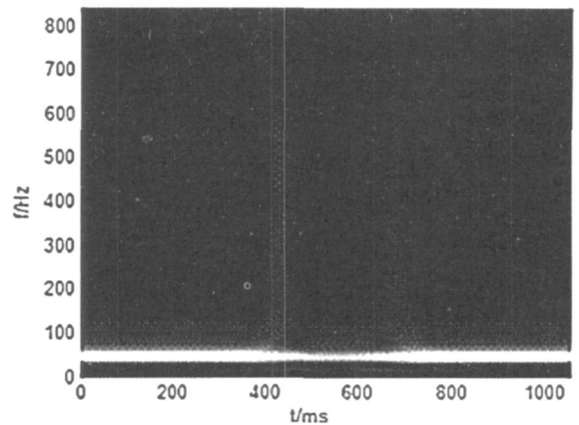


图 1 电压暂降 S 变换时频模矩阵灰度图

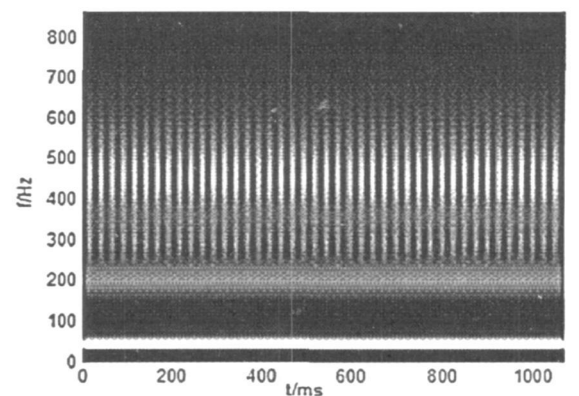


图 2 谐波 S 变换时频模矩阵灰度图

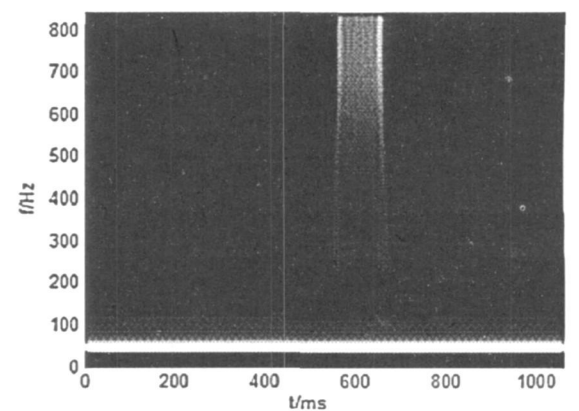


图 3 振荡暂态 S 变换时频模矩阵灰度图

出于便于分析和突出各类 SDPQD 灰度图像灰值分布差异性的考虑, 需要将各类 SDPQD 模时频矩阵

灰度图像灰值调整到一个固定的灰度级别,实际上它是对图像整体灰值分布的平移,把不同类 SDPQD 灰度图像灰值分布统一到同种比较标准下,即灰度图像标准化。标准化规则为:设标准化灰度图像的灰度级为 1~128,特征频率 50 Hz 处的矩阵元素中最大值的两倍对应于最大灰度级,0 对应于最小灰度级。

### 1.3 SDPQD 特征频率选择

S 变换模时频矩阵可以全面刻画信号从工频到高频范围内幅值的分布情况。但模时频矩阵包含大量冗余信息,如果不对矩阵进行处理直接用于扰动分类,需要对矩阵每一行元素进行处理,不但计算繁琐,而且其中相当一部分的行对扰动分类不起作用。不同 SDPQD 具有在幅值、频率成份上随时间分布的不同特征,例如,电压暂降(暂升)、电压缺口(尖峰)的特征集中在 50 Hz 处,电压暂降(暂升)波形有较长时间的幅值跌落(隆起)过程;电压缺口(尖峰)表现为周期性的短时电压波形下凹(上凸),基波幅值会略小于(大于)正常波形幅值;谐波的特征则体现在含有显著的工频整数倍频率成份;振荡暂态在 500 Hz 以上频率,有较宽的频率成份。因此,可以在模时频矩阵中选取扰动特征集中的 50 Hz、150 Hz、250 Hz、350 Hz 和 500 Hz 以上,5 个频率作为特征频率,简化计算,突出特征量,进而提高分类正确率。

