

DOI: 10.7667/PSPC161018

基于动态时间弯曲距离的电压暂降源辨识方法

邱海峰¹, 陈兵², 袁晓冬², 王旭冲¹, 储佳伟¹, 顾伟¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为了实现对各类型电压暂降源的准确辨识, 从波形相似性检测的角度提出了一种基于动态时间弯曲距离的电压暂降源辨识方法。通过仿真模型分析了基本电压暂降和经不同类型变压器传播后各类暂降的波性特征, 构建了电压暂降类型与暂降原因及变压器类型的映射关系。利用9种电压暂降波形数据构建匹配库, 采用动态时间弯曲距离法将实测的电压暂降波形数据与匹配库波形数据进行匹配分析, 实现电压暂降源的辨识。仿真分析的结果表明, 该方法能够对电网中出现的各种类型电压暂降进行辨识, 具有较高的准确性和有效性, 满足工程应用的需求。

关键词: 电能质量; 电压暂降源; 波形匹配; 辨识; 动态时间弯曲距离

Identification of voltage sag sources based on DTW

QIU Haifeng¹, CHEN Bing², YUAN Xiaodong², WANG Xuchong¹, CHU Jiawei¹, GU Wei¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electrical Power Company Research Institute, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to realize the accurate identification of various voltage sag sources, a method based on dynamic time warping (DTW) is proposed from the perspective of waveform similarity detection. First of all, the simulation model is used to analyze the characteristics of basic voltage sags and its different types after the transmission of transformers, the relationship among voltage sag types, causes and transformer types is established. Then, DTW is used to match the measured voltage sag and the matching library, which is formed by nine kinds of voltage sag. Simulation results show that the method can identify various type of voltage sag of power grid and is accurate and effective in engineering application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477029) and Science and Technology Program of State Grid Jiangsu Electrical Power Company (No. 5210EF14001R).

Key words: power quality; voltage sag source; waveform matching; identification; dynamic time warping

0 引言

随着电网的不断建设和发展, 各类工业用户接入电网, 这些用户采用了先进的自动化、智能化、数字化的电压暂降敏感设备, 如 PLC、变频器、接触器、继电器等, 对供电质量提出了非常高的要求。一旦这些设备因电压暂降停止工作, 整套流水线都会受到影响, 给企业带来巨大的损失。因此生产企业普遍认为电压暂降已经上升为最重要的电能质量问题, 应予以重点关注及治理^[1-5]。目前电压暂降治理措施主要包括提高设备耐受能力、抑制扰动源的

传播和配置电压暂降补偿装置。而准确辨识电压暂降源是治理电压暂降的前提^[6-9]。

电压暂降源的辨识是指根据检测到的电压暂降数据特征识别其产生原因^[10]。国内外已经对电压暂降源的辨识开展了大量研究, 并获得众多成果, 主要有小波变换^[11-12]、S 变换^[13-16]、向量机^[16-18]等方法。文献[11]通过利用 B 样条小波变换提取电压暂降波形的奇异性特征来辨识电压暂降干扰源, 但识别系数的选择对辨识的准确性产生较大影响。文献[13]基于 S 变换的时频分析能力提取电压凹陷各方面的特征, 建立专家系统推理算法和判别规则。该方法提取较多的特征量, 专家系统判别阈值对结果影响较大。文献[16]在 S 变换的基础上利用支持向量机进行特征训练与分类, 支持向量机需要调整模

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477029); 国网江苏省电力公司科技项目(5210EF14001R)

型参数, 辨识结果易受自身参数的影响。上述方法能够有效地区分感应电动机启动、变压器空载激磁和短路故障三种原因引起的电压暂降, 而电力系统中大部分的电压暂降由短路故障引起^[19-20], 经过不同类型变压器传播后暂降特征也会发生改变^[21]。已有辨识方法对短路故障引起的电压暂降无法进一步辨识出具体的短路故障类型及短路相别。

