

基于多分类支持向量机的电压暂降源识别

吕千云, 方奇品, 蔡秀珊

(浙江师范大学数理与信息工程学院, 浙江 金华 321004)

摘要: S变换具有很好的时频分析能力, 能精确提取突变信号的关键特征信息。在分析S变换原理基础上, 提出一种基于多分类支持向量机的电压暂降源识别方法。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; 用多分类支持向量机对特征进行训练与识别。通过仿真算例验证, 该方法能有效识别电压暂降源, 可应用于电能质量监测系统。

关键词: 电能质量; S变换; 多分类支持向量机; 电压暂降源; 识别

Identification of voltage sags source based on multi-class support vector machine

Lü Gan-yun, FANG Qi-pin, CAI Xiu-shan

(College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: Due to its good performance of time-frequency analysis, S-transform is utilized to obtain the amplitude, time, frequency and phase of the transient signal. A new approach based on S-transform and multi-class support vector machine (SVM) is presented for identification of voltage sags source. Firstly, through S-transform time-frequency analysis, some characteristics related to voltage sags are extracted, and those features are trained and identified using multi-class SVM. The experiment results confirm that this approach is effective to identify the voltage sags source and can be applied to power quality monitoring system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Zhejiang Province(No.Y1090182).

Key words: power quality; S-transform; multi-class support vector machine; voltage sags source; identification

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0151-05

0 引言

电压暂降是指供电电压有效值快速下降至额定值的10%~90%的事件, 其典型持续时间为0.5~30个周波^[1]。尽管其持续时间很短, 但对用户造成的损失却极为严重。据统计80%服务器出现瘫痪以及用户端45%左右数据丢失均与电压暂降有关。所以对电压暂降进行研究不仅有助于解决供电部门和用户之间的纠纷, 而且有助于配电系统电能质量污染治理^[2-3]。

目前, 电压暂降源识别方法主要有: 文献[4]提出一种基于事件的电压暂降源识别方法, 根据暂降特征, 识别暂降源, 实现暂降源定位。文献[5-6]提出小波和智能算法相结合的方法, 首先通过小波提取暂降特征量, 然后用智能算法进行分类, 但提取特征值很少。文献[7]提出基于卡尔曼滤波的暂降源分类方法, 充分的考虑发各个事件引起的暂降, 效

果较好, 但实时性差。

S变换是在连续小波变换和短时傅里叶变换基础上结合发展起来的一种时频分析方法, 具有良好时频分析能力, 它在电压扰动和谐波检测^[8-9]方面取得丰富的成果。本文在分析S变换原理基础上, 提出基于多分类支持向量机的电压暂降源识别方法。首先通过S变换提取各种类型暂降特征, 然后用多分类支持向量机分类器对特征进行训练和分类。仿真结果表明该方法能有效地识别暂降类型。

1 S变换的基本原理

S变换^[10]是Stockwell于1996年提出的一种时频可逆分析方法, 是对短时傅里叶变换和小波变换的组合和扩展。

信号 $s(t)$ 的S变换定义如下:

$$W(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f(t-\tau)} dt \quad (1)$$

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y1090182)

式中： $\psi(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2}{2}} e^{-j2\pi ft}$ 为高斯窗口； τ 为控制高斯窗口在时间 t 轴位置的参数。

其逆变换为：

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} [\int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau] e^{j2\pi ft} df \quad (2)$$

通过 S 变换与傅里叶之间的关系可推出 S 变换的离散形式为：

$$S[jT, \frac{n}{NT}] = \sum_{m=0}^{N-1} X[\frac{m+n}{NT}] e^{(-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2})} e^{(j\frac{2\pi m i}{N})} \quad (3)$$

2 电压暂降仿真

电压暂降按产生原因可分故障类暂降和非故障类暂降。故障类暂降主要由短路故障引起；而非故障类暂降是由变压器激磁涌流、电动机启动及其它大容量负荷投入等原因引起的。

2.1 短路故障引起的暂降

在电力系统运行过程中，由于雷电、电缆损坏、设备故障、动物以及绝缘污染等原因很有可能引起短路故障^[11]。当短路故障发生时，故障点附近节点电压会急剧下降，其恢复时间取决于故障清除时间。突变点之间电压幅值基本不变，期间可能再次发生暂降。图 1 所示分别为三相短路、两相短路和单相短路故障引起暂降的仿真波形图。

