

电压暂降扰动源电压空间矢量辨识法

李 滨¹,汪 颖¹,肖先勇²

(1. 四川大学电气信息学院,四川 成都 610065;

2. 智能电网四川省重点实验室(四川大学),四川 成都 610065)

摘 要:分析了不同暂降扰动源产生的电压暂降的幅值、相位和谐波特征,提出一种基于电压空间矢量的电压暂降扰动源辨识方法。该方法先对三相电压信号进行 $\alpha\beta$ 变换构造出电压空间矢量和零序分量,利用离散傅里叶变换(DFT)将电压空间矢量分解成正、负序两个旋转分量,构造出幅值、相位和谐波特征量,将三者相结合可对造成电压暂降的扰动源进行辨识。时变电压空间矢量在复平面轨迹的三维可视化的描述可以对电压暂降全过程进行全面表征。利用 Matlab/Simulink 建立简单配电网的仿真模型,结果验证了所提出方法的有效性和正确性。

关键词:电压空间矢量;电压暂降扰动源;DFT;特征量;可视化描述;扰动源辨识

Abstract: On the basis of analyzing the features of various voltage sags due to short-circuit faults, transformer energizing and induction motor starting in power system, a new method to identify voltage sag sources based on voltage space vector (VSV) is proposed. In the proposed method, $\alpha\beta$ transform is applied to three-phase voltage to get the voltage space vector and zero-sequence components at first. Then, the discrete Fourier transform (DFT) is applied to the VSV to get characteristics of amplitude, phase and the harmonic, which can be used to identify voltage sag sources. The 3d visualization of the time-varying VSV in complex plane could clarify the global voltage sag evolution along the time. The results of simulation using Matlab/Simulink show this method is simple and accurate.

Key words: voltage space vector (VSV); voltage sag sources; discrete Fourier transform (DFT); characteristic quantities; 3d visualization; sources identification

中图分类号:TM835 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)03-0014-06

0 引 言

随着现代电力电子设备、冲击性与非线性负荷的不断增长,电压暂降等短时扰动越来越多地被关注。电压暂降(voltage sag)被认为是最严重的电能质量问题^[1]。输配电线路故障、变压器激磁和大型电动机或大负荷接入都可能引起电压暂降^[2]。因此,对电压暂降及其扰动源的研究和识别等成为了研究的热点和难点^[3-8]。

在暂降扰动源辨识研究中,文献[9]提出了根据幅度、持续时间、三相平衡度、谐波等辨识故障、电机启动和变压器激磁引起电压暂降辨识方法。文献[10]提出了基于特征幅值的三相不平衡电压暂降特征刻画方法。文献[11]提出了基于对称分量法的故障类电压暂降分析方法。文献[12]提出了基于统计方法的故障类电压暂降在线分类方法。文

献[13]在忽略系统谐波影响和暂降相位跳变压器的前提下,提出了基于双 dq 变换法的故障类电压暂降分类方法。文献[14]提出基于小波变换提取暂降波形奇异性特征的暂降扰动源辨识法。文献[15]提出了一种仅进行电压有效值计算的电压暂降分类方法。文献[16]和[17]分别通过卡尔曼滤波技术和S变换提取特征信息,并结合专家系统对电压暂降进行分类判别。文献[18]提出了一种基于小波熵和概率神经网络的配电网电压暂降扰动源识别方法。文献[19]对基于Mamdani型模糊推理的电压暂降扰动源识别进行了研究。然而这些方法比较复杂,运算量大,在工程应用中实现较为困难。

上述方法将三相电压看作为3个变量难以满足暂降源辨识要求,于是提出一种基于电压空间矢量^[20]的电压暂降扰动源辨识方法。将三相电压变换成一维时变复变量,利用DFT构造出幅值、谐波和相角特征量,实现电压暂降特征刻画和暂降源辨识,利用三维可视化方法描述暂降的全局特征,并减

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2010CZ0256)

