

DOI: 10.7667/PSPC162008

基于小波域相子的电压暂降特征提取与成因辨识

郑志宇¹, 蔡 翀¹, 张昭丞², 艾 芊², 高 扬², 高志远¹, 郭 镭¹

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 上海交通大学电气系, 上海 200240)

摘要: 有效提取电压暂降的特征并进行成因辨识是确定治理方案的前提。在多分辨分析基础上发展起来的离散小波变换(DWT)具有简单、快速和信息非冗余等特点, 但一般认为不易于提取电压暂降信号的相位跳变特征。基于小波域相子方法对电压暂降的幅值和相角特征进行了有效提取。通过小波域相子的幅值和相位信息构造出电压暂降成因辨识特征指标。最后采用支持向量机(SVM)方法进行了电压暂降成因的辨识。结果表明, 所提方法可以有效实现电压暂降的特征提取和成因辨识。

关键词: 小波域相子; 电压暂降; 特征提取; 成因辨识

Wavelet-based phasor to detect and identify the voltage sag characteristics

ZHENG Zhiyu¹, CAI Chong¹, ZHANG Zhaocheng², AI Qian², GAO Yang², GAO Zhiyuan¹, GUO Lu¹

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd, Shenzhen 518000, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Characteristics extraction and classification of voltage sags is the precondition for choosing the right power quality management measures. Based on the multi-resolution analysis, the Discrete Wavelet Transform (DWT) is simple, fast and non-redundant, but it is generally considered that it is difficult for the wavelet transform to detect the phase shift of the voltage sag. Based on the wavelet-based phasor method, this paper detects and identifies the amplitude and phasor characteristics of voltage sag. Then the source identification features of voltage sag according to amplitude and phasor information of wavelet-based phasor are constructed. Finally, the cause identification of voltage sag is carried out by using the Support Vector Machine (SVM) method. The results show that the proposed method can realize the characteristics extraction and cause identification of voltage sag effectively.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577115).

Key words: wavelet-based phasor; voltage sag; characteristics extraction; source identification

0 引言

电压暂降(voltage sag/dip)一般是指供电电压方均根值突然下降到额定电压的10%~90%,且持续时间不超过10 ms的现象^[1]。近年来随着可调速电机和精密控制设备等敏感设备的大量使用,电压暂降造成的损失甚至可以与停电事故相提并论^[2-4]。电压暂降幅值和持续时间是电压暂降最主要的两个特征^[5],准确有效地提取电压暂降的特征对于合理选择治理方式具有重要意义。

电压暂降特征的提取方法很多,最经典的算法为方均根值检测方法^[6],该方法通过计算电压信号

每个周波(半周波)的方均根值,再与阈值比对来确定暂降发生时刻。但由于需要至少半个周波的数据,检测结果会与实际情况产生一定的延迟^[7]。除此之外,近年来又涌现出来一些新方法,包括短时傅里叶变换^[8-9]、小波变换^[9-13]和S变换^[14-17]等。文献[18]分析对比了STFT与S变换在提取电压暂降特征中的表现,结果显示S变换提取效果要优于STFT算法。然而,S变换计算量较大且存在信息冗余的问题。在多分辨分析基础上发展起来的离散小波变换具有简单、快速和信息非冗余等特点,但却被认为不能提取相位信息^[19-21],文献[22]通过对小波系数进行适当处理,构造出小波域相子,进而可以快速得到波形的幅值和相位信息。

准确的电压暂降成因辨识不仅可以帮助运行

人员及时确定干扰源并有针对性地提出电压暂降的治理方案, 同时在处理用户与供电部门之间的纠纷上具有重要的参考价值。目前研究多从三相电压不平衡度、暂降电压突变程度、谐波和小波熵等方面对电压暂降成因进行辨识^[23-25], 大多需要计算谐波以及其他复杂指标, 对相位跳变特征考虑不足。由于电压暂降的幅值和相位跳变是各种治理设备必须提取的特征, 如何在此基础上构造出识别指标, 对于工程上快速识别电压暂降成因并有针对性地提出治理措施具有重要意义。