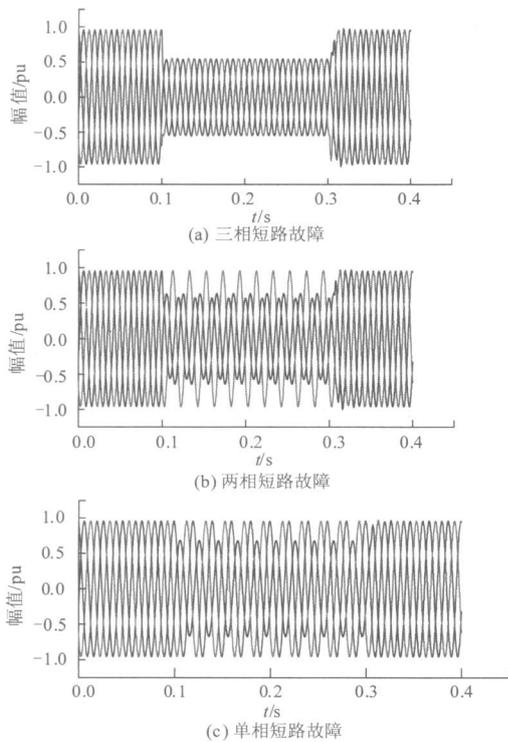


图 1 短路故障引起的电压暂降

Fig.1 Voltage sags due to short circuit faults

2.2 变压器投入引起的暂降

当变压器终端电压发生剧烈变化时，由于变压器铁芯的饱和效应可能产生很大的激磁涌流，从而将引起附近节点电压的下降。变压器投运引起的暂降总是三相不平衡，线圈铜损导致暂降电压恢复是个逐渐过程，暂降幅值一般高于正常额定值的 80%，且暂降中含有 2~5 次谐波成分。图 2 为变压器投入引起的暂降波形图。

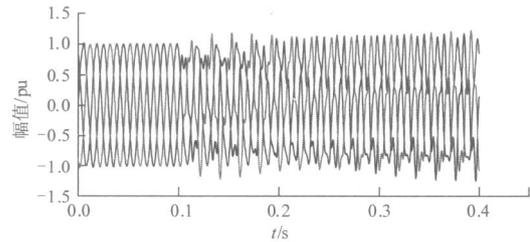


图 2 变压器投入引起的暂降

Fig.2 Voltage sags due to transformer saturation

2.3 电动机启动引起的暂降

当感应电动机启动时，定子电流增加为正常工作电流的 2~8 倍，使系统阻抗上的分压增大，从而导致电压下压，引起暂降。电压暂降的程度取决于电动机的特性及联接处系统的短路容量。发生暂降时，电压快速下降并逐渐恢复，只有一次幅值的突变，且三相基本对称。图 3 为电动机启动时引起暂降的仿真波形图。

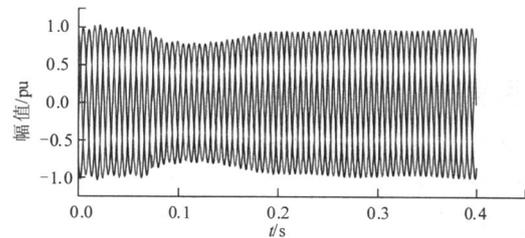


图 3 电动机启动引起的暂降

Fig.3 Voltage sags due to induction motor strating

3 基于 S 变换和多分类支持向量机的电压暂降源识别

3.1 暂降特征提取

3.1.1 谐波增量

谐波是变压器投入引起暂降的一个重要特征，尤其是 2 次谐波，它可达到总谐波量的 30%~50%。因此，提取 S 模矩阵中基波和 2 次谐波对应的幅值，得到暂降发生前、后 2 次谐波增量，用来判断暂降是否由变压器引起。

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2sag}}{U_{1sag}} - \frac{U_{2pre}}{U_{1pre}} \quad (4)$$