少了分析变量数,用 Matlab/Simulink 对配电网模型的仿真验证了所提方法的正确性和有效性。

1 电压空间矢量

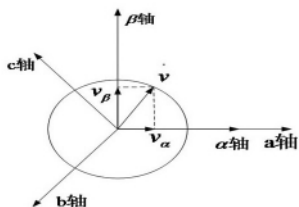


图 1 Clark 变换

如图 1,Clark 变换^[21]将三相瞬时变量变换到二维静止正交 $\alpha\beta$ 坐标系为

$$\begin{bmatrix} x_\alpha(t) \\ x_\beta(t) \\ x_0(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

矢量形式为

$$\vec{x}(t) = x_\alpha(t) + jx_\beta(t) = \frac{2}{3} [1 \quad e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad e^{j\frac{4\pi}{3}}] \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$x_0(t) = \frac{1}{3} (v_a(t) + v_b(t) + v_c(t)) \quad (3)$$

其中 $\vec{x}(t)$ 为电压空间矢量; $x_0(t)$ 为零序分量,系数 $2/3$ 使得两个变换坐标系的幅值保持不变。假设在故障前中后三相电压基波和各次谐波为正弦量。经欧拉变化,电压空间矢量分解为两个正交旋转分量为

$$\begin{aligned} \vec{x} &= \sum_{h=0}^{\infty} x_p^{-\rightarrow(h)} + \sum_{h=1}^{\infty} x_n^{-\rightarrow(h)} \\ &= \sum_{h=0}^{\infty} x_p^{(h)} e^{jh\omega t} + \sum_{h=1}^{\infty} x_n^{(h)*} e^{-jh\omega t} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $x_p^{(h)} = |x_p^{(h)}| e^{j\phi_p^{(h)}}$, $x_n^{(h)*} = |x_n^{(h)*}| e^{j\phi_n^{(h)}}$, * 表示共轭,进一步表示为

$$x_p^{(h)} = \frac{1}{3} [v_a^{(h)} e^{j\phi_p^{(h)}} + v_b^{(h)} e^{j[\phi_b^{(h)} - \frac{2\pi}{3}]} + v_c^{(h)} e^{j[\phi_c^{(h)} + \frac{2\pi}{3}]}] \quad (5)$$

$$x_n^{(h)*} = \frac{1}{3} [v_a^{(h)} e^{-j\phi_n^{(h)}} + v_b^{(h)} e^{-j[\phi_b^{(h)} - \frac{2\pi}{3}]} + v_c^{(h)} e^{-j[\phi_c^{(h)} + \frac{2\pi}{3}]}] \quad (6)$$

详细分析见下文。

2 电压暂降空间矢量特征分析

如式(4),电压空间矢量在复平面的轨迹由正交的两个旋转分量的幅值和初始角决定。正常情况下,三相平衡系统的电压空间矢量仅有正序旋转分量,在复平面的轨迹为半径的标准电压的圆。

若发生不平衡电压暂降,由于正负序旋转分量幅值不等,复平面轨迹为椭圆。如图 2,其主轴、副轴以及倾斜角的定义如下。

$$\begin{aligned} r_{maj} &= |x_p| + |x_n| \quad r_{min} = ||x_p| - |x_n|| \\ \Phi_{inc} &= \frac{1}{2} (\Phi_p + \Phi_n) \end{aligned} \quad (7)$$

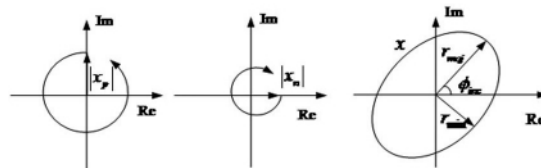


图 2 电压空间矢量复平面轨迹形状

发生三相平衡暂降时,负序分量幅值为零, $r_{min} = r_{maj}$,电压空间矢量在复平面的轨迹为半径小于标准电压的圆。正负序分量的幅值相同时 $r_{min} = 0$,对应轨迹为一直线。为了简单描述电压空间矢量轨迹,引入形状因子 SI (shape index) 得

$$SI = \frac{r_{min}}{r_{maj}} \frac{||x_p| - |x_n||}{|x_p| + |x_n|} = \begin{cases} 1: \text{圆} \\ 0 < SI < 1: \text{椭圆} \\ 0: \text{直线} \end{cases} \quad (8)$$

