

基于改进 S 变换的复合电压暂降源识别特征分析

陈丽¹, 王硕², 孔维功¹

(1. 邢台职业技术学院, 河北 邢台 054035; 2. 辛集供电公司, 河北 辛集 052360)

摘要: 电压暂降是较常见、影响较大的电能质量问题, 识别电压暂降扰动源对改善和治理电压暂降具有重要意义。分析了由线路短路故障、感应电动机启动、变压器投入等单一电压暂降扰动源和复合电压暂降扰动源引起的电压暂降现象, 提出采用改进 S 变换分析复合电压暂降扰动源识别特征。根据基频幅值曲线和 2~5 倍基频幅值和曲线, 从统计量、熵和能量等方面构建电压暂降识别特征指标, 将这些特征指标作为支持向量机的输入实现对不同类型电压暂降扰动源的分类识别。仿真结果表明, 采用改进 S 变换构建电压暂降识别特征指标比标准 S 变换在电压暂降扰动源分类识别上效果更好。

关键词: 电能质量; 电压暂降; 改进 S 变换; 支持向量机; 分类识别

Method to identify composite voltage sag disturbance sources based on generalized S-transform

CHEN Li¹, WANG Shuo², KONG Wei-gong¹

(1. Xingtai Polytechnic College, Xingtai 054035, China; 2. Xinji Power Supply Company, Xinji 052360, China)

Abstract: Among various types of power quality problems, voltage sag is more common and influential. The identification of voltage sag disturbance sources has great significance to improve the power quality. Different voltage sags, caused by single voltage sag disturbance sources such as short-circuit fault, starting induction motor, transformer energization and composite voltage sag disturbance sources, are analyzed. This paper proposes to analyze identification features of composite voltage sag disturbance sources based on generalized S-transform. According to the fundamental-frequency amplitude curve and sum of amplitude curve of 2nd to 5th harmonic, the feature indices of voltage sag are constructed in terms of statistics, wave morphology, entropy and energy. Then support vector machine (SVM) is employed to perform the identification of different types of voltage sag disturbance sources. The simulation results show that using feature indices of voltage sag based on generalized S-transform is better than those based on standard S-transform in identification of voltage sag disturbance sources.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877069).

Key words: power quality; voltage sag; generalized S-transform; support vector machine; classification and identification

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0027-07

0 引言

电力系统作为全社会运转的关键基础设施之一, 是现代经济社会发展依赖的最主要能源渠道。电能质量是衡量电力系统的一种重要参数。现代工业化的发展使得电力电子设备、调速驱动系统、精密生产线等得到了大规模应用。这些精密系统和设备对电能质量扰动问题更敏感, 对电能质量指标要求更高。电压暂降是其中较常见, 影响较大的电能质量扰动问题之一。线路短路故障、感应电动机启动和变压器投入是引起电压暂降的基本原因^[1-2]。

要实现对电压暂降问题的改善和治理, 需根据不同类型电压暂降扰动源制定相应的解决方案^[3]。扰动源的分类识别是解决这一问题的重要前提。对扰动信号分析处理并构建合适的特征指标是扰动源识别的关键。S 变换作为一种时频可逆的信号处理工具, 适合分析暂态扰动信号^[4-5]。文献[6]利用 S 变换下的模时频矩阵对电能质量扰动进行检测和识别。文献[7]利用 S 变换对电压暂降信号进行时频分析, 提取各类暂降特征, 用多分类器支持向量机实现电压暂降源识别。改进 S 变换是在标准 S 变换的基础上, 对高斯窗函数进行改进, 使其能在时频平面的不同位置具有不同的时频分辨率。文献[8]通过在高斯窗函数中引入尺度调节系数得到广义 S 变

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50877069)

换,实现对暂态扰动的定位和识别。文献[9]利用广义 S 变换实现对电压暂降的分类识别。文献中提出的广义 S 变换可以通过调节系数来分别提高频率分辨率或时间分辨率,但由于调节系数是在全域内设定的常数值,其分辨率的变化趋势仍是单一的。

为了使 S 变换的时频窗口具有更灵活的调节能力,满足其在不同时频段具有不同分辨率的要求。本文引入与频率有关的可调因子,得到一种改进 S 变换。在分析不同类型电压暂降扰动源的基础上,将扰动信号通过改进 S 变换后构建电压暂降识别特征指标,采用支持向量机实现对单一电压暂降扰动源和复合电压暂降扰动源的分类识别。仿真结果表明,改进 S 变换对于扰动源分类识别效果更好。