### 1.4 灰度图像特征提取

描述数字图像的灰度分布情况最常用的是一阶灰度直方图,即图像灰度的一阶概率分布。假设图像灰值量化为 L 个灰级,令  $i=1, 2, \dots, L$  的  $i$  个灰级的象素总数为  $N(i)$ ,而整幅图像的象素总数为  $M$ ,则灰级  $i$  出现的概率为

$$P(i) = \frac{N(i)}{M}, \quad i=1, 2, \dots, L \quad (6)$$

以  $i$  为横坐标,  $P(i)$  为纵坐标,就得到一阶灰度直方图,也就是灰值的一阶概率分布。这里令图像灰值量化为 128,即  $L=128$ 。

这里引入灰度一阶矩,二阶矩量作为灰度图像概率分布的特征。计算公式如下。

①灰度一阶矩

$$M_1 = \sum_{i=1}^{128} P(i) \quad (7)$$

显然一阶矩  $M_1$  就是灰度的均值  $\mu$ ,即  $\mu=M_1$ 。均值  $\mu$  是对图像灰值分布集中在某个灰值附近的度量。

②灰度二阶矩

$$\eta_2 = \sum_{i=1}^{128} (i-\mu)^2 P(i) \quad (8)$$

显然二阶矩  $\eta_2$  就是灰值分布的方差  $\sigma^2$ ,即  $\sigma^2 = \eta_2$ 。方差  $\sigma^2$  是对图像灰值分布离散性的度量。

### 1.5 灰度图像识别分类原理

基于数字图像灰度处理思想,提取 SDPQD 模时频矩阵各特征频率矩阵行灰度化。发现各种不同类型的 SDPQD,在特征频率处表现出不同的灰度图像的一阶概率分布。例如,电压暂降波形幅值跌落过程,表现为模时频矩阵特征频率 50 Hz 处灰度图像部分灰值下降(如图所示)。统计灰度图像灰值分布,按式(7)、(8)求取灰值分布特征,发现灰度均值会小于灰度级 64;部分灰值的下降,使图像有较宽的灰值分布范围,即灰度方差较大。电压暂升与电压暂降相似的,波形幅值隆起过程,使灰度图像特征频率 50 Hz 处,会大于灰度级 64,且有较大的  $\sigma^2$ 。可以得出,特征频率处扰动幅值的跌落或隆起和持续时间长短共同决定了灰度图像灰值的分布。各类 SDPQD 信号在幅值和频率成分分布上的差异,决定了其模矩阵在特征频率处灰度图像具有明显差异的灰值概率分布;不同持续时间,不同幅值的同一类 SDPQD 在特征频率处具有相似的灰度概率分布。可以由此建立各种 SDPQD 的标准判据,实现对抗扰动的分类。

## 2 基于 S 变换模时频矩阵灰度 SDPQD 分类

结合 S 变换局部化时频特性和各种 SDPQD 特征频率处灰度图像灰值分布的差异性,提出基于 S 变换模时频矩阵灰度的识别分类算法,该算法的原理如下:未知类型的 SDPQD 进行 S 变换分析,得到其模时频矩阵并提取代表各特征频率附近矩阵行灰度化,求得各特征频率处  $\mu$  和  $\sigma^2$ ,若特征频率处  $\mu$  和  $\sigma^2$  符合该特征频率某种扰动的标准判据,则可判断未知类型的 SDPQD 属于该种标准判据曲线对应的那一类 SDPQD。

### 2.1 SDPQD 信号

这里考虑的 SDPQD 有电压暂降(voltage sag)、电压暂升(voltage swell)、电压缺口(notch)、电压尖峰(spike)、谐波(harmonics)和振荡暂态(oscillatory)。信号模型和参数设置如表 1 所示。以振荡暂态为例,其中  $A$  为振荡幅值; $\mu(t)$  为单位阶跃函数; $t_1$  和  $t_2$  分别是振荡开始和结束时刻; $T$  为一个周波的时间; $\omega_0$

