

# 基于蒙特卡罗方法的大型电力用户电压暂降评估

易 杨, 张 尧, 钟 庆

(华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510641)

## Assessment of Voltage Sags in Large Power Consumer Based on Monte Carlo Method

YI Yang, ZHANG Yao, ZHONG Qing

(College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong Province, China)

**ABSTRACT:** To assess and solve the voltage sag at user node, an approach of using Monte Carlo stochastic simulation method to evaluate the nodal voltage sag is proposed. The HyperSIM simulation tool is adopted to calculate and analyze the impacting degree of fault on voltage sag at user node under different probability models to decide the weak links of power network and thereby to offer thinking for both power network renovation and determination of installation position for the devices to remedy voltage sag. By means of the simulation of actual power system, the expected value of the magnitude of voltage sag at user node is obtained by calculation and the link that has the utmost impact on the voltage at user node is found. The proposed approach is available for reference in power network planning and scheduling.

**KEY WORDS:** voltage sag; power consumer; Monte Carlo method; probability assessment; simulation

**摘要:** 为评估和解决用户节点的电压暂降问题, 采用蒙特卡罗随机模拟方法对节点电压暂降进行评估, 在不同的线路故障概率模型下, 运用 HyperSIM 仿真工具计算和分析故障对用户节点电压暂降的影响程度, 判断电网的薄弱环节, 从而为电网改造和确定缓解装置的安装位置提供思路。通过对实际电力系统进行仿真, 计算得到了负荷节点电压暂降幅值的期望值, 找到了对负荷节点电压影响最大的环节, 为进行电网规划调度提供了参考。

**关键词:** 电压暂降; 电力用户; 蒙特卡罗方法; 概率评估; 仿真

## 0 引言

IEEE 标准将供电电压有效值快速下降到额定值的 10%~90%, 持续时间为 0.5 个周波到 1 min 的扰动定义为电压暂降<sup>[1]</sup>。在实际系统中, 发生电压暂降的频率高, 预防难度大, 且现代控制设备、微机、可调速驱动器等对电压非常敏感, 很容易因电

压暂降引起停机, 从而中断生产线, 给工业生产造成不可估量的损失<sup>[2-4]</sup>。因此, 电压暂降已成为现代电力系统中主要的电能质量问题, 引起了工业用户和供电企业的高度重视<sup>[5-6]</sup>。

短路故障、电机启动、变压器充电、电容器组投切以及负荷变动等都可能引发电压暂降<sup>[7]</sup>, 其中输电系统和配电系统的短路故障引起的电压暂降最为频繁, 且下降深度大, 影响范围广<sup>[8]</sup>。因此, 对故障引发的电压暂降进行研究, 对用户节点的电能质量和电网薄弱环节进行评估具有重要意义。

目前, 电压暂降的主要评估方法如下: 直接根据电能监测装置记录的数据进行评估<sup>[9]</sup>。由于电压暂降是随机事件, 监测周期的长短直接影响结果的准确度, 对于一般负荷, 这种方法的周期太长, 甚至需要几十年的时间, 局限性较大。故障点法和临界距离法。文献[10]对比了上述 2 种方法, 其中故障点法便于编程, 在故障点的选取数足够多时可得到较精确的结果, 临界距离法更适于手工计算, 计算精度不高。蒙特卡罗仿真法。文献[11]提出将蒙特卡罗模拟和电磁暂态仿真结合, 计算各节点的概率评估指标。文献[12]用蒙特卡罗随机模拟法对一个中等大小的配电网进行仿真, 证明了这种方法在电压暂降研究中的优越性。文献[13]根据故障下故障电压和距离的关系提出一种基于 SCBEMA 曲线判断负荷是否停运的判据, 实现了对电压暂降的评估。

上述文献多着眼于电压暂降的普遍特点和原理, 对特定电力用户的针对性不强。本文针对一个具体大型电力用户, 应用蒙特卡罗法思想, 采用 HyperSIM 仿真工具, 利用多次仿真结果计算负荷节点电压暂降幅值的期望值, 并改变线路故障概率模型, 分析对用户节点电压暂降影响最大的线路,

找出其所在电网的薄弱环节。

## 1 用于电压暂降分析的蒙特卡罗方法

### 1.1 蒙特卡罗方法概述

蒙特卡罗方法属于试验数学的分支,其基本思想是为了求解数学、物理、工程技术或随机服务系统等方面的问题。采用该方法时,首先需构造一个概率模型或模拟系统模型,使所求问题的解正好是该模型的特征量(或特征量、有关量),然后根据模拟-统计试验给出模型参数或特征量的估计值,得出所求问题的近似解。其一般步骤为构造、描述概率过程,实现从已知概率抽样分布,建立各种估计量。