本文基于电压暂降仿真模型, 通过分析不同原因引起的电压暂降及其在变压器中传播情况, 建立起电压暂降原因、类型及变压器类型的关系。以九种电压暂降类型为基础建立波形库, 提出了一种基于动态时间弯曲距离的电压暂降源辨识方法。利用实测电压暂降波形数据与波形库数据的动态时间弯曲距离来确定前者的类型, 实现各种电压暂降源的辨识。仿真分析验证了该方法的准确性与有效性。

1 电压暂降类型分析

1.1 电压暂降仿真模型

电力系统中引起电压暂降的原因主要有感应电动机启动、变压器投切以及短路故障。为了分析各种电压暂降类型, 本文参考文献[11]建立了如图1所示的电压暂降仿真系统模型。图中F为短路故障点, M₁和M₂分别为测量点, K₁和K₂为投切开关, 变压器T₂考虑了铁芯的饱和特性, M为感应电动机, L为三相负荷。

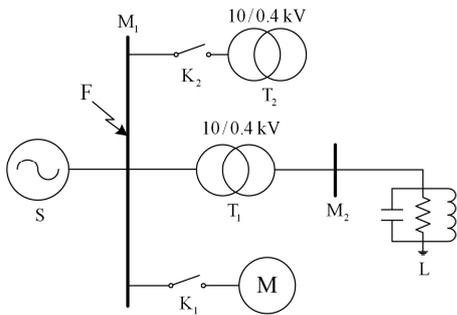


图1 电压暂降仿真系统模型

Fig. 1 Model of voltage sag simulation system

设置电源电压为10kV, 短路容量为100MVA, 短路故障点的接地电阻为0.5Ω。系统的采样频率为10kHz, 采集电压暂降波形的幅值数据。

1.2 基本电压暂降类型分析

在M₁配置测量, 分析未经变压器传播的基本电压暂降类型。分别设置K₁和K₂开关动作, 模拟感应电动机启动和变压器投切所产生的两种基本电压暂降, 电压暂降波形如图2所示。

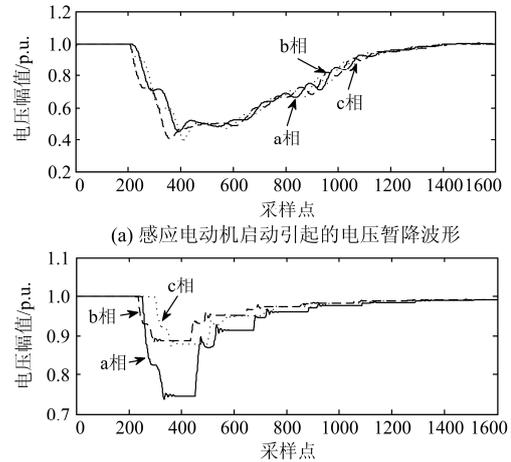


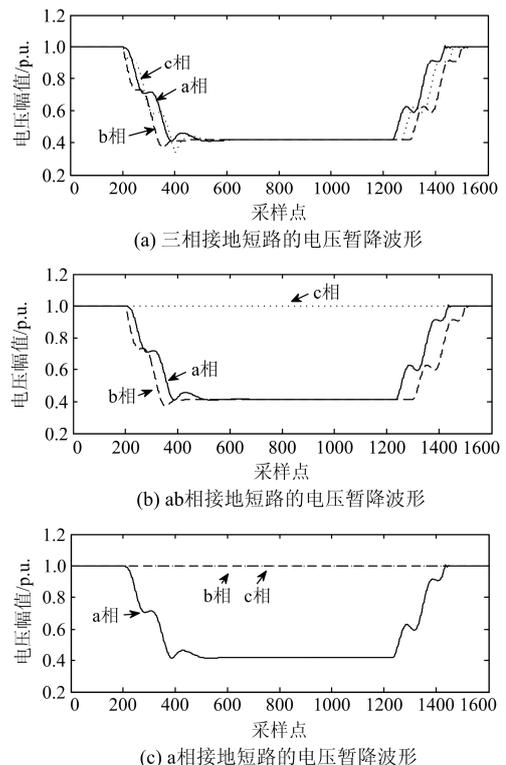
图2 两种基本电压暂降波形

Fig. 2 Two kinds of basic voltage sag waveforms

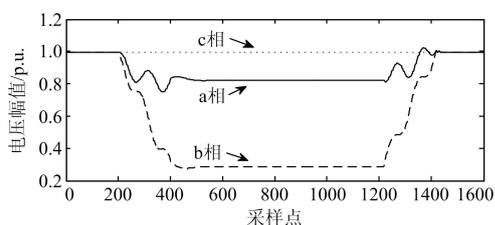
分析图2可知: 感应电动机启动引起的电压暂降三相基本对称, 暂降恢复过程缓慢; 变压器投切引起的电压暂降三相不对称, 暂降电压逐渐恢复。