表 1 信号模型

扰动类型	信号模型	参数设置
电压暂降	$v(t) \{1 - A[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin \omega_0 t$	$0.1 \leq A \leq 0.9$ $T \leq  2 - t  \leq 6 T$
电压暂升	$v(t) \{1 + A[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin \omega_0 t$	$0.1 \leq A \leq 0.9$ $T \leq  2 - t  \leq 6 T$
电压缺口	$v(t) = \sin \omega_0 t - \text{sgn}(\sin \omega_0 t) \cdot \sum_{i=0}^{50} A_i \{u[t - (t_i + i \cdot 0.02)] - u[t_i + i \cdot 0.02]\}$	$0.1 \leq A \leq 0.4$ sgh(·)为符号函数
电压尖峰	$v(t) = \sin \omega_0 t + \text{sgn}(\sin \omega_0 t) \cdot \sum_{i=0}^{50} A_i \{u[t - (t_i + i \cdot 0.02)] - u[t_i + i \cdot 0.02]\}$	$0.1 \leq A \leq 0.4$ sgh(·)为符号函数
谐波	$v(t) = \sin \omega_0 t + A_3 \sin 3 \omega_0 t + A_5 \sin 5 \omega_0 t + A_7 \sin 7 \omega_0 t$	$0.02 \leq A_3, A_5, A_7 \leq 1$
振荡暂态	$v(t) = \sin \omega_0 t + A e^{-\alpha(t-t_1)} \sin \alpha \omega_0 t \cdot [u(t - t_1) - u(t - t_2)]$	$5 \leq A \leq 10, 0.5 T \leq t_2 - t_1 \leq 3 T$

为基波角频率;  $\sigma$  为波动频率相对系数;  $c$  为振荡衰减系数。

### 2.2 标准判据的形成

首先生成不含噪声 6 类 SDPQD, 对每类 SDPQD 的 100 个随机波形作为试验样本, 进行 S 变换, 将每个随机波形变换后所得模时频矩阵在特征频率附近各行灰值化后, 按式 (7)、(8) 求得  $\mu$  和  $\sigma^2$ , 这样每类 SDPQD 在特征频率处各得到 100 个  $\mu$  和  $\sigma^2$ , 共 5 组。将各组数据在直角坐标系上描述出来, 纵坐标为  $\mu$ , 横坐标为  $\sigma^2$ , 则可以直观地观察出它们之间的变化关系。图 4—图 8 为试验样本在各特征频率处  $\mu - \sigma^2$  散点图。

由图容易看出, 电压暂降 (暂升) 在 50 Hz 频率处,  $\mu$  随着  $\sigma^2$  的增大而减小 (增大),  $\mu$  均小于 (大于) 64 级灰度。这种灰度图像灰值分布特征明显异于其他 SDPQD 在该特征频率处分布特征, 可将该分布特征作为电压暂降 (暂升) 的标准判据。而在其他频率处扰动特征不明显, 无需作为分类判据条件。

电压缺口 (尖峰) 在 50 Hz 频率处, 表现为  $\mu$  变化明显, 且均小于 61 级灰度 (大于 67 级灰度), 而  $\sigma^2$  变化不明显, 在 0 附近波动。可将该分布特征作为电压暂降 (暂升) 的标准判据。而在其他频率处扰动特征不明显, 无需作为分类判据条件。

谐波在 50 Hz 频率处,  $\mu$  和  $\sigma^2$  变化均不明显,  $\mu$  恒等于 64 级灰度,  $\sigma^2$  恒等于 0, 表明这两种扰动在此频率处无扰动特征, 标准判据需在其余特征频率处建立。在特征频率 150 Hz、250 Hz 及 350 Hz 频率处, 均有较大  $\mu$  且随着  $\sigma^2$  的增大而增大。可将该分布特征作为谐波的标准判据。而在 500 Hz 以上频率处, 有较明显的  $\mu$ ,  $\sigma^2$  在 0 附近波动, 此现象是各次谐波在高频处产生的暂态分量所致, 无需作为分类条件。