式中: $U_{2\text{sag}}$ 、 $U_{1\text{sag}}$ 分别指暂降发生时 2 次谐波和基波的电压有效值; $U_{2\text{pre}}$ 、 $U_{1\text{pre}}$ 分别指暂降发生前 2 次谐波和基波的电压有效值。

3.1.2 幅值突变次数

当电压幅值发生突变时, 会引起一定范围的频率变化。可通过观测 S 模矩阵各频率幅值变化来确定幅值突变次数。短路故障引起的暂降幅值突变次数可达两次或两次以上; 而电动机引起的暂降只存在一次幅值的突变。本文通过提取 S 模矩阵 5 次谐波对应的幅值, 来确定突变次数。如图 4 所示为短路故障和电动机启动引起暂降的 5 次谐波幅值变化曲线。

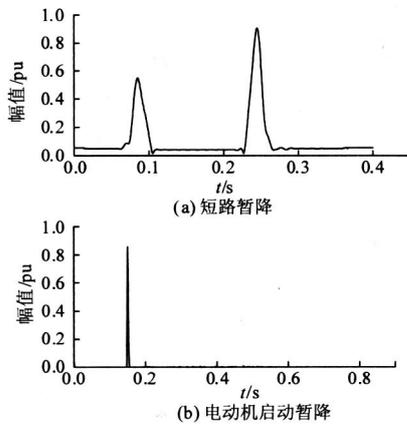


图 4 2 种暂降的 5 次谐波幅值变化曲线
Fig.4 Amplitude curves of 5th-harmonic of two types of voltage sags

由图 4 可见, 短路故障引起暂降会造成 2 次或以上的突变, 而电动机启动引起的暂降只有一次突变。

3.1.3 恢复斜率

提取 S 模矩阵中基频对应幅值, 得到基频幅值曲线, 便可求得各暂降恢复段斜率。图 5 为三种原因引起的电压暂降的基频幅值曲线, 从图 5 中可清楚发现, 不同原因引起的暂降有着不同的恢复斜率。

3.1.4 暂降时间比

暂降持续时间是指电压有效值从下降正常值的 90% 到恢复正常值 90% 所经历的时间, 平稳时间是指电压下降到最低点后所持续的时间。暂降时间比为:

$$\tau = \frac{T_w}{T} \quad (5)$$

式中, τ 、 T_w 、 T 分别为暂降时间比、平稳时间和暂降持续时间。由基频幅值曲线上可以看到, 各种暂降对应的持续时间和平稳时间都是不同的。

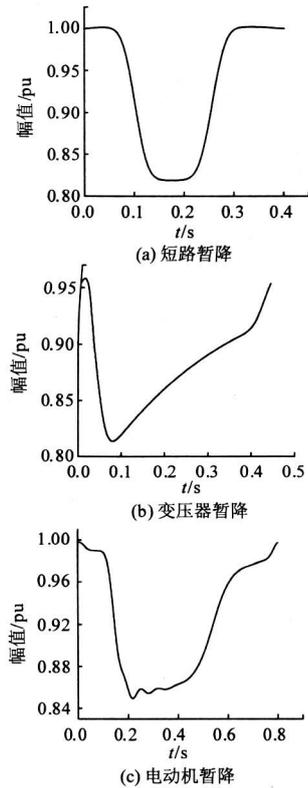


图 5 三种暂降基频幅值曲线

Fig.5 The fundamental-frequency amplitude curve of three types of voltage sags

3.1.5 三相不平衡度

三相电机是三相对称负荷, 其引起暂降是对称的; 三相短路引发的暂降为对称的, 而其他短路引起的暂降为不对称的; 变压器投入引发的暂降是三相不对称的。

根据对称分量法可求得正序、负序电压离散序列 $u_1(k)$ 、 $u_2(k)$, 然后分别求出电压正序、负序的均方根值, 便可求出三相不平衡度 ε_1 。

$$\varepsilon_1 = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (6)$$

式中, U_1 、 U_2 分别为正序和负序的均方根值。

通过程序自动提取得到 11 个特征量, 其中包括每相的谐波增量 ΔU_2 、每相恢复斜率 NP 、每相持续时间比 τ 、突变次数 NC 及三相不平衡度 ε_1 。程序自动提取特征量规则: 突变次数, 将 5 倍基频幅值变化曲线规一化后提取幅值大于 0.5 pu 的尖峰次数, 因为变压器引起暂降中存在 2~5 次谐波分量, 影响突变次数提取, 因而统一设定其为 0; 暂降持续时间 T 为下降到 90% 到恢复到 90% 的时间段, 当下降幅度小于 10% 时, 便认为不存在暂降, 暂降时间取为 0, 相应的斜率也为 0。自动提取到的 11 个