本文在小波域相子分析的基础上, 基于提取出的电压暂降幅值和相位跳变特征, 构造出成因辨识的特征指标, 提出了基于小波域相子的辨识方法, 并通过仿真验证了方法的有效性。

1 基于 MODWT 的小波域相子

极大重叠离散小波变换(MODWT)是离散小波变换(DWT)的一种改进形式。MODWT 由于可以包含所有可能初始位置的加权平均, 因此可以消除初始位置选择造成的结果偏差^[26]。因此本文选用 MODWT 作为小波域相子的产生方法。与常规 DWT 相比, 其尺度滤波器和小波滤波器有如下关系:

$$g(i) = \tilde{g}(i) / \sqrt{2} \quad (1)$$

$$h(i) = \tilde{h}(i) / \sqrt{2} \quad (2)$$

对于非抽取型小波变换, 近似系数可以表示为

$$s(n) = \sum_{k=1}^L h(k)x(n-k) \quad (3)$$

式中, L 为滤波器系数 h 的长度。

对于正弦波信号 $x(n)$ 来说, 其总可以表示为

$$x(n) = U \sin(\omega t_n + \theta_0) = U \sin \theta_n \quad (4)$$

$$x(n \pm k) = U \sin(\theta_n \pm k\Delta\varphi) = U \sin \theta_{n \pm k} \quad (5)$$

式中: θ_0 为初始相位; ω 为角频率; $\Delta\varphi = \omega T_s$ 为相邻两采样点间的相位差, T_s 为离散时间间隔。值得注意的是, 此处本文假设信号只含有单一频率, 实际上由于小波变换具有时频多尺度特性, 非单一频率信号可经过多层分解后分别进行分析, 本文不做过多介绍。

在文献[22]的基础上可以推出:

$$s(n) = H_m(\Delta\varphi)U \sin(\theta_n - \theta_h(\Delta\varphi)) \quad (6)$$

$$w(n) = G_m(\Delta\varphi)U \sin(\theta_n - \theta_h(\Delta\varphi)) \quad (7)$$

作辅助函数:

$$y_1 = s(n) + s(n-1) = U_h \sin(\theta_n - \theta_h - \Delta\varphi/2) \quad (8)$$

$$y_2 = K_w(s(n) + s(n-1)) = U_h \cos(\theta_n - \theta_h - \Delta\varphi/2) \quad (9)$$

式中: $U_h = 2H_m(\Delta\varphi)U \cos(\Delta\varphi/2)$; K_w 为正交化参数。

$$K_w = \frac{\cos(\Delta\varphi/2)}{\sin(\Delta\varphi/2)} \quad (10)$$

令

$$Z(n) = y_2(n) + jy_1(n) = R_n e^{j\varphi_n} \quad (11)$$

式中, $Z(n)$ 为小波域相子。理论上, 离散小波变换的近似系数 $s(n)$ 和细节系数 $w(n)$ 中应包含被分析信号的所有信息。其中近似系数 $s(n)$ 主要包含了被分析信号的低频特性, 而高频信息则包含在细节系数 $w(n)$ 中。对于电力系统工频信号来说, 其基频信号的所有信息都蕴含在近似系数中, 因此通过对由近似系数得到的小波域相子分析可以提取出信号的基波信息。

2 电压暂降特征提取

通过对小波域相子 $Z(n)$ 分析可以看出, 可以由其幅值 R_n 计算出所分析信号的幅值特征, 而通过其相角 φ_n 则可以计算出所分析信号的相角特征。对于电压暂降来说, 暂降幅值、持续时间和相位跳变是标称一次电压暂降扰动最主要的三个特征量。因此, 通过对小波域相子 $Z(n)$ 的分析可以实现电压暂降特征的提取, 计算公式为