2.1 短路引起的电压暂降

短路引起的电压暂降在开始和结束时刻均有幅值突变,且通常伴有较大相位跳变。对于单相或者两相故障,非故障相会出现一定的幅值降低。此外,故障类型变化或保护动作导致的系统结构改变可能引起多级暂降。由故障引起的电压暂降较深,幅值一般低于 0.7 p.u.。图 3 为两相故障引起的电压暂降电压空间矢量 r_{min} 与 SI 变化的仿真结果。

如图 4,文献[1]将故障引起的暂降分为 7 类。其中 A、B、C 和 E 为基本暂降类型,分别由三相短路、单相短路、相间短路和两相接地故障引起;类型 D 由类型 B 或类型 C 经过变压器传递引起;类型 F 和类型 G 由类型 E 经过变压器引起。 d 表示暂降深度,根据暂降较严重的相,将其分为单相暂降

(BDF)、两相暂降(CEG)和三相暂降(A)。

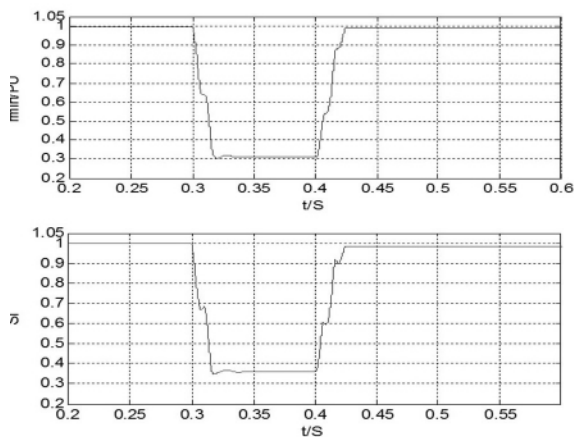


图3 两相故障引起暂降 VSV 的 r_{min} 与 SI 变化图

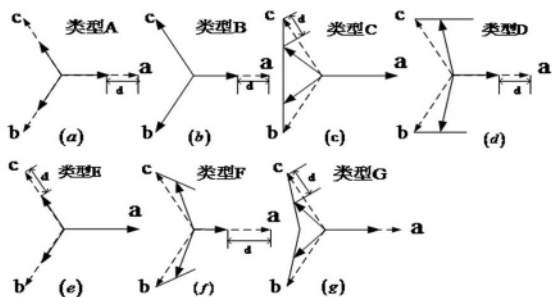


图4 7类不平衡暂降

不同故障类型引起的暂降,其 VSV 特征量不同。以 L_1 相发生故障的 B 类型暂降为得

$$\begin{cases} v_a(t) = (1-d)V\cos(\omega t + \Phi) \\ v_b(t) = V\cos(\omega t + \Phi - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c(t) = V\cos(\omega t + \Phi + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)进行欧拉变换,由式(2)和(3)可得

$$\begin{cases} \vec{x}(t) = (1 - \frac{d}{3})Ve^{j(\omega t + \Phi)} + \frac{d}{3}Ve^{j\pi}e^{-j(\omega t + \Phi)} \\ x_0(t) = -\frac{d}{3}V\cos(\omega t + \Phi) \end{cases} \quad (10)$$

由式(7)可得

$$r_{maj} = V r_{min} = (1 - 2/3d) V, \Phi_{inc} = \pi/2$$

其电压空间矢量在复平面的轨迹如图 5(a)。当 L_2 相和 L_3 相发生电压暂降时,轨迹如图 5(b) 和 5(c) 椭圆主轴和副轴大小相同,仅倾斜角 Φ_{inc} 不同。

用电压空间矢量表示的由故障引起的各种暂降类型的参数见表 1。表中的 d 与图 4 相同; n 为相别:单相故障时 n 为故障相,两相故障时 n 为非故障相,且相别 L_1, L_2, L_3 对应于 1,2,3。