振荡暂态在 50 Hz、150 Hz、250 Hz 及 350 Hz 处频段处, 具有较大的, 这是之前任何类型都不具有的

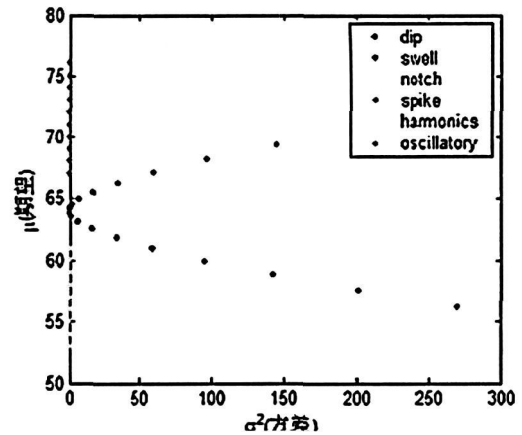


图 4 特征频率 50 Hz 处各 SDPQD 灰度分布  $\mu - \sigma^2$  散点图

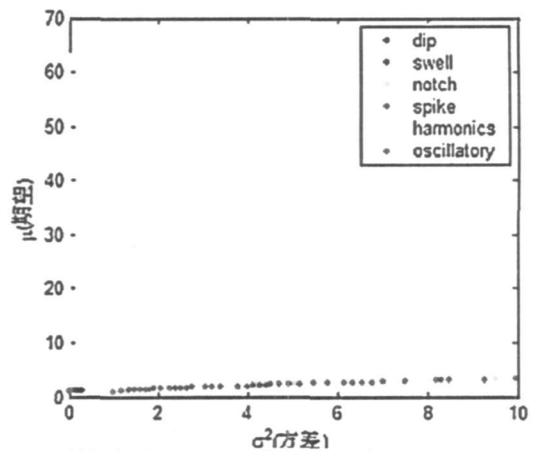


图 5 特征频率 150 Hz 处各 SDPQD 灰度分布  $\mu - \sigma^2$  散点图

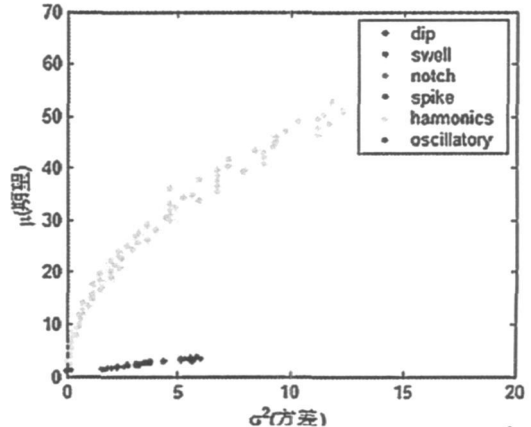


图 6 特征频率 250 Hz 处各 SDPQD 灰度分布  $\mu - \sigma^2$  散点图

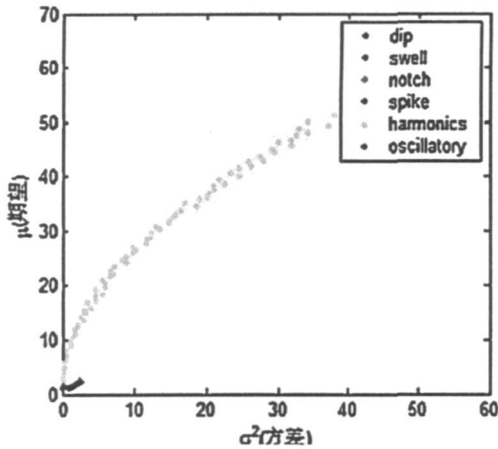


图 7 特征频率 350 Hz 处各 SDPQD 灰度分布  $\mu-\sigma^2$  散点图

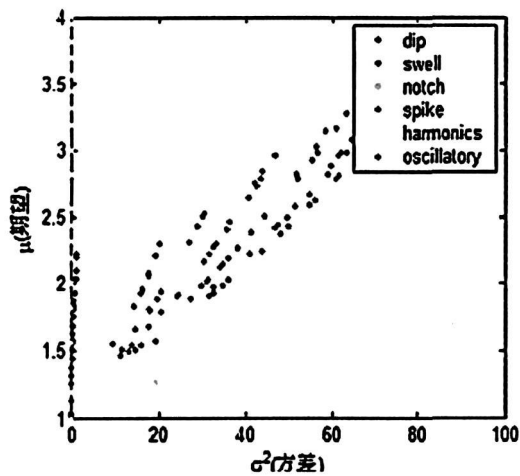


图 8 特征频率 500 Hz 以上各 SDPQD 灰度分布  $\mu-\sigma^2$  散点图  
特征, 可将该分布特征的作为振荡暂态的标准判据。

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真算例一

按表 1 给出的 SDPQD 信号模型生成测试信号, 扰动持续时间及幅值参数变化限值在表 1 所述范围内。每种 SDPQD 随机生成 100 个测试样本, 测试结果如表 2 所示。

表 2 分类结果

参考	测 试					
	电压 暂降	电压 暂升	电压 缺口	电压 尖峰	谐波	振荡 暂态
电压暂降	100	0	0	0	0	0
电压暂升	0	100	0	0	0	0
电压缺口	0	0	100	0	0	0
电压尖峰	0	0	0	100	0	0
谐波	0	0	0	0	100	0
振荡暂态	0	0	0	0	0	100
准确率	100%	100%	100%	100%	100%	100%

表 3 分类识别准确率

噪声	信 号					
	电压 暂降	电压 暂升	电压 缺口	电压 尖峰	谐波	振荡 暂态
20dB	93%	94%	100%	100%	94%	100%
30dB	100%	100%	100%	100%	100%	100%
40dB	100%	100%	100%	100%	100%	100%

由表 2 可以看出, 该算法对各种 SDPQD 有很好的适应性, 在不含噪声水平下分类准确率均为 100%。

#### 3.2 仿真算例二

在测试样本信号上分别添加信噪比为 40 dB, 30 dB, 20 dB 的白噪声。每一类 SDPQD 分别在 3 种噪声环境下随机各取 100 个样本, 总计 1 800 个测试样本进行测试, 分类识别准确率如表 3 所示。