1 电压暂降扰动源分析

电压暂降是指供电电压均方根值在短时间突然下降到额定值的 90%~10%,其典型持续时间为 0.5~30 周波^[10]。引起电压暂降的扰动源有线路短路故障、感应电动机启动、变压器投入等单一电压暂降扰动源和它们之间相互影响而构成的复合电压暂降扰动源。

1.1 单一电压暂降扰动源引起的电压暂降

(1) 线路短路故障引起的电压暂降

线路短路故障是引起电压暂降的主要原因之一。系统中某一点发生这种电压暂降时,其暂降程度主要取决于故障类型、故障点位置和短路阻抗。图 1~图 3 分别给出了单相短路接地故障、两相短路接地故障和三相短路故障引起的电压暂降三相电压均方根值典型波形。

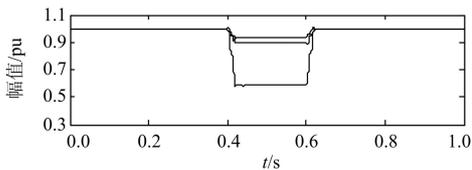


图 1 单相短路接地故障引起的电压暂降

Fig. 1 Voltage sag due to single-phase ground fault

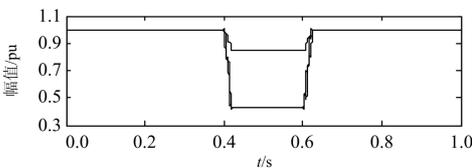


图 2 两相短路接地故障引起的电压暂降

Fig. 2 Voltage sag due to two-phase short circuit and ground fault

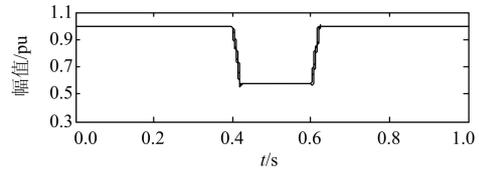


图 3 三相短路故障引起的电压暂降

Fig. 3 Voltage sag due to three-phase short circuit fault

(2) 感应电动机启动引起的电压暂降

感应电动机启动将从电源汲取比正常工作时大得多的电流,其典型值为额定工作电流的 5~6 倍,从而引起电压暂降。感应电动机启动引起电压暂降的程度与感应电动机的容量、局部电网容量等因素有关。图 4 给出了感应电动机启动引起的电压暂降三相电压均方根值典型波形。

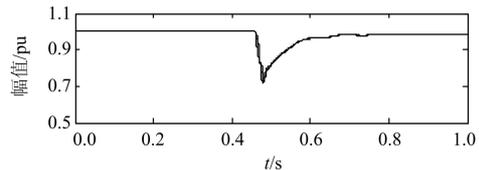


图 4 感应电动机启动引起的电压暂降

Fig. 4 Voltage sag due to the starting of induction motor

(3) 变压器投入引起的电压暂降

变压器投入时,由于铁芯饱和特性会在送电端产生数倍于额定电流的激磁涌流,其大小与变压器投入时正弦电压的初相角及铁芯剩磁有关。初相角为 0° 时产生的涌流最大,此时电压暂降程度也最深。变压器投入引起的电压暂降程度与开关合闸时刻、铁芯中的剩磁和网络阻尼有关。图 5 给出了变压器投入时引起的电压暂降三相电压均方根值典型波形。

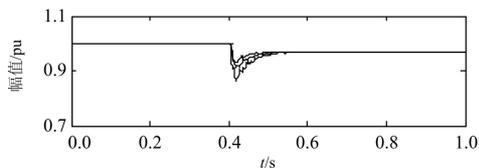


图 5 变压器投入引起的电压暂降

Fig. 5 Voltage sag due to transformer energization

1.2 复合电压暂降扰动源引起的电压暂降

(1) 多级电压暂降

多级电压暂降的产生原因之一是线路故障类型变化。例如:线路发生单相接地故障时,可能会由于故障点的电弧烧坏设备而发展成两相短路接地故障。图 6 给出了由线路故障类型变化引起的多级电压暂降三相电压均方根值典型波形。