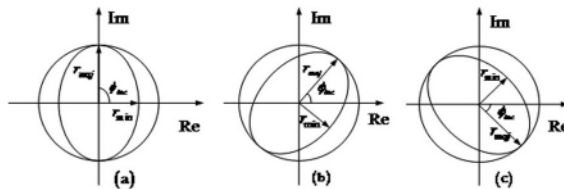


图5 B 类型电压暂降复平面轨迹

2.2 变压器激磁引起的电压暂降

由于变压器投入时三相电压初相角始终相差 120° 和正负半周不对称,故变压器激磁在引起暂降的同时会形成较大谐波分量,且三相幅值始终不平衡,暂降特征与开关合闸时刻、铁心剩磁和网络阻尼有关,暂降幅值一般不低于 0.85 p.u.。文献[17]的试验表明,变压器激磁引起的暂降波形中含大量 2、3、4 次谐波。

因谐波的影响,变压器激磁引起的暂降电压空间矢量 r_{min} 与 SI 变化的仿真结果如图 6。

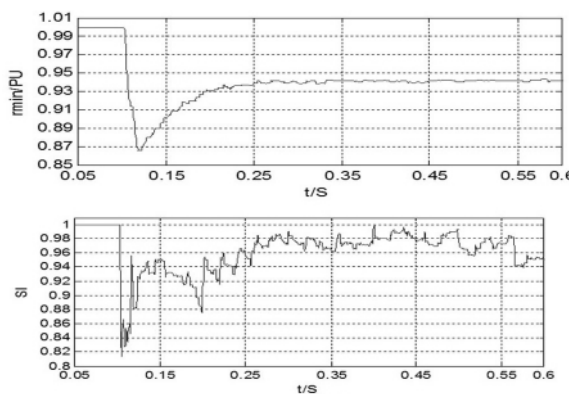


图6 变压器激磁引起暂降 VSV 的 r_{min} 与 SI 变化图

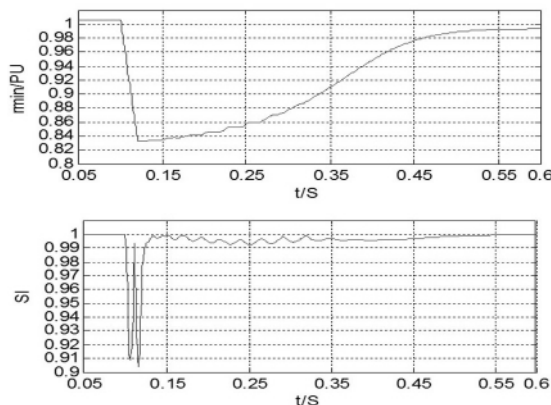


图7 感应电动机启动引起暂降 VSV 的 r_{min} 与 SI 变化图

2.3 感应电动机启动引起的电压暂降

感应电动机的启动电流大约为正常工作电流的 5~10 倍,是引起暂降的根本原因,但并不是暂降严重程度的决定性因素,暂降程度还与电动机容量、上级变压器容量、启动方式及负荷等有关,暂降幅值一

表 1 不同故障引起电压暂降的空间矢量特征

类 型	电压空间矢量				零序分量	
	SI	φ_{inc}	r_{min}	r_{maj}	x_0	
非平衡故障	单相故障 B	$1 - \frac{2}{3}d$	$\frac{5}{6}\pi - n\frac{\pi}{3}$	$(1 - \frac{4}{3}d)V$	V	$-\frac{d}{3}V\cos[\omega t + -(n-1)\frac{2\pi}{3}]$
	单相故障 D	$1 - d$	$\frac{5}{6}\pi - n\frac{\pi}{3}$	$(1 - d)V$	V	0
	单相故障 F	$\frac{3(1-d)}{3-d}$	$\frac{5}{6}\pi - n\frac{\pi}{3}$	$(1 - d)V$	$(1 - \frac{1}{3}d)V$	0
	单相故障 C	$1 - \frac{4}{3}d$	$(1 - n)\frac{\pi}{3}$	$(1 - \frac{4}{3}d)V$	V	0
两相故障	两相故障 E	$\frac{3(1-d)}{3-d}$	$(1 - n)\frac{\pi}{3}$	$(1 - d)V$	$(1 - \frac{1}{3}d)V$	$\frac{d}{3}V\cos[\omega t - (n-1)\frac{2\pi}{3}]$
	两相故障 G	$\frac{5-6d}{5-2d}$	$(1 - n)\frac{\pi}{3}$	$(1 - \frac{6}{5}d)V$	$(1 - \frac{2}{5}d)V$	0
平衡故障 三相故障	三相故障 A	1	-	$(1 - d)V$	$(1 - d)V$	0