特征量包含各原因引起暂降的特征信息，能够有效用于 SVM 训练与测试。

3.2 多分类支持向量机电压暂降源识别

本文采用“one-against-rest”多分类支持向量机实现电压暂降源识别。为实现 5 种电压暂降源识别，需构建 5 个二分类器。在样本训练时，对于第 j 个二分类器，第 j 类训练样本为正类，其余的为负类，可得到 5 个决策函数：

$$f^j(x) = \text{sign}[g^j(x)] \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (7)$$

其中

$$g^j(x) = \sum_{i=1}^k a_i^j y_i K(x, x_i) + b^j \quad (8)$$

式中： $K(x, x_i)$ 为核函数； x_i 为训练样本特征向量； y_i 为训练目标； a_i^j 为第 j 类拉格朗日乘子； b^j 为第 j 类阈值。

当出现多个 $g^j(x) \geq 0$ 或者没有 $g^j(x) \geq 0$ 的情况时，便出现不可分类问题，为解决此问题引入最大决策值法，即将输入样本分到 $g^1(x), g^2(x), \dots, g^5(x)$ 最大值所于应的类别。

3.2.1 网络训练

设置多分类支持向量机 OSU-SVM 中控制对错样本惩罚程度的可调参数和径向基核函数的参数都为 1，然后对训练样本进行训练。为实现三相短路故障、两相短路故障、单相短路故障、电动机启动和变压器投入这 5 种暂降源引起电压暂降识别，网络训练的目标为 [1 2 3 4 5]，即若为三相短路故障，则输出为 1；两相短路故障，则输出为 2；单相短路故障，则输出为 3；电动机启动，则输出为 4；

则变压器投入，输出为 5。

3.2.2 网络测试

将测试样本输入给训练好的 SVM 中，便可识别出电压暂降源类型。如果输入样本为三相短路故障，则输出为 1；两相短路故障，则输出为 2，以此类推可识别出 5 种电压暂降源的类型。

4 仿真结果及分析

在一台 Pentium 1 500 MHz 内存 384 MB 的计算机上，运行 Matlab6.0 中的 Simulink 仿真产生各种电压暂降信号。通过随机改变仿真模型中的负荷大小、线段长度等各参数产生 50 个不同种类的训练样本，然后用相同的方法产生 50 个测试样本。表 1 中列举了部分训练样本。

OSU-SVM 的测试样本=[10 个三相短路 10 个两相短路 10 个单相短路 10 个电动机启动 10 个变压器投入]

OSU-SVM 的输出结果=[1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5]

根据 OSU-SVM 输出结果可发现，OSU-SVM 正确识别出 10 个三相短路、9 个两相短路、10 个单相短路、10 个电动机启动和 10 个变压器投入引起的电压暂降，识别正确率可达 98%。根据文献资料，表 2 列举了其他方法在识别电压暂降源方面取得的成果。