$$\theta_n = \varphi_n + \theta_h + \Delta\varphi \pm 2\pi \quad (12)$$

$$U = R_n / (2H_m(\Delta\varphi) \cos(\Delta\varphi/2)) \quad (13)$$

图 1、图 2 分别为原始信号以及发生电压暂降信号的小波域相子幅值和相位信息。被分析信号为

$$x(t) = 5 \sin(\omega t) \quad (14)$$

采样率为 1000 Hz, 在 1 s 时刻发生幅值为 3、相角跳变为 0.4π 的电压暂降事件, 持续时间 1 s。

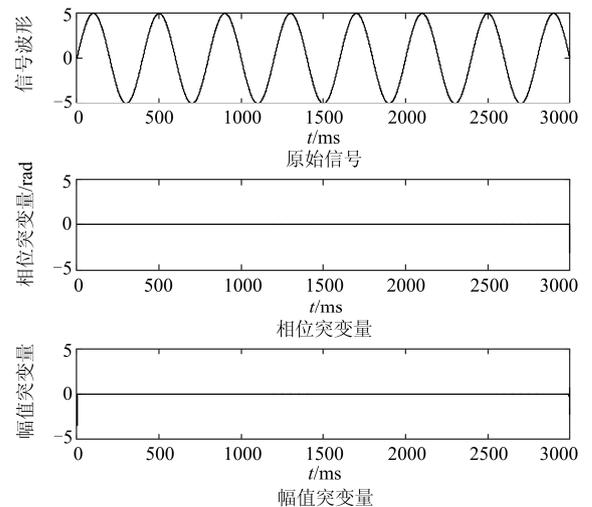


图 1 原始信号的相位突变量和幅值突变量

Fig. 1 Phase and amplitude variables of the original signals

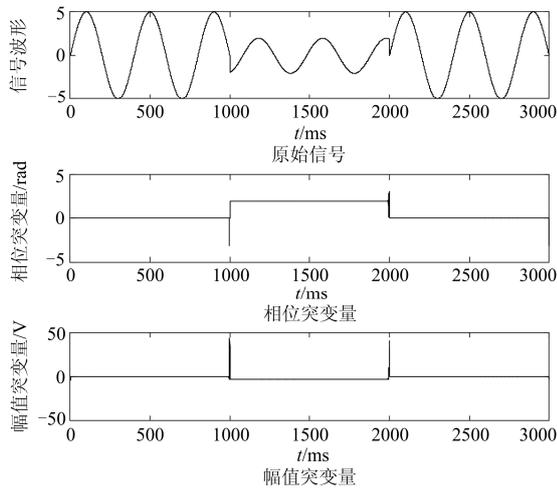


图2 电压暂降信号的相位突变量和幅值突变量

Fig. 2 Phase and amplitude variables of voltage sag signals

由图可以看出，对于原始信号，由小波域相子算得的被分析信号相位和幅值都没有发生突变，当发生电压暂降后，由小波域相子算得的被分析信号相位跳变为 1.256 rad，幅值跳变为-2，与实际相吻合。

同时，由于近似系数所在频带为 $[0, f_s/4]$ ，因此 $s(n)$ 中也包含与暂态相关的高频信息。由小波域相子幅值和相角曲线，可以得到电压暂降发生时刻为 1.001~2.001 s，与实际相吻合，验证了基于小波域相子的方法可以有效提取电压暂降的特征。

为验证本文所提方法的有效性，本节将分别采用小波域相子方法和 S 变换方法对信号幅值和相位跳变特征进行提取，仿真结果如图 3—图 5 所示。其中，被测试信号为 $5 \sin(100\pi t)$ ，在 275 ms 时发生幅值为 3、相位跳变为 $-0.4\pi/\text{rad}$ 的电压暂降，采样周期为 6.4 kHz。