般不低于 0.8 p. u.。由于电动机通常为平衡负荷，引起的电压暂降三相基本平衡。电压随启动电流的恢复而恢复，因此只具有—次幅值突变。

角 φ_{inc} 可确定暂降相别。S (single) 表示单相，D (double) 表示两相。

3 仿真验证

3.1 暂降扰动源辨识模型

基于电压空间矢量的暂降扰动源辨识步骤如下。

(1) 获得原始数据，包括三相电压瞬时值、系统频率等。

(2) 利用式 (1) 对数据进行空间向量变换，得到电压空间矢量 $\vec{x}(t)$ 和零序分量 $x_0(t)$ 。

(3) 根据式 (7) 得到相应参数 r_{maj} 、 r_{min} 和 φ_{inc} 。

(4) 设定阈值 $r_{min} = 0.9$ ，利用基波参数对小于阈值的电压暂降用分割算法^[22]进一步进行分析，确定副轴幅值突变点个数。

(5) 副轴幅值突变点只有一个的为电动机启动或变压器激磁引起的电压暂降。否则，为故障引起的电压暂降，转入步骤 (7)。

(6) 形状因子 SI 没有明显变化的为电动机启动引起的暂降。否则，为感应电动机启动引起的电压暂降。

(7) 进一步对由故障引起的电压暂降进行分类、描述。由 SI 判断是否为平衡暂降，再根据倾斜角判断暂降相别，若角度相同，根据主轴和零序电压判断暂降类型。如图 8，对于不平衡暂降，根据倾斜

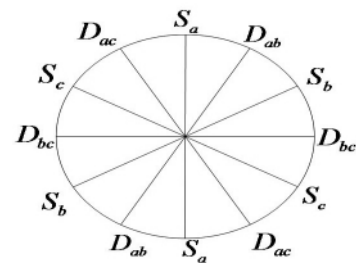


图 8 倾斜角 φ_{inc} 对应的不平衡故障

3.2 仿真模型及结果

利用文献 [14] 的配电网模型，在 Matlab/Simulink 下建立仿真系统，如图 9。电压等级为 110/10.5/0.38 kV。负荷均为恒功率模型，无功为感性无功，功率因数为 0.9。变压器 T1、T2 采用 Y_n/Y 型接线，T3、T4 采用 Y/Y 型接线方式，T2 考虑了变压器的铁心饱和特性。线路上 F 表示故障点；K1、K2 表示三相开关；负荷端的 M 表示感应电动机 (PN = 15 kW 转，转速为 1 460 r/min)，电压波形数据采至低压侧 (0.4 kV) 的 M1 测量点。

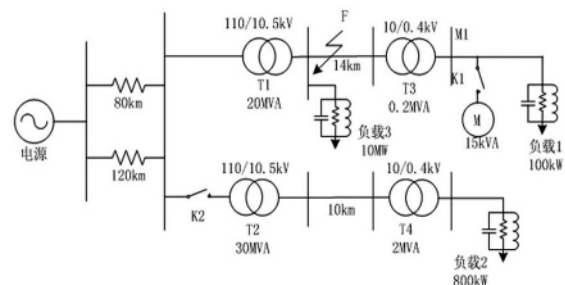


图 9 电压暂降仿真系统

改变系统参数仿真 3 类电压暂降,对于短路故障,改变故障位置、线路负荷、故障起始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 T2 投运,改变投运时刻、线路负荷及变压器容量,分别获取了 3 类电压暂降共 400 个样本数据。从表 3 的仿真结果可见,暂降源辨识准确率高。