F点发生不同类型的短路故障模拟短路故障产生的电压暂降, M₁处量测到基本的短路故障电压暂降波形如图3所示。

从图3中可见: 三相短路的电压暂降是对称的, 另外三种短路故障引起的电压暂降波形不对称; 暂降开始和结束时电压发生突变, 其余时间保持不变; 不同短路故障的电压暂降波形不同。



(c) a相接地短路的电压暂降波形



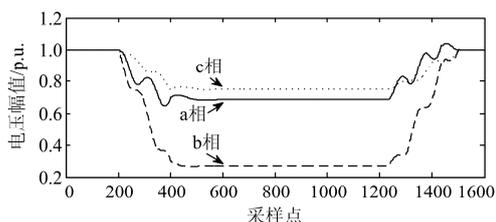
(d) ab相间短路电压暂降波形

图3 基本的短路故障电压暂降波形

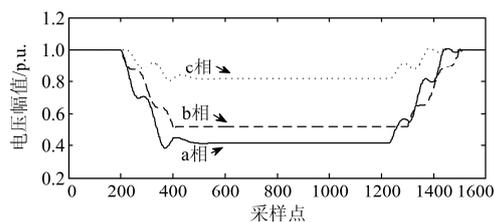
Fig. 3 Basic voltage sag waveforms due to short circuit faults

1.3 电压暂降经变压器的传播分析

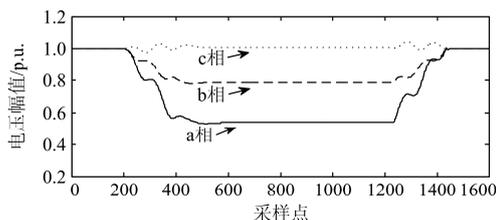
改变变压器 T_1 的接线形式, 在 M_2 处量测电压暂降波形, 模拟电压暂降在变压器中的传播, 与 M_1 处的波形进行对比。为方便分析, 对 1.2 节的 6 种



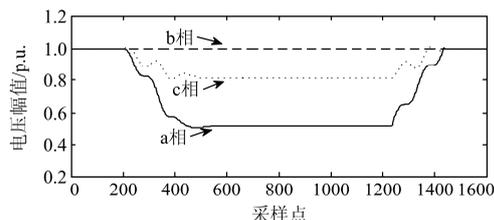
(a) D型电压暂降经II类变压器后的波形



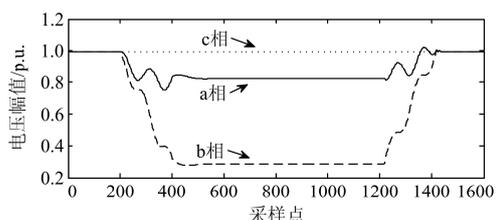
(b) D型电压暂降经III类变压器后的波形



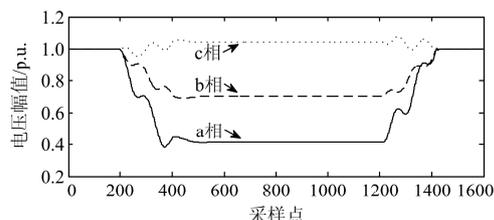
(c) E型电压暂降经II类变压器后的波形



(d) E型电压暂降经III类变压器后的波形



(e) F型电压暂降经II类变压器后的波形



(f) F型电压暂降经III类变压器后的波形

图4 经变压器传播后的电压暂降波形

Fig. 4 Voltage sag waveforms with the transmission of transformer

图 4(a)、(b) 波形与 A~F 型电压暂降均不同, 编号为 G 和 H; 图 4(c) 和 (f) 波形相同, 但与 A~H 不同, 编号为 I; 图 4(e) 波形与 F 型相同, 图 4(d) 与 ca 相间短路波形相同, 本质上为 F 型; G~H 型电压暂降经变压器传播后与已有的波形相同。综上, 考虑变压器的传播特性时电压暂降可分为 9 类, 电压暂降在变压器中的传播规律如表 2。