由表 3 可以看出, 该算法在各种噪声环境均有较好的适应性, 因为分类结果比较理想。只是在 20 dB 噪音环境下, 分类正确率有所下降, 那些发生误分类的样本, 主要是因为 SDPQD 信号的扰动幅值变化不明显以及扰动持续时间过短的情况。

### 4 结 论

(1) 基于 S 变换模时频矩阵灰度图像的 SDPQD 分类方法, 建立了各种 SDPQD 的标准判据, 可直接根据标准判据进行扰动分类, 摆脱现行分类方法对分类器的依赖, 方法简单, 分类正确率高。

(2) 对扰动幅值变化不明显以及扰动持续时间过短的扰动, 在高噪音的情况下, 扰动特征被噪音所淹没, 下一步的工作可以对该情况下的扰动设计滤波器, 除去噪音的影响, 提高分类的正确率。

### 参考文献

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12
- [2] 郑岗, 石梅香, 刘丁, 等. 基于时频、多分辨率分析和规则基的电能质量扰动分类 [J]. 电网技术, 2004, 28(3): 65-68
- [3] Heydt G T et al. Application of the Windowed FFT to Electric Power Quality Assessment [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 1411-1416.
- [4] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
- [5] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与

分类方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 1-6.

[6] GANG Z L. Wavelet-based Neural Network for Power Disturbance Recognition and Classification [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1560-1568.

[7] 李天云, 陈晓东, 赵为红, 等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 26-30.

[8] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16-18.

[9] 王晶, 束洪春, 陈学允. 动态电能质量的分形指数小波分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 40-45.

[10] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the Complex Spectrum; the S Transform. IEEE Trans On Signal Process 1996, (44): 998-1001.