表 3 仿真结果

暂降扰动源	仿真数量	识别数量	辨识准确率/%
三相短路	100	100	100
不对称短路	100	96	96
变压器激磁	100	98	98
感应电动机启动	100	100	100

3.3 三维可视化描述

为了更好地刻画暂降过程,将电压空间矢量在复平面随时间变化的轨迹线用三维表示。如图 10 (a),开始为三相不平衡暂降,随着电压变化逐渐演变为平衡暂降。如图 10(b),三个幅值变化点将空间矢量副轴分为 4 个阶段,由此可见,造成的是多级暂降。

进一步由 DFT 可得,暂降第一阶段, $SI = 0.78$, 可判断为非平衡暂降,正负旋转分量分别为 $x_p = 0.89e^{-j2^\circ}$ 和 $x_n = 0.11e^{j178^\circ}$, $\varphi_{inc} = 88^\circ$, 对照图 8 可知发生暂降的相别为 L_1 , $x_0(t) = 0$, 主轴副轴分别为 $r_{maj} = 1$ p. u. 和 $r_{min} = 0.78$ p. u.。综上可判断暂降类型为 B, 暂降幅值为 0.33 p. u.。暂降第二阶段, $SI = 1$ 可判断为三相平衡暂降, $r_{maj} = r_{min} = 0.5$ p. u., 暂降类型为 A, 暂降幅值为 0.5 p. u.。

如图 10(d)、10(e), 可直观地识别暂降变化规律和暂降严重程度。极坐标图中倾斜角接近 90° 的椭圆和半径为 0.5 p. u. 的圆, 验证了分析方法的正确性。