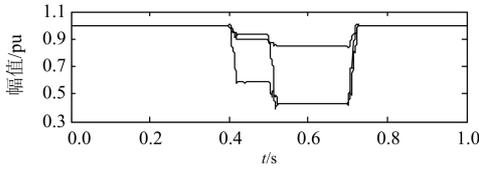


图 6 线路故障类型变化引起的多级电压暂降
Fig. 6 Multistage voltage sag due to fault translation

(2) 感应电动机重新启动引起的电压暂降

发生线路短路故障时, 故障线路中感应电动机由于转子惯性工作在发电机状态, 因此暂降电压不会立即降到最小; 当故障切除时供电电压恢复, 电动机开始加速或重新启动, 暂降电压恢复波形会有一个小的衰减后再逐渐恢复^[11-12]。图 7 给出了线路短路故障清除后感应电动机重新启动时引起的电压暂降三相电压均方根值典型波形。

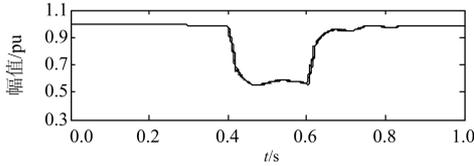


图 7 感应电动机重新启动引起的电压暂降
Fig. 7 Voltage sag due to motor re-acceleration

(3) 感应电动机启动和变压器投入共同作用引起的电压暂降

当感应电动机和变压器同时或相继投入电网运行时会在监测点产生叠加的电压暂降扰动。图 8~图 10 分别给出了感应电动机启动和变压器投入同时发生、感应电动机启动先于变压器投入、变压器投入先于感应电动机启动时引起的电压暂降三相电压均方根值典型波形。

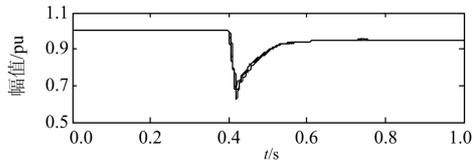


图 8 感应电动机启动和变压器投入同时发生引起的电压暂降

Fig. 8 Voltage sag due to induction motor and transformer putting into operation simultaneously

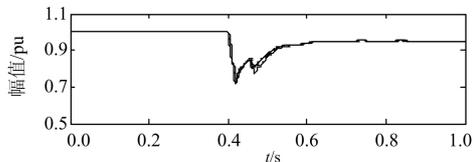


图 9 感应电动机启动先于变压器投入引起的电压暂降
Fig. 9 Voltage sag due to induction motor start prior to the transformer energization

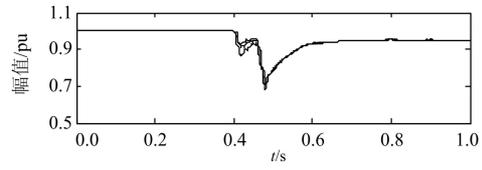


图 10 变压器投入先于感应电动机启动引起的电压暂降
Fig. 10 Voltage sag due to transformer energization prior to the starting induction motor

通过对六种不同扰动源引起的电压暂降现象分析可知, 不同类型扰动源引起的电压暂降波形在暂降深度、暂降相数、波形对称性、暂降开始和恢复波形等方面具有不同特点。因此分析电压暂降信号并构建合适的特征指标能实现对不同类型电压暂降扰动源的分类识别。

2 改进 S 变换

信号 $h(t)$ 的一维连续 S 变换表达式如下

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(t-\tau, f)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

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

式中: $w(t-\tau, f)$ 为高斯窗函数; τ 为平移因子, 用于控制高斯窗在时间轴 t 上的位置; f 为频率; i 为虚数单位。

利用傅里叶变换和卷积定理, S 变换可通过傅里叶变换实现快速计算, 即

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f)e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}} e^{i2\pi\alpha\tau} d\alpha \quad (3)$$

对连续时间信号 $h(t)$ 离散采样得到序列 $h[kT]$ ($k=0,1,2,\dots,N-1$), 采样间隔为 T , 总采样点数为 N 。令式(3)中 $f \rightarrow n/NT$ 且 $\tau \rightarrow jT$, 则可得一维离散 S 变换表达式为

$$S(jT, \frac{n}{NT}) = \sum_{m=0}^{N-1} H[\frac{m+n}{NT}] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{\frac{i2\pi mnj}{N}}, n \neq 0 \quad (4)$$

$$S(jT, 0) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h(\frac{m}{NT}), n = 0 \quad (5)$$

式中, $j, m, n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

序列 $h[kT]$ 经 S 变换后得到一个复时频矩阵, 行向量对应离散时间采样点, 列向量对应离散频率采样点。对 S 矩阵取模后得到 S 模矩阵, 其中各元素值是对应时间和频率的信号幅值大小。