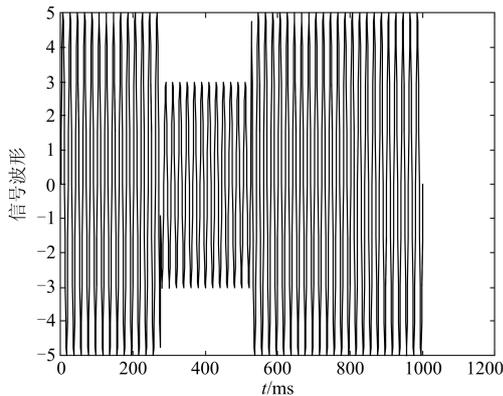


图3 被测试信号

Fig. 3 Measured signal

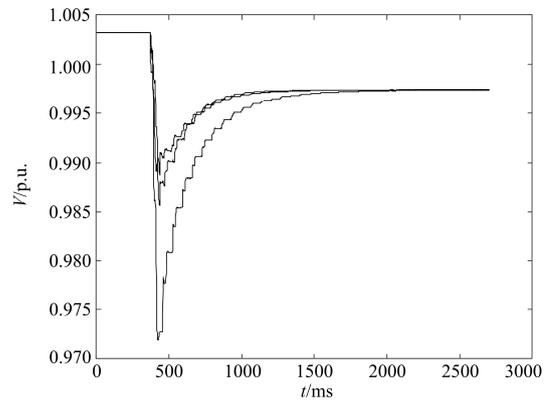


图4 相位跳变特征提取性能对比

Fig. 4 Extraction performance comparison of phase jump feature

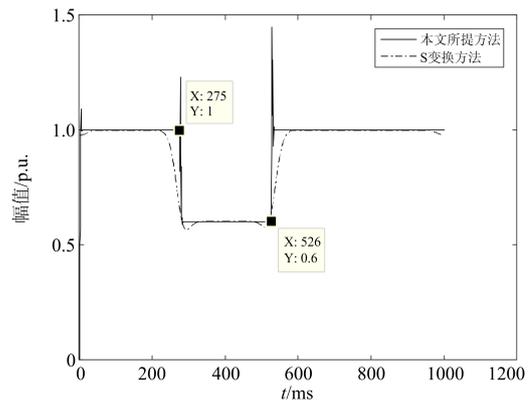


图5 幅值特征提取性能对比

Fig. 5 Extraction performance comparison of amplitude feature

可以看出，针对电压暂降信号，本文所提方法和目前研究热门 S 变换都可以准确提取幅值和相位跳变特征，但 S 变换提取过程中会产生时延，会对电压暂降特征的实时提取产生一定的影响。相对而言，本文所提方法具有快速和无冗余等特点，能快速和准确地提取电压暂降特征，在工程上具有重要的应用价值。

3 电压暂降成因辨识特征构建

3.1 电压暂降成因

在电压暂降特征的基础上进行成因辨识，对于及时处理故障和有针对性地提出治理措施具有重要意义。引起电压暂降的主要原因包括线路短路故障、大型感应电机启动和大容量变压器投入等，根本原因在于线路短时电流增大引起邻近线路电压短时下降。

图 6 为线路短路故障引起的电压暂降幅值特征。自上到下依次为单相接地故障、两相短路故障、两

相接地短路故障和三相短路故障。其暂降程度主要与故障类型、故障位置有关。典型特征为：电压暂降幅值较低；持续时间与保护动作时间有关；不对称故障引起的电压暂降也是不对称的；发生和回复的波形陡；有可能产生相位跳变。

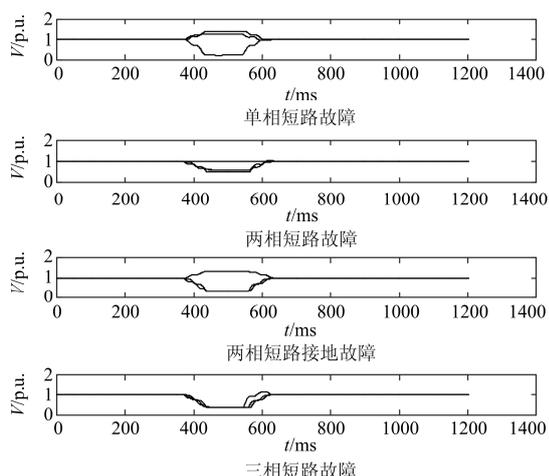


图 6 短路故障引起的电压暂降

Fig. 6 Voltage sag induced by short circuit fault

图 7 为大型感应电机启动引起的电压暂降幅值特征。大型感应电机启动时，启动电流约为额定电流的 5~6 倍，一般需要几秒钟到几分钟时间降到额定电流。典型特征为：三相对称；暂降幅值一般较高；发生的波形陡；恢复过程没有突变；持续时间与电机特性有关。