由表 2 可对电压暂降产生原因及其在通过变压

电压暂降按顺序编号为 A~F。依据绕组接线形式对电压暂降传播的影响将变压器归为三类, 如表 1。

表 1 变压器类型

Table 1 Types of transformer

类型	变压器绕组接线方式
I	YN, yn
II	Y, y; D, d; D, z
III	D, y; Y, d; Y, z

电压暂降经 I 类变压器后波形没有变化; A~C 型电压暂降经 II、III 类变压器传播后波形特征几乎不变; D~F 型电压暂降经 II、III 类变压器传播后波形如图 4 所示。

器传播后可能包含的暂降类型进行归类, 归类结果如表 3 所示。

表 2 电压暂降在变压器中的传递规律

Table 2 Transfer law of voltage sag in transformers

变压器类型	电压暂降类型								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
I	A	B	C	D	E	F	G	H	I
II	A	B	C	G	I	F	G	H	I
III	A	B	C	H	F	I	H	G	F

表 3 电压暂降产生原因与暂降类型

Table 3 Causes and types of voltage sags

电压暂降原因	包括的电压暂降类型
感应电动机启动	A
变压器投切	B
三相接地短路故障	C
两相接地短路故障	D、G、H
单相接地短路故障	E、I、F
相间短路故障	F、I

2 基于 DTW 的电压暂降源辨识

2.1 DTW 算法

以 9 种电压暂降形成波形库，将监测到的电压暂降与之进行波形匹配，找到波形库中相似度最高的电压暂降类型，实现电压暂降源的辨识。时间序列的相似度一般采用距离函数作为度量方法，动态时间弯曲距离^[22](Dynamic Time Wrapping, DTW)可以用来对等长或不等长的时间序列进行比较，并且能够对序列中的局部位移进行有效的处理。因此，本文引入了动态时间弯曲距离。

动态时间弯曲距离通过构造距离矩阵，采用动态规划方法找出一条累积距离最小的最优弯曲路径。定义两条长度分别为 p 和 q 的时间序列为 $\mathbf{X} = x_1, x_2, \dots, x_p$ 和 $\mathbf{Y} = y_1, y_2, \dots, y_q$ ，构造一个 p 行 q 列的距离矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} d(x_1, y_1) & d(x_1, y_2) & \cdots & d(x_1, y_q) \\ d(x_2, y_1) & d(x_2, y_2) & \cdots & d(x_2, y_q) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d(x_p, y_1) & d(x_p, y_2) & \cdots & d(x_p, y_q) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， \mathbf{A} 中元素 $a_{ij} = d(x_i, y_j) = (x_i - y_j)^2$ ，表示序列点 x_i 与 y_j 的距离。

弯曲路径 \mathbf{W} 中的第 k 个元素定义为 $w_k = (a_{ij})_k$ 。计算时间序列 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 的 DTW 距离，目标函数可表示为

$$\text{DTW}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \min \sum_{i=1}^K w_i \quad (2)$$

式中： K 表示最优弯曲路径的长度； w_i 为最优弯曲路径的第 i 个元素； $\text{DTW}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$ 表示时间序列 \mathbf{X} 与 \mathbf{Y} 的 DTW 距离。

弯曲路径 \mathbf{W} 需满足如下约束条件。

- 1) 有界性： $\max(p, q) \leq K \leq p+q-1$ 。
- 2) 边界性： $w_1 = a_{11}$ 和 $w_K = a_{pq}$ ，分别用来表示 \mathbf{W} 的起点和终点。
- 3) 连续性：对于 $w_k = a_{ij}$ ，其相邻元素 $w_{k-1} = a_{i'j'}$ 满足 $i-i' \leq 1, j-j' \leq 1$ 。