由式(2)可知, 标准 S 变换中高斯窗宽度与频率成反比, 使得 S 变换在低频段具有较高的频率分辨率, 在高频段具有较高的时间分辨率。电能质量分

析中有些低频信号对时间的分辨率要求比较高,比如暂降分析中要求对暂降进行精确的时间定位和幅值计算,而含有谐波的扰动信号要求对频率分辨率较高。这就希望对 S 变换进行改进,使高斯窗具有灵活的调节能力,引入一个与频率有关的调节因子 σ_f ,使其在不同时频平面具有不同的分辨率。将式(2)中的窗函数改进^[13]为

$$w(t, f) = \frac{|f|}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2\sigma_f^2}} \quad (6)$$

式中, $\sigma_f = kf + b$, 其中 k 、 b 为常数。

则改进 S 变换的表达式为

$$S(\tau, f, k, b) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{(kf + b)\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2(kf+b)^2}} e^{-i2\pi ft} dt \quad (7)$$

3 构建电压暂降识别特征指标

对电压暂降扰动信号分析时,为保证对低频信号具有较高的时间分辨率同时对高频信号具有较高的频率分辨率。在大量实验的基础上,确定改进 S 变换的可变因子 $\sigma_f = 0.054f + 0.5$ 。图 11~图 13 分别为线路短路故障、感应电动机启动和变压器投入引起的电压暂降信号通过改进 S 变换后得到的频谱峰值曲线。

从图 11~图 13 可以看出,由于变压器励磁涌流

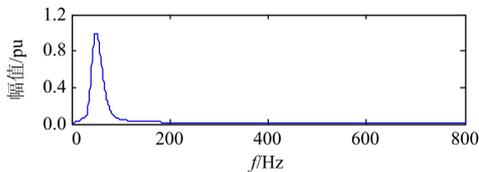


图 11 线路短路故障引起的电压暂降频谱峰值曲线
Fig. 11 Spectrum peak curve of voltage sag due to short-circuit fault

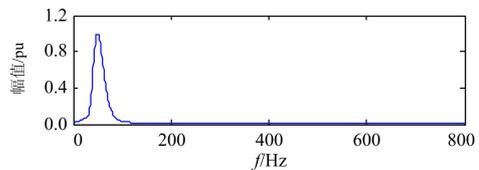


图 12 感应电动机启动引起的电压暂降频谱峰值曲线
Fig. 12 Spectrum peak curve of voltage sag due to the starting of induction motor

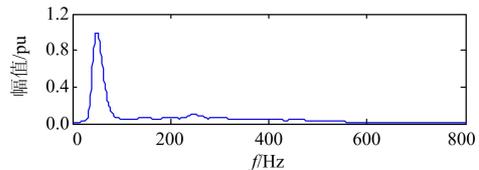
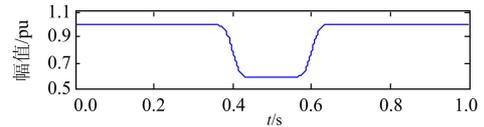
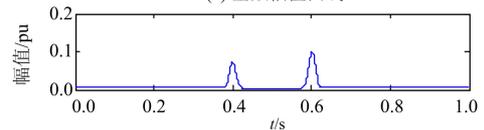


图 13 变压器投入引起的电压暂降频谱峰值曲线
Fig. 13 Spectrum peak curve of voltage sag due to transformer energization

的影响,变压器投入引起的电压暂降波形中含有高次谐波分量,以 2~5 次谐波为主,而线路短路故障和感应电动机启动等引起的电压暂降主要以工频分量变化为主。图 14~图 19 为六种不同类型电压暂降扰动源引起的电压暂降波形经过改进 S 变换后得到的基频幅值曲线和 2~5 倍基频幅值和曲线。