由表 2 可见，基于 S 变换和多分类支持向量机的电压暂降源识别方法，具有更高的准确率，能有效和准确地识别出电压暂降源。

表 1 部分测试样本数据

Tab.1 Part of testing data

测试样本		谐波增量			恢复斜率			暂降时间			跳变次数	不平衡度
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相		
三相短路	1	0.009 1	0.009 1	0.004 5	1.627 3	1.685 0	1.639 6	0.107 5	0.105 9	0.112 3	2	0.013 5
	2	0.005 7	0.006 1	0.003 0	1.283 5	1.825 0	1.289 0	0.120 3	0.119 7	0.131 2	2	0.007 1
两相短路	1	0.002 8	0.000 119	0.000 117 9	0	1.040 9	1.203 0	0	0.935 6	0.099 8	2	0.025 8
	2	0.006 7	0.000 175 9	0.000 161 4	1.098 3	0	0.952 9	0.098 9	0	0.112 6	2	0.047 7
单相短路	1	0.004 2	0.004 3	0.000 127 5	0.742 4	0	0	0.131 1	0	0	2	0.060 3
	2	0.000 460 7	0.000 144 8	0.000 682 8	1.387 2	0	0	0.091 1	0	0	2	0.054 5
电动机	1	0.002 9	0.000 593 6	0.000 973 8	0.302 8	0.305 0	0.304 6	0.008 6	0.010 2	0.009 9	1	0.002 2
	2	0.002 4	0.000 192 6	0.001 1	0.224 1	0.217 1	0.218 0	0.007 7	0.007 9	0.007 8	1	0.003 1
变压器	1	0.083 7	0.062 4	0.031 3	0.383 5	0.159 7	0.063 3	0.004 3	0.006 9	0.050 8	0	0.085 33
	2	0.082 6	0.062 2	0.032 5	0.381 5	0.160 4	0.063 4	0.063 4	0.007 0	0.046 4	0	0.087 83

表 2 方法识别的精度对比

Tab.2 Accuracy comparison of methods

暂降源	有效值法 ^[12]	小波-神经网络法	S-SVM 法
故障	91%	85%	96%
电动机启动	100%	83.3%	100%
变压器投入	88%	87.5%	100%

5 结论

S 变换具有很好的时频分析能力, 能有效提取突变信号的幅值、频率、突变时间等特征信息。本文在分析 S 变换原理分析和电压暂降特征检测基础上, 提出一种基于多分类支持向量机的电压暂降源识别方法。仿真测试结果表明该方法识别正确率高达 98%, 实时性好, 能够很好地应用于电能质量在线检测与识别。

参考文献

- [1] Zhang Lidong, Bollen Math H J. Characteristic of voltage dips in power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15: 827-832.
- [2] Melhorn C J, Davis T D, Beam G E. Voltage sags: their impact on the utility and industrial customers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34 (2): 549-558.
- [3] McGranaghan M, Roettger B. Economic evaluation of power quality[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22 (2): 8-12.
- [4] Ahn Seon-Ju, Won Dong-Jun, Chung Il-Yop. Determination of the relative location of voltage sag source according to event cause[C]. // Power & Energy Society. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. New York(USA): 2004.
- [5] 王克星, 宋政湘, 陈德桂. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (6): 29-34.
WANG Ke-xing, SONG Zheng-xiang, CHEN De-gui. Interference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (6): 29-34.
- [6] 张波. 电压暂降特征提取与扰动原因分析[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
ZHANG Bo. Extraction the voltage sag characters and identification voltage sags cause[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.
- [7] Emmanouil Styvaktakis. Automating power quality analysis[D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2002.
- [8] 吕干云, 冯华君, 朱更军, 等. 基于 S 变换的电力系统间谐波检测[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (6): 1676-1677.
Lü Gan-yun, FENG Hua-jun, ZHU Geng-jun, et al. Decection of inter-harmonics in power system based on S-transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (6): 1676-1677.
- [9] 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): 76-79.
YANG Hong-geng, LIU Shou-ling, 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): 76-79.
- [10] Stockwell R G, Mansinha L. Localization of the complex spectrum: the S transform[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1996, 44: 998-1001.
- [11] 段建东, 张保会. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (18): 30-34.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui. Identification of lightning and fault in EHV transmission line transient-based protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (18): 30-34.
- [12] Styvaktakis Emmanouil, Bollen Math H J. Expert system for classification and analysis of power system events[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17 (2): 423-428.

收稿日期: 2009-11-13; 修回日期: 2010-01-10

作者简介:

吕干云 (1976-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为电能质量、电力电子及人工智能在电力系统中的应用;
E-mail: ganyun_lv@zjnu.cn

方奇品 (1985-), 男, 硕士生, 主要研究方向为电力系统电能质量、电子测量。