- 4) 单调性： $i-i' \geq 0, j-j' \geq 0$ 。

分析上述目标函数及约束条件可知计算 DTW 距离的递归算法为

$$\begin{cases} \text{DTW}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = D(p, q) \\ D(0, 0) = 0 \\ D(0, \infty) = 0 \\ D(\infty, 0) = 0 \\ D(i, j) = a_{ij} + \min\{D(i-1, j-1), D(i-1, j), D(i, j-1)\} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $D(i, j)$ 表示距离矩阵元素 a_{ij} 与其前段的弯曲路径部分长度最小累计值之和。

2.2 基于 DTW 的电压暂降源辨识步骤

基于 DTW 的电压暂降源辨识基本原理是计算出实测的电压暂降波形数据与波形库里每个电压暂降波形数据的 DTW 距离，通过 DTW 距离大小判别实测电压暂降的类型。其具体步骤如下：

1) 以 9 种电压暂降波形数据为样本，设定样本数据中每种电压暂降波形三相的数据长度为 L 。

2) 考虑到 D~I 型 6 种电压暂降存在不同相别短路的情况，将三相按顺序依次替换，形成包括所有相别短路故障的 18 种电压暂降样本数据，加上 A~C 型，共计 21 种。每种电压暂降样本数据按 abc 相排列为 $1 \times 3L$ 的时间序列，形成的波形库为 $21 \times 3L$ 的矩阵。

3) 采集关注时间内的电压暂降数据，将实测数据格式化为 $1 \times 3L$ 的待匹配时间序列。

4) 将待匹配时间序列与波形库中每列时间序列分别归算到区间 $[-1, 1]$ 内，归一化函数为

$$x_{m-\text{ave}} = \frac{2x_m - x_{\min} - x_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (m = 1, 2, 3, \dots, 3L) \quad (4)$$

式中： x_m 为归一化之前的列数据； x_{\min} 和 x_{\max} 分别为每列时间序列数据的最小和最大值； $x_{m-\text{ave}}$ 为归一化后的列数据。计算归一化后待匹配时间序列与波形库中每行时间序列的 DTW 距离。

5) 判定实测电压暂降与 DTW 距离最小的样本数据属于同一类电压暂降，实现电压暂降源的辨识。

3 仿真分析

基于图 1 所示电路，改变电路中的元件参数模拟电压暂降的发生，实测 M_2 处电压暂降数据作为待匹配的时间序列，利用第 1 节的九种电压暂降波形数据形成 21 行 3000 列矩阵作为波形库。

由表 3 可知单相接地故障产生的电压暂降类型包含了相间短路故障的类型，所以若判定待匹配的电压暂降类型为 F 或 I 型，无法直接确定电压暂降原因是单相接地短路故障还是相间短路故障，但可

结合上下级变压器传递前后的波形数据做判别。考虑到工程中相间短路故障发生概率较小, 本文仿真中暂不考虑相间短路故障。对于感应电动机 M 的启动, 改变电动机元件的负荷参数、启动时刻以及 T_1 的绕组接线方式; 对于变压器 T_2 的投切, 改变其投切时刻、负荷参数及 T_1 的绕组接线方式; 对于各种

短路故障, 改变故障起止时刻、接地电阻大小 ($0\sim 1.5\ \Omega$)、短路相别和 T_1 的绕组接线方式, 分别获取了 21 种电压暂降各 50 组共 1050 组待匹配数据。