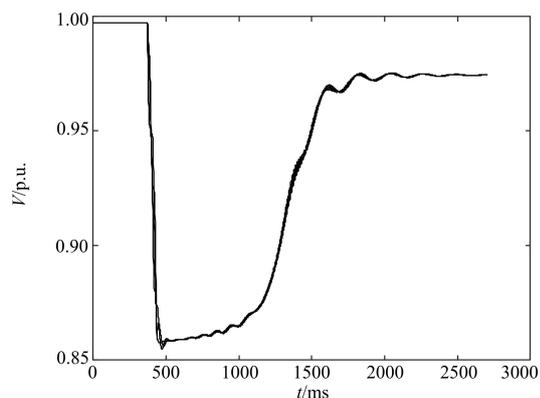


图 7 感应电机启动引起的电压暂降

Fig. 7 Voltage sag induced by startup of induction motor

图 8 为大容量变压器投运引起的电压暂降幅值特征。由于铁芯的磁饱和特性，大容量变压器投运时会产生 8~10 倍额定电流的励磁涌流。典型特征为：三相不对称；暂降幅值一般较高；发生的波形陡；恢复过程没有突变；存在谐波分量，尤以 2 次谐波为主。

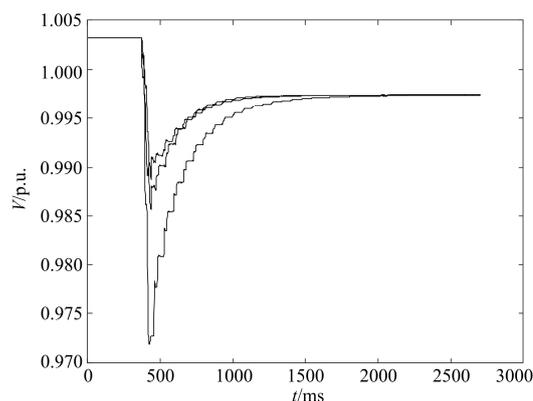


图 8 变压器投入引起的电压暂降

Fig. 8 Voltage sag induced by transformer energization

3.2 电压暂降成因辨识特征

不同原因产生的电压暂降具有不同的特征，本文从幅值和相位跳变特征入手，提取特征指标，对电压暂降成因进行辨识。通过分析信号基波幅值和相位跳变的对称性，可以区分出不对称短路故障和三相短路故障以及感应电机启动和变压器投运。同时，三相短路故障以及感应电机启动和变压器投运之间也可以通过幅值和相位跳变的大小进行区分。

当电压暂降的成因都源于同一位置的时候，上述结论可以对暂降源进行快速有效地辨识。但考虑到暂降源位置未知，不同位置的暂降源造成的电压暂降幅值特征有可能相等，因此还需要考虑构建其他指标进行区分。

感应电机启动过程为机械转矩和电气转矩共同控制的过程，若启动过程发生电压暂降，电气转矩降低，决定了电机启动造成的电压暂降缓慢恢复特性。变压器投运主要受励磁涌流影响，铁芯饱和的非线性决定了变压器投运期间要注入谐波。因此，可以通过引入恢复特性和谐波特性对电压暂降的成因进行有效区分。

综合以上分析，构建以下电压暂降成因辨识特征指标。

- 1) 幅值跳变值 ΔU_h 。
- 2) 相位跳变值 $\Delta \Phi_h$ 。
- 3) 故障识别系数。

$$R_{fd} = \left| \frac{\sum_{i=1}^N M_i}{\max(M_i)} \right| \quad (15)$$

式中： R_{fd} 为故障识别系数； N 为幅值模极大值个数； M_i 为第 i 个模极大值。该指标表示电压暂降过程中缓变所占的比例，该值越小说明故障可能性越大。