[11] I W. C. Lee P. K. Dash. S-transform-based Intelligent System for Classification of Power Quality Disturbance Sig-

nals [J]. IEEE Trans Industrial Electronics 2003, 50(4).

[12] M. V. Chikuri P. K. Dash. Multiresolution S-transform-based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events [J]. IEEE Trans Power Delivery, 2004, 19(1).

[13] 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, 24(4): 51-56.

[14] 刘守亮, 肖先勇, 杨洪耕. 基于 S 变换模时频矩阵相识度的短时电能质量扰动分类 [J]. 电网技术, 2006, 30(5): 67-71.

[15] 边肇祺, 等. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

作者简介:

张中全 (1974), 男, 大学本科, 电力工程师, 成都电业局青白江供电局调控中心主任, 从事多年调度运行管理工作;

赵俊 (1984), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与电力市场。  
(收稿日期: 2009-11-19)

(上接第 8 页)

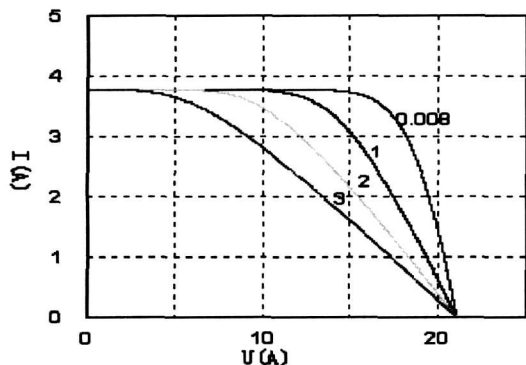


图 8 不同串联电阻  $R_s$  下 I-V 特性曲线

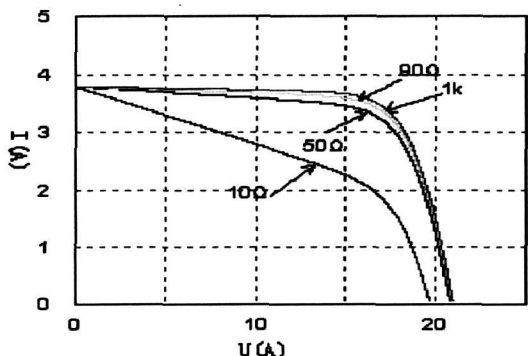


图 9 不同并联电阻  $R_p$  下 I-V 特性曲线

图 8、图 9 为不同串并联电阻下的 I-V 特性曲线, 曲线表明光伏模块的等效串并联电阻对输出特性都有影响。但是, 串联电阻对输出特性的影响较大, 并联电阻影响较小。而且, 随着等效串联电阻越大, 并联电阻越小, 填充因子下降越快, 进而影响模块转换效率。

5 结束语

根据物理机制的光伏电池数学表达式, 在满足工程精度条件下简化处理光伏模块模型。同时建立了基于 PSM 软件的仿真模型。对其模拟仿真结果和数据手册进行对比分析, 发现仿真结果和数据手册信息具有极好的相关性, 同时也证明了该仿真模型正确性和可行性。在 PSM 软件下建立的光伏模块仿真模型, 为下一步研究光伏并网逆变器受温度和光照强度影响的特性提供有效的仿真模型和依据<sup>[6]</sup>。

参考文献

[1] 王章权, 张超, 何湘宁. 基于 Pspice 模拟行为模型的光伏阵列建模 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(8): 225-240.

[2] 赵争鸣, 刘建政. 太阳能光伏发电及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 233-243.

[3] 沈辉, 曾祖勤. 太阳能光伏发电技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 34-36.

[4] Powersim Inc. PSM User's Guide [Z]. USA: Powersim Inc, 2003.

[5] Sharp. NU-SOE3E Single-Crystalline Silicon Photovoltaic Module with 180W Maximum Power Datasheet [Z]. 2005.

[6] 戴训江, 晁勤. 太阳能光伏模块电气特性的数学建模与仿真 [J]. 半导体光电, 2009, 30(1): 47-49.

作者简介:

刘俊杰 (1986) 男, 汉族, 在读硕士研究生, 研究方向为光伏发电及其并网技术。  
(收稿日期: 2010-10-12)