计算 1050 组待匹配数据与波形库数据之间的 DTW 距离, 判定待匹配数据的电压暂降类型, 计算的平均 DTW 距离和判定结果如表 4 所示。

表 4 电压暂降源辨识结果

Table 4 Identification results of voltage sags

电压暂降类型	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	1.61	109.42	375.51	840.95	873.48	499.58	638.65	457.19	602.70
B	217.03	21.33	973.57	1204.30	787.17	573.22	844.55	823.71	887.12
C	307.18	1042.54	39.34	673.25	1530.31	1225.11	580.87	492.63	833.30
D	460.43	697.40	292.71	37.16	1296.28	909.50	757.44	570.12	773.94
E	747.31	504.78	751.92	742.85	16.07	564.63	915.59	605.58	596.44
F	338.56	394.45	462.68	618.83	716.35	62.70	6661.68	449.14	526.87
G	294.60	384.38	305.31	534.31	931.42	756.42	52.39	360.10	479.81
H	283.49	504.37	168.62	568.38	1129.70	861.08	460.62	75.63	633.37
I	314.32	423.58	400.85	643.41	944.33	749.71	599.57	473.74	72.21
电压暂降原因	电动机启动	变压器投运	三相接地	两相接地	单相接地	单相接地	两相接地	两相接地	单相接地
待辨识组数	50	50	50	150	150	150	150	150	150
正确辨识组数	50	50	50	150	150	136	146	138	140
辨识准确率/%	100	100	100	100	100	90.67	97.33	92.00	93.33

由表 4 可知, DTW 距离能够反映待匹配波形与波形库波形的相似程度, 待匹配波形与波形库中与之相匹配的电压暂降的平均 DTW 距离最小。结合表 3 可以判定实测电压暂降的具体原因, 对于 D~I 型电压暂降可确定短路相别。所有辨识准确率均高于 90%, 说明本文方法具有较高的有效性和准确性。

A~E 型电压暂降的辨识准确率达到 100%, 匹配成功的平均 DTW 距离较小。1.2 节中分析表明 A~E 型电压暂降属于基本电压暂降类型, 波形几乎未受到变压器传播的影响, 所以这 5 种电压暂降波形特征显著, 与其他类型电压暂降差异明显, 容易辨识成功。G、H 型和 F、I 型电压暂降分别由 D 和 E 型电压暂降经变压器传播后获得, 波形特征存在一定相似性, 所以辨识度相对 A~E 型偏低, 当接地电阻接近边界值时辨识出现错误。

图 5 给出 D~I 型电压暂降辨识结果的比较。可以看出对于同一种原因引起的电压暂降, 辨识准确率随着平均 DTW 距离增大而减小; 辨识准确率与变压器类型相关, 经 I、II、III 类变压器传播后辨识准确率呈现下降趋势, III 类变压器传播的电压暂降辨识度最低。

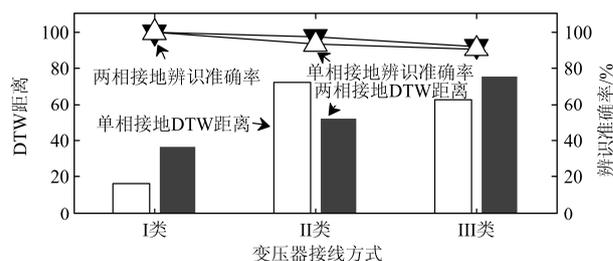


图 5 D~I 型电压暂降辨识结果的比较

Fig. 5 Identification results comparison of D~I voltage sags

4 结论

本文提出了一种基于动态时间弯曲距离的电压暂降源辨识方法。该方法将实测的电压暂降波形数据与波形库中的波形数据进行匹配计算, 找到最小的 DTW 距离, 实现电压暂降源的辨识, 对于短路故障引起的电压暂降可确定具体的短路类型及短路相别。

利用仿真分析论证了本文方法的准确性和有效性, 能够对电网中出现的各种电压暂降进行辨识, 适用于工程实际, 有利于工程人员准确地确定电压暂降源类型及产生原因, 为针对性的电压暂降治理提供帮助。