4) 波形相似系数。

$$M_E = \frac{M_A + M_B + M_C}{3} \quad (16)$$

$$R = \frac{|M_E - M_A| + |M_E - M_B| + |M_E - M_C|}{|M_E|} \quad (17)$$

式中： M_A 、 M_B 、 M_C 为 A、B、C 三相的幅值变化； R 为三相波形相似系数。

5) 2 次谐波电压含量。

$$HRU_2 = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (18)$$

式中： U_2 为二次谐波电压幅值； U_1 为基波电压幅值。

4 仿真验证

本文采用的电压暂降仿真系统结构图如图 9 所示。该辐射型系统包含 110 kV 输电、10 kV 配电和 0.4 kV 用电系统。其中，变压器 T1 和 T2 采用 Y/Yg 型，T3 和 T4 采用 Y/Y 接线，考虑变压器的铁芯饱和特性。F 为短路故障点，M 为测量点，IM 表示感应电机，K 表示三相开关。仿真系统的采样频率为 3200 Hz。

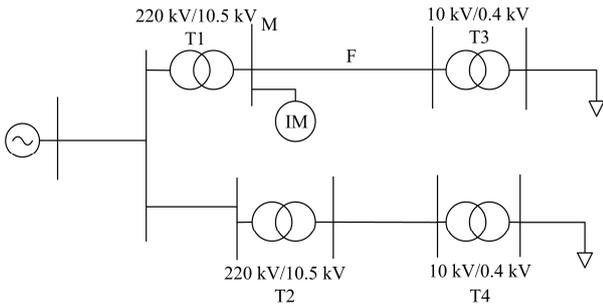


图 9 仿真系统结构示意图

Fig. 9 Schematic of simulation system structure

随机改变仿真系统中的负荷大小、线路长度、故障时间和接地电阻等参数，产生 600 个不同种类的训练样本，然后采用同样的方法产生 600 个测试样本。表 1 列举了部分训练样本。其中，LG、LL、LLG、LLL、IM、TM 分别代表单相短路故障、两相短路故障、两相短路接地故障、三相短路故障、感应电动机启动和变压器投运。

将训练样本通过分析处理后得到的特征指标采用“1 对 1”方法构造的支持向量机(SVM)进行训练^[27]。采用 600 个测试样本进行测试，结果如表 2 所示。由表 2 可以看出，本文所提方法能够正确辨识出大部分成因，辨识正确率为 99.50%，证明了本文提出的方法具有较高的准确性。对表 2 进行分析可以发现，本文所提方法对于三相接地短路故障和

电动机启动造成的电压暂降辨识能力稍弱，原因在于，有时三相短路故障接地电阻较大或离故障点较远，导致暂降幅值与电动机启动相差不大，且电动机启动引起的电压暂降恢复过程中有可能存在斜率较大的波形，从而导致三相短路和电动机启动这两种暂降源相互辨识错误。

表 1 部分测试样本数据

Table 1 Part of testing sample data

| 类型 | 幅值/p.u. | | | 相位/rad | | |
|-----|---------|--------|--------|---------|---------|---------|
| | A | B | C | A | B | C |
| LG | 0.2243 | 1.2533 | 1.4129 | -0.1242 | -0.4124 | 0.2719 |
| LL | 1.0000 | 0.6051 | 0.4884 | 1.57e-4 | -0.6756 | 0.5806 |
| LLG | 1.3310 | 0.3648 | 0.3029 | -0.0385 | -0.1162 | -0.6576 |
| LLL | 0.3732 | 0.3733 | 0.3733 | -0.4109 | -0.4108 | -0.4109 |
| IM | 0.8615 | 0.8607 | 0.8615 | -0.0746 | -0.0740 | -0.0735 |
| TM | 0.9165 | 0.9492 | 0.9483 | -0.1029 | -0.0991 | -0.1011 |

| 类型 | 故障识别系数 | | | 相似系数 | 2 次谐波含量 |
|-----|--------|--------|-------|---------|---------|
| | A | B | C | | |
| LG | 0.068 | 0.762 | 0.767 | 1.53 | 0.43% |
| LL | 0.029 | 0.577 | 0.516 | 0.87 | 0.25% |
| LLG | 0.612 | 0.004 | 0.620 | 1.99 | 0.23% |
| LLL | 0.805 | 0.4661 | 0.086 | 3.57e-4 | 0.95% |
| IM | 0.373 | 0.375 | 0.819 | 1.24e-3 | 0.29% |
| TM | 0.997 | 0.998 | 0.998 | 4.58e-2 | 8.20% |