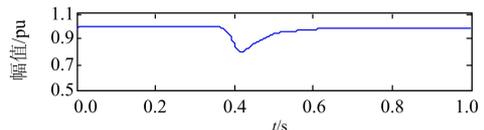
(a) 基频幅值曲线



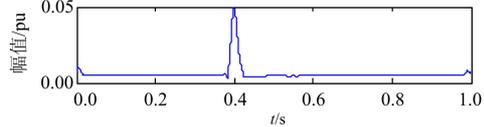
(b) 2~5倍基频幅值和曲线

图 14 线路短路故障

Fig. 14 Short-circuit fault



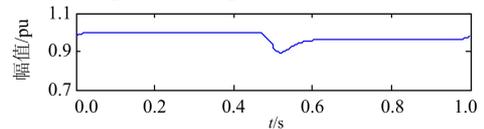
(a) 基频幅值曲线



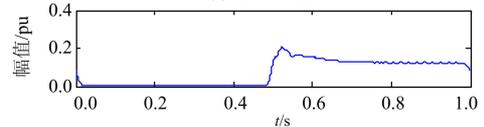
(b) 2~5倍基频幅值和曲线

图 15 感应电动机启动

Fig. 15 Starting induction motor



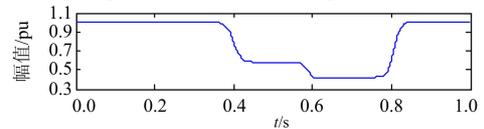
(a) 基频幅值曲线



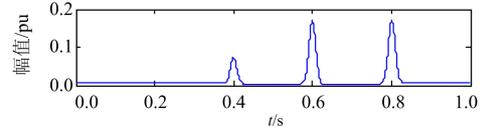
(b) 2~5倍基频幅值和曲线

图 16 变压器投入

Fig. 16 Transformer energization



(a) 基频幅值曲线



(b) 2~5倍基频幅值和曲线

图 17 多级电压暂降

Fig. 17 Multistage voltage sag

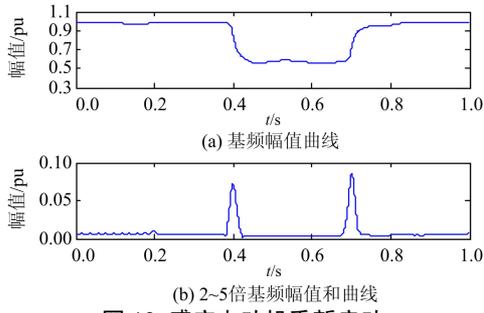


图 18 感应电动机重新启动

Fig. 18 Induction motor re-acceleration

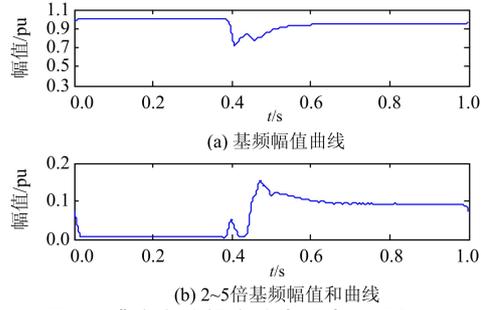


图 19 感应电动机启动先于变压器投入

Fig. 19 Induction motor start prior to transformer energization

从图 14~图 19 可以看出, 基频幅值曲线和 2~5 倍基频幅值和曲线能反映出不同类型电压暂降扰动源引起的电压暂降信号不同特征。针对电压暂降扰动源分类识别, 提出从统计量、熵、能量等方面构建识别特征指标。其中统计量包括均值、标准差、偏度、峭度、均方根值; 熵包括香农熵、对数能量熵。根据基频幅值曲线和 2~5 倍基频幅值和曲线构建特征指标的表达式, 如表 1 所示。表中, $j=1,2$, $S_1(k)$ 为基频幅值序列, $S_2(k)$ 为 2~5 倍基频幅值和序列, $k=0,1,\dots,N-1$, p 表示 A、B、C 三相。

表 1 特征指标表达式

Table 1 Formulation of feature indices

序号	特征指标	计算式
1	均值	$F_{1p}(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_{jp}(k)$
2	标准差	$F_{2p}(j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [S_{jp}(k) - F_{1p}(j)]^2}$
3	偏度	$F_{3p}(j) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{S_{jp}(k) - F_{1p}(j)}{F_{2p}(j)} \right]^3$
4	峭度	$F_{4p}(j) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{S_{jp}(k) - F_{1p}(j)}{F_{2p}(j)} \right]^4$
5	均方根值	$F_{5p}(j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_{jp}^2(k)}$
6	香农熵	$F_{6p}(j) = -\sum_{k=0}^{N-1} [S_{jp}^2(k) \log(S_{jp}^2(k))]$
7	对数能量熵	$F_{7p}(j) = \sum_{k=0}^{N-1} \log(S_{jp}^2(k))$
8	能量	$F_{8p}(j) = \sum_{k=0}^{N-1} S_{jp}^2(k)$