参考文献

- [1] 孔祥雨, 徐永海, 陶顺. 基于一种电压暂降新型描述的敏感设备免疫能力评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 165-171.
KONG Xiangyu, XU Yonghai, TAO Shun. Sensitive equipment immunity assessment based on a new voltage sag description[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 165-171.
- [2] 刘玓朋, 于明涛, 管春伟, 等. 基于电压暂降的标准 SARFI 参数与 ITIC 曲线分析保护装置对电压暂降的影响[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(8): 15-20.
LIU Yapeng, YU Mingtao, GUAN Chunwei, et al. Influence of SARFI parameter based on voltage sag and ITIC curve analysis protection device on voltage sag[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(8): 15-20.
- [3] 徐永海, 兰巧倩, 洪旺松. 交流接触器对电压暂降敏感度的试验研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 136-146.
XU Yonghai, LAN Qiaoqian, HONG Wangsong. Experimental research on AC contactor sensitivity during voltage sags[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 136-146.
- [4] MOLLAH R A, MUTTAQI K M, ABDESSELAM B. Characterizing voltage sags and swells using three-phase voltage ellipse parameters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(4): 2780-2790.
- [5] 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 Chuan, 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.
- [6] PADMANABH T, ASHEESH K. Unbalance voltage sag fault-type characterization algorithm for recorded waveform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 1007-1014.
- [7] 黄小庆, 曹阳, 吴卫良, 等. 考虑电压暂降指标的电压协调控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 147-154.
HUANG Xiaoqing, CAO Yang, WU Weiliang, et al. Research on voltage coordination control method considering voltage sag index[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 147-154.
- [8] 程志友, 王雪菲, 徐佳. 一种基于复阻抗的电压暂降定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 149-154.
CHENG Zhiyou, WANG Xuefei, XU Jia. A voltage sag detection method based on complex impedance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 149-154.
- [9] 唐轶, 陈嘉, 樊新梅, 等. 基于扰动有功电流方向的电压暂降源定位方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 102-109.
TANG Yi, CHEN Jia, FAN Xinmei, et al. A method for detecting voltage sag sources based on disturbance active current direction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 102-109.
- [10] 康兵, 康逸群, 钟鑫. TT 变换及其对角线在暂态电能质量现象识别中的应用[J]. 陕西电力, 2015, 43(12): 43-47.
KANG Bing, KANG Yiqun, ZHONG Xin. Identification of transient power quality phenomena using TT-transform and its diagonal[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(12): 43-47.
- [11] 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识别[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34.
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.
- [12] 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.
- [13] 杨洪耕, 刘守亮, 肖先勇. 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 Honggeng, LIU Shouliang, XIAO Xianyong. S-transform based expert system for classification of voltage dips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 98-104.
- [14] 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 Kangrui, YANG Honggeng. S-transform based classification for voltage dips according to standard template similarity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 139-146.
- [15] 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.

- 62-68.
- [16] 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 Nantian, XU Dianguo, LIU Xiaosheng. Identification of power quality complex disturbances based on S transform and SVM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 23-30.
- [17] 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 Ganyun, FANG Qipin, CAI Xiushan. Identification of voltage sags source based on multi-class support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 152-155.
- [18] 吕干云, 吴传满, 孙维蒙, 等. 基于 RVM 和 ANF 的电压暂降检测识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 65-68.
LÜ Ganyun, WU Chuanman, SUN Weimeng, et al. Detection and identification of voltage sags based on RVM and ANF[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 65-68.
- [19] 陶顺, 肖湘宁. 中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(一)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 143-153.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Voltage sags types under different grounding modes of neutral and their propagation: part I[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 143-153.
- [20] 肖先勇, 李逢, 邓武军. 雷击与普通短路故障引起的电压凹陷特征[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 309-314.
XIAO Xianyong, LI Feng, DENG Wujun. Characteristics identification of voltage sag caused by lightning stroke and short-circuit faults[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 309-314.
- [21] 陶顺, 肖湘宁. 中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(二)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 156-159.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Voltage sags types under different grounding modes of neutral and their propagation: part II[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 156-159.
- [22] 林德清, 顾伟, 王元凯, 等. 基于动态时间弯曲空间距离度量的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 562-567.
LIN Deqing, GU Wei, WANG Yuankai, et al. Synthetic evaluation of power quality based on dynamic time warping spatial distance measurement[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 562-567.

收稿日期: 2016-07-06; 修回日期: 2016-09-27

作者简介:

邱海峰(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: 895416086@qq.com

陈兵(1977—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电能质量测试、仿真和评估; E-mail: cbsure@163.com

袁晓冬(1979—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电能质量测试、仿真和评估。E-mail: lannyuan@hotmail.com

(编辑 张爱琴)