4 结论

(1) 通过对短路故障、变压器激磁和感应电动机的启动引起的电压暂降的分析, 结果表明, 电压暂降波形与特定扰动源相关, 可根据不同特征对扰动源进行有效辨识。

(2) 电压空间矢量将三相电压用一维时变向量表示, 可简化分析过程。为进一步实现电压暂降源

自动识别提供了很好的依据。

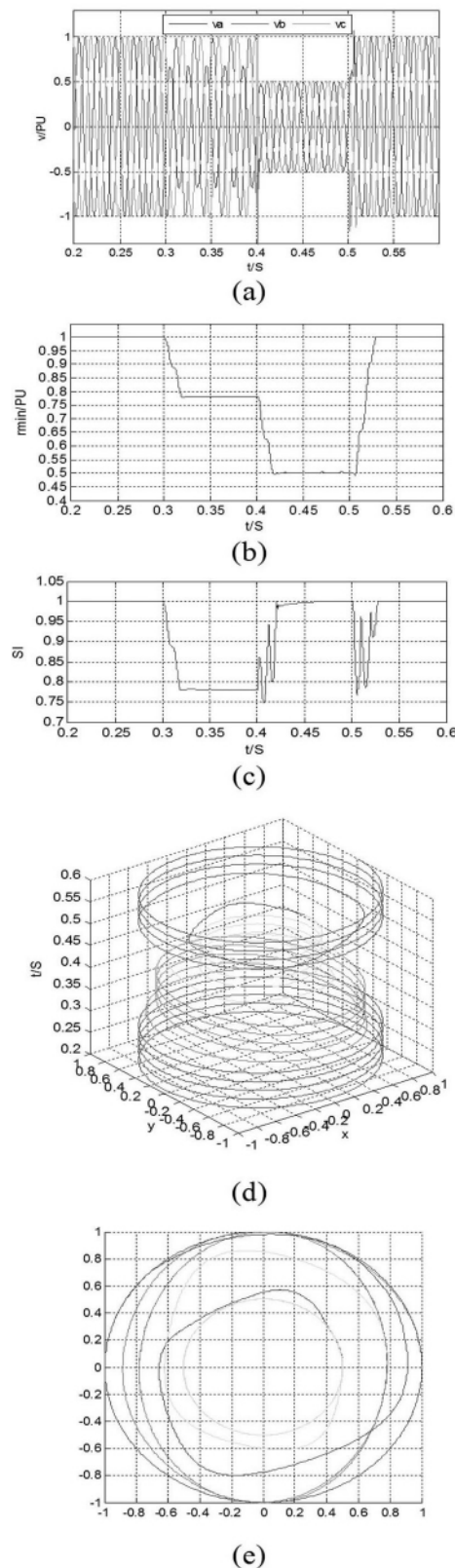


图 10 电压暂降的可视化描述

(a) 所测多级电压暂降波形; (b) 椭圆轨迹副轴变化情况; (c) 形状因子; (d) 柱状图描述; (e) 极坐标图描述

(3) 对电压空间矢量进行 DFT 特征提取,需变量少、计算量小,易于工程实现。扰动特征的三维可视化描述,可对暂降特征进行全局表征。

(4) 利用 Matlab/Simulink 对配电网模型进行的仿真结果证明,方法具有准确性、有效性、适用性的特点。

参考文献

- [1] Bollen Math H J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, [M]. Series on Power Engineering, Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.
- [2] Bollen Math H J. Voltage Recovery After Unbalanced and Balanced Voltage Dips in Three-phase Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(4): 1376 - 1381.
- [3] 陈伟,郝晓弘,林洁. 电压跌落扰动源的小波-神经网络识别方法[J]. 甘肃科学学报, 2007, 19(4): 105 - 107.
- [4] 王宾,潘贞存,徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56 - 59.
- [5] 张庆超,肖玉龙. 一种改进的电压暂降检测方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 123 - 126.
- [6] 王宾,潘贞存,徐文远. 配电网电压跌落幅值估算分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 29 - 34.
- [7] 赵慧元,张志丰,赵彩宏. 一种新的电压暂降检测及其补偿控制策略研究[J]. 电气应用, 2007, 26(6): 95 - 98.
- [8] 肖湘宁,徐永海,刘连光. 考虑相位跳变的电压暂降动态补偿控制器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64 - 69.
- [9] Emmanouil S, Bollen Math H J, Gu Irene Y H. Classification of Power System Events: Voltage Dips [C]. IEEE ICHQP IX, Orlando, USA, IEEE/PES 2000: 745 - 750.
- [10] Zhang Lidong, Bollen Math H J. Characteristic of Voltage Dips (sags) in Power System [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2000, 15(2): 827 - 832.
- [11] Bollen Math H J, Zhang Lidong. Different Methods for Classification of Three-phase Unbalanced Voltage Dips due to Faults [J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66(1): 59 - 69.
- [12] Gu Irene Y H, Nichlas E, Emmanouil S, et al. A Statistical-based Sequential Method for Fast Online Detection of Fault-induced Voltage Dips [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(2): 497 - 504.
- [13] 杜雄,周维维,许可夫. 基于双dq变换的引起电压暂降的短路故障分类[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 86 - 90.
- [14] 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.
- [15] 丁宁,蔡维,徐永海,等. 电压暂降源识别方法研究[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 55 - 59.
- [16] Emmanouil S, Bollen M H J, Gu Irene Y H. Expert System for Classification and Analysis of Power System Events [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(2): 423 - 428.
- [17] 杨洪耕,刘守亮,肖先勇,等. 基于S变换的电压暂降分类专家系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 98 - 104.
- [18] 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.
- [19] 李国栋,丁宁,徐永海. 基于Mamdani型模糊推理的电压暂降源识别[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(2): 43 - 48.
- [20] Schauder, C. Mehta, H. Vector Analysis and Control of Advanced Static var Compensators [J]. IEE Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(4): 299 - 306.
- [21] D. Novotny and T. Lipo, Vector Control and Dynamics of AC Drives [M]. London, U. K. Oxford Univ. Press, 1996.
- [22] Emmanouil S. Automating Power Quality Analysis [D]. Sweden: Chalmers University of Technology Goteborg, 2002.

作者简介:

李滨(1987),男,硕士研究生,研究方向为电能质量与智能电网;

汪颖(1981),女,博士研究生,研究方向为电能质量与智能电网;

肖先勇(1968),男,博士,教授,长期从事电能质量与智能电网的教学和研究。

(收稿日期:2012-03-20)