电压暂降扰动信号通过计算每相可得到 16 个特征指标, 三相总计为 3×16 个特征指标。电压暂降扰动源识别是对监测点三相电压综合分析得到的, 因而需要对三相电压所得特征指标进行处理, 这里采用算术平均, 如式(8)所示。

$$F_i(j) = \frac{F_{iA}(j) + F_{iB}(j) + F_{iC}(j)}{3} \quad (8)$$

式中, $i=1,2,\dots,16$, 表示 16 种特征指标。

4 仿真验证

参照文献[3]的电压暂降仿真系统模型, 本文在 Simulink 下建立的仿真系统模型如图 20 所示。图中变压器 T_1 、 T_2 变比为 110 kV/10.5 kV; 变压器 T_3 、 T_4 变比为 10 kV/0.4 kV; F 为故障点, M 为测量点。

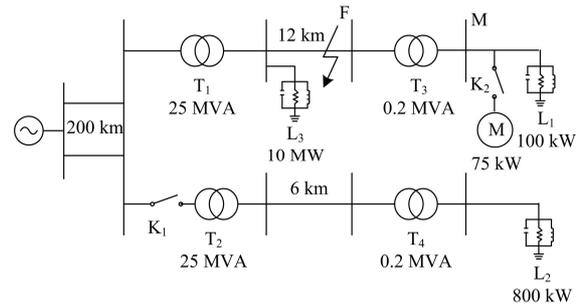


图 20 电压暂降仿真系统

Fig. 20 Voltage sags simulation system

对于线路短路故障, 改变故障原因、故障位置、线路负荷、故障起止时刻及过渡电阻的大小; 对于感应电动机启动, 改变启动时刻、线路负荷及上级变压器容量; 对于变压器投入, 改变投入时刻、线路负荷及变压器容量; 对于复合电压暂降扰动源引起的电压暂降, 改变仿真系统模型中相应模块参数。通过仿真分别获取类型 1(线路短路故障)、类型 2(感应电动机启动)、类型 3(变压器投入)、类型 4(多级电压暂降)、类型 5(感应电动机重新启动)、类型 6(感应电动机启动和变压器投切共同作用)等电压暂降信号各 100 组样本数据。

为了分析本文提出的方法在不同噪声强度下的有效性, 选取的测试样本包括无噪声信号和信噪比为 40 dB、30 dB 和 20 dB 的含噪声信号, 信号中加入的噪声为高斯白噪声。其中训练样本为无噪声信号, 每种类型各 50 组; 不同信噪比的测试样本, 每种类型各 50 组。

将训练样本通过分析处理后得到的特征指标用“1 对 1”方法构造的支持向量机(SVM)多分类器进行训练。参照文献[14]的方法, SVM 多分类器的

核函数为高斯径向基函数，对 SVM 的惩罚参数 C 和核函数参数 σ 的选取采用粒子群寻优算法。参数 C 的变化范围为 $[0.1, 100]$ ，参数 σ 的变化范围为 $[0.1, 100]$ 。将样本分别通过改进 S 变换和标准 S 变换进行分析，基于改进 S 变换得到特征指标后训练 SVM 多分类器记为 SVM1，基于标准 S 变换得到特征指标后训练 SVM 多分类器记为 SVM2。SVM1 和 SVM2 的 C 和 σ 如表 2 所示。两种情况的测试样本分类识别测试结果如表 3 和表 4 所示。

表 2 SVM1 和 SVM2 最优参数对

Table 2 Optimal parameters of SVM1 and SVM2

分类器	惩罚参数 C	核函数参数 σ
SVM1	28.49	0.1
SVM2	12.81	0.8

表 3 基于改进 S 变换的扰动源分类识别测试结果

Table 3 Results of classification and identification based on generalized S-transform

信噪比	测试样本数	识别正确数	识别准确率/%
无噪声	300	297	99.00
40 dB	300	296	98.67
30 dB	300	296	98.67
20 dB	300	290	96.67

表 4 基于标准 S 变换的扰动源分类识别测试结果

Table 4 Results of classification and identification based on standard S-transform

信噪比	测试样本数	识别正确数	识别准确率/%
无噪声	300	288	96.00
40 dB	300	287	95.67
30 dB	300	286	95.33
20 dB	300	248	82.67