表 2 测试结果对比

Table 2 Comparison of test results

| 成因 | 样本数 | 辨识成功数 | 辨识成功率 |
|-------|-----|-------|-------|
| 单相短路 | 100 | 100 | 100% |
| 两相短路 | 100 | 100 | 100% |
| 两相接地 | 100 | 100 | 100% |
| 三相接地 | 100 | 98 | 98% |
| 电动机启动 | 100 | 99 | 99% |
| 变压器投运 | 100 | 100 | 100% |

5 结论

本文基于小波域相子分析，针对电压暂降信号提取出幅值和相位特征，仿真结果表明，基于小波域相子的方法可以有效提取电压暂降特征。

针对电压暂降的成因辨识问题，本文基于小波域相子的幅值和相位特征，提出电压暂降成因辨识特征指标，并通过支持向量机方法进行辨识，仿真结果表明，所提方法能够有效对电压暂降成因进行辨识。

值得注意的是，由于电力系统中短路故障的多样性，波形陡度等特征可能与本文分析的典型特征有差别，因此在确定辨识特征指标的时候，本文强调了可能性。如何构造具有普适性的辨识指标，有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 徐永海, 陶顺, 肖湘宁. 电网中电压暂降和短时间中断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 贾东梨, 刘科研, 盛万兴, 等. 有源配电网故障场景下的电压暂降仿真与评估方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1279-1288.
JIA Dongli, LIU Keyan, SHENG Wanxing, et al. Voltage sag simulation and evaluation in active distribution network with fault cases[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1279-1288.
- [3] 徐永海, 洪旺松, 兰巧倩. 电压暂降起始点与相位跳变对交流接触器影响的分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 92-97.
XU Yonghai, HONG Wangsong, LAN Qiaoqian. Influence analysis of point-on-wave of voltage sag initiation and sag phase jump on alternating current contactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 92-97.
- [4] 宋辉, 徐永海. 电压暂降对电动汽车充电影响研究[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 143-149.
SONG Hui, XU Yonghai. Study on impact of voltage sags on electric-vehicle charging[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 143-149.
- [5] 章海静, 梁振锋, 彭书涛, 等. 线路故障引起电压暂降影响因素的研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(5): 7-11.
ZHANG Haijing, LIANG Zhenfeng, PENG Shutao, et al. Study on the influencing factors of voltage sag induced by transmission line faults[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(5): 7-11.
- [6] 电能质量电压暂降与短时中断: GBT 30137—2013[S].
- [7] COSTA F B, DRIESEN J. Assessment of voltage sag indices based on scaling and wavelet coefficient energy analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 336-346.
- [8] 赵凤展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34.
ZHAO Fengzhan, YANG Rengang. Voltage sag disturbance detection based on short time Fourier transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 28-34.
- [9] 徐永海, 赵燕. 基于短时傅里叶变换的电能质量扰动识别与采用奇异值分解的扰动时间定位[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 174-180.
XU Yonghai, ZHAO Yan. Identification of power quality disturbance based on short-term Fourier transform and disturbance time orientation by singular value decomposition[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 174-180.
- [10] BEZERRA C F. Fault-induced transient detection based on real-time analysis of the wavelet coefficient energy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 140-153.
- [11] COSTA F B. Boundary wavelet coefficients for real-time detection of transients induced by faults and power-quality disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2674-2687.
- [12] 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干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34, 54.
WANG Kexing, SONG Zhengxiang, CHEN Degui, 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, 54.
- [13] 袁开明, 王峰. 融合小波模极大值和形态学的去噪分析[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 33-37, 57.
YUAN Kaiming, WANG Feng. Denoising analysis fused with wavelet modulus maxima and morphology[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 33-37, 57.
- [14] 陈丽, 王硕, 孔维功. 基于改进S变换的复合电压暂降源识别特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 27-33.
CHEN Li, WANG Shuo, KONG Weigong. Method to identify composite voltage sag disturbance sources based on generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 27-33.
- [15] 徐方维, 刘亚梅, 杨洪耕, 等. 基于改进S变换的电压暂降识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 18-24.
XU Fangwei, LIU Yamei, YANG Honggeng, et al. Voltage sags identification based on generalized S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 18-24.
- [16] 肖助力, 龚仁喜, 陈双. 一种改进不完全S变换的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 62-68.
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang. Detection of voltage sag by a modified incomplete S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 62-68.
- [17] 周娟娟, 李虹. 改进双曲S变换与动态测度结合在电能质量检测中的应用[J]. 陕西电力, 2015, 43(1): 33-38.