由表 3 和表 4 可知，基于改进 S 变换的识别特征构建方法对不同信噪比的暂降扰动信号有较高的识别准确率，在低信噪比情况下识别准确率提升明显。改进 S 变换与标准 S 变换相比，在电压暂降扰动源分类识别上效果更好。

5 结论

本文对线路短路故障、感应电动机启动、变压器投入等单一电压暂降扰动源和 3 种复合电压暂降扰动源引起的电压暂降现象进行了分析。通过改进 S 变换得到基频幅值曲线和 2~5 倍基频幅值和曲线，从统计量、熵和能量等方面构建电压暂降识别特征指标。仿真结果表明，采用改进 S 变换构建电压暂降识别特征指标比标准 S 变换在电压暂降扰动源分

类识别上效果更好。

参考文献

[1] 杨洪耕, 刘守亮, 肖先勇, 等. 基于 S 变换的电压凹陷分类专家系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 98-104.
YANG Hong-geng, LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong, et al. S-transform based on expert system for classification of voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 98-104.

[2] 李康瑞, 杨洪耕. 基于 S 变换标准模板相似度的电压暂降分类[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 139-146.
LI Kang-rui, YANG Hong-geng. S-transform based on classification for voltage dips according to standard template similarity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 139-146.

[3] 王克星, 宋政湘, 陈德桂, 等. 基于小波变换的配电网电压暂降的扰动源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34.
WANG Ke-xing, SONG Zheng-xiang, CHEN De-gui, et al. Interference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 29-34.

[4] 黄南天, 徐殿国, 刘晓胜. 基于 S 变换与 SVM 的电能质量复合扰动识别[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 23-30.
HUANG Nan-tian, XU Dian-guo, LIU Xiao-sheng. Identification of power quality complex disturbances based on S-transform and SVM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 23-30.

[5] 杜林, 戴斌, 陆国俊, 等. 基于 S 变换局部奇异值分解的过电压特征提取[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 147-153.
DU Lin, DAI Bin, LU Guo-jun, et al. Overvoltage features extraction based on S-transform and local singular value decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 147-153.

[6] 孙楚平, 杨旭. 基于 S 变换模时频矩阵的电能质量扰动检测与识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 40(7): 60-65.
SUN Chu-ping, YANG Xu. Detection and recognition of power quality disturbance based on module time-frequency matrixes by S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 40(7): 60-65.

- [7] 吕干云, 方奇品, 蔡秀珊. 基于多分类支持向量机的电压暂降源识别[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 152-155.
Lü Gan-yun, FANG Qi-pin, CAI Xiu-shan. Identification of voltage sags source based on multi-class support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 152-155.
- [8] 刘奇, 周维维, 卢伟国. 基于广义 S 变换的暂态电能质量扰动定位与识别[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 60-65.
LIU Qi, ZHOU Luo-wei, LU Wei-guo. Localization and identification of transient power quality disturbances based on generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 60-65.
- [9] 全惠敏, 戴瑜兴. 电压暂降的改进 S 变换分析与分类[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(3): 45-50.
QUAN Hui-min, DAI Yu-xing. Detection and classification of voltage sags based on modified S-transform[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011, 38(3): 45-50.
- [10] 鲁波涌, 黄文清. 结合小波变换和能量算子的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 171-177.
LU Bo-yong, HUANG Wen-qing. Hybrid wavelet-energy operator method for voltage sag detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 171-177.
- [11] Mladen, Kezunovic, YUAN Liao. A new method for classification and characterization of voltage sags[J]. Electric Power System Research, 2001(58): 27-35.
- [12] Bollen M H J. The Influence of motor reacceleration on voltage sags[C] // IEEE Trans on Industry Applications, 1995, 31(4): 667-674.
- [13] George N V, Sahu S S, Mansinha L, et al. Time localized band filtering using modified S-transform[C] // 2009 International Conference on Signal Processing Systems, 2009: 42-46.
- [14] 陆宁, 武本令, 刘颖. 基于自适应粒子群优化的 SVM 模型在负荷预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 43-47.
LU Ning, WU Ben-ling, LIU Ying. Application of support vector machine model in load forecasting based on adaptive particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 43-47.

收稿日期: 2013-05-28

作者简介:

陈丽(1977-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力自动化, 智能控制; E-mail: xingtaichenli@sohu.com

王硕(1988-), 男, 硕士, 研究方向为电能质量检测与分析;

孔维功(1979-), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为电气自动化及电子技术应用。