- ZHOU Juanjuan, LI Hong. Application of combination of dynamics measure and improved hyperbolic s-transform in power quality detection[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(1): 33-38.
- [18] 徐健, 张语勃, 李彦斌, 等. 短时傅里叶变换和 S 变换用于检测电压暂降的对比研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 44-48.
- XU Jian, ZHANG Yuqing, LI Yanbin, et al. Comparative study of STFT and S transform on detecting voltage sag[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 44-48.
- [19] FERNANDES F C A, VAN SPAENDONCK R L C, BURRUS C S, et al. A new framework for complex wavelet transforms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(7): 1825-1837.
- [20] 冯浩, 周维维, 刘毅. 基于复小波变换的暂态电能质量扰动检测与分类[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 91-95.
- FENG Hao, ZHOU Luwei, LIU Yi. Detection and classification of transient power quality disturbances based on complex wavelet transform[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 91-95.
- [21] 李涛, 夏浪, 张宇, 等. 基于提升复小波的暂态电能质量扰动的检测与定位[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 66-72.
- LI Tao, XIA Lang, ZHANG Yu, et al. Detection and localization of power quality transient disturbances based on lifting complex wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 66-72.
- [22] 陈祥训. 实小波变换提取相位信息方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 8-13.
- CHEN Xiangxun. Methods to extract phase information using real wavelet transforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 8-13.
- [23] 贾勇, 何正友, 赵静. 基于小波熵和概率神经网络的配电网电压暂降源识别方法[J]. 电网技术, 2009, 33(16): 63-69.
- JIA Yong, HE Zhengyou, ZHAO Jing. A method to identify voltage sag sources in distribution network based on wavelet entropy and probability neural network[J]. Power System Technology, 2009, 33(16): 63-69.
- [24] 赵莹, 赵川, 叶华, 等. 应用主成分分析约简电压暂降扰动源识别特征的方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 105-110.
- ZHAO Ying, ZHAO Hua, YE Hua, et al. Method to reduce identification feature of different voltage sag disturbance source based on principal component analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 105-110.
- [25] 李夏林, 刘雅娟, 朱武. 基于配电网的复合电压暂降源分类与识别新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 131-139.
- LI Xiaolin, LIU Yajuan, ZHU Wu. A new method to classify and identify composite voltage sag sources in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 131-139.
- [26] 王兴国, 黄少锋. 一种基于屏蔽滤波的行波信号消噪方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 35-39.
- WANG Xingguo, HUANG Shaofeng. Application of mask filter in noise elimination of traveling-wave signal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 35-39.
- [27] 李留文, 刘丹丹, 谭贵生, 等. 基于粗糙集与支持向量机的变压器故障诊断[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 78-82.
- LI Liuwen, LIU Dandan, TAN Guisheng, et al. Transformer fault diagnosis method based on rough set and support vector machine[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(7): 78-82.

收稿日期: 2016-12-06; 修回日期: 2017-04-15

作者简介:

郑志宇(1969—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划; E-mail: 13802283691@139.com

蔡 翀(1991—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统配电网规划。E-mail: cchcentral@163.com

(编辑 葛艳娜)