### 1.2 系统的概率模型

蒙特卡罗方法广泛用于分析多维复杂的系统,常用来解决随机性问题。电力系统具有随机性,适合用蒙特卡罗方法从宏观上进行概率评估,根据由概率密度函数产生的随机变量的值进行迭代计算,反复采样直到收敛。随机变量由适当的采样程序产生,当采样次数  $n$  趋向无穷大时,统计误差  $1/\sqrt{n}$  收敛为 0。

用于电压暂降概率评估的基本随机变量有故障类型  $F_T$  和每条线路发生故障的概率  $F_L$ 。本文进行电压暂降概率评估时,需忽略故障接地电阻。考虑到 4 种故障类型,具体分为 10 种情况,即三相短路故障 3L、AB 相短路故障 AB、CA 相短路故障 CA、BC 相短路故障 BC、AB 相短路接地故障 ABG、CA 相短路接地故障 CAG、BC 相短路接地故障 BCG、A 相接地故障 AG、B 相接地故障 BG、C 相接地故障 CG。随机数  $x$  在不同概率下的故障类型可表示为

$$F_T = \begin{cases} 1, & x < P_{3L} \\ 2, & P_{3L} \leq x < P_{3L} + P_{AB} \\ \vdots & \\ 10, & P_{3L} + P_{AB} + \dots + P_{BG} \leq x \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{3L} \sim P_{CG}$  为每种故障类型的概率;随机数  $x$  服从  $[0,1]$  均匀分布。

本文对 2 种线路故障概率情况进行分析。如果每条线路长度较短(10km 左右),则同一线路上的故障引起负荷点的电压暂降程度相似<sup>[12]</sup>。在本文的仿真中,10km 线路上任意点故障引起负荷点的电压暂降幅值相差较小(小于 0.005 pu),故认为线路任意点故障引起负荷点的电压暂降程度相同,且线路每点的故障概率相同,因此每条线路上的故障概率与线路长度成正比。设  $L_i$  为第  $i$  条线路的长度, $m$  为线路数,整个系统中第  $i$  条线路的故障概率为

$$P_i = L_i / \sum_{i=1}^m L_i \quad (i=1 \sim m) \quad (2)$$

随机数  $y$  在不同概率下的故障类型可表示为

$$F_L = \begin{cases} 1, & y < P_1 \\ 2, & P_1 \leq y < P_1 + P_2 \\ \vdots & \\ m, & P_1 + P_2 + \dots + P_{m-1} \leq y \end{cases} \quad (3)$$

式中:随机数  $y$  服从  $[0,1]$  均匀分布; $P_m$  为整个系统中第  $m$  条线路的故障概率。

当认为线路故障服从均一概率分布时,整个系统中线路的均一故障概率为

$$P_{\text{uniform}} = 1/m \quad (4)$$

随机数  $y$  在不同概率下的故障类型可表示为

$$F_L = \begin{cases} 1, & y < P_{\text{uniform}} \\ 2, & P_{\text{uniform}} \leq y < 2P_{\text{uniform}} \\ \vdots & \\ m, & (m-1)P_{\text{uniform}} \leq y \end{cases} \quad (5)$$

当线路长度远大于 10km 时,可将长线路划分成约 10km 的小线路段,即在该条线路中多取几个点作为故障点进行计算,同时在式(4)中增加线路数。负荷节点的电压暂降幅值为  $F_T$  和  $F_L$  的函数。为了评估各节点的电压暂降程度,文献[14]提出了电压暂降幅值期望值的概念,即

$$\bar{U}_i = \sum_{k=1}^n U_k / n \quad (6)$$

式中: $n$  为采样次数; $U_k$  为第  $k$  次采样的电压暂降幅值。

### 1.3 基于蒙特卡罗法的评估方法

现有文献中利用蒙特卡罗法评估电能质量时,均是确定随机变量后再反复做仿真计算,因此计算量非常大,占用内存大,耗费机时多。为提高计算速度,在应用蒙特卡罗法之前,可先建立故障信息和负荷节点电压之间的数据库,然后直接从数据库中调用重复采样所需的数据。

本文首先根据式(6)计算要求观测的负荷节点的电压暂降幅值的期望值,然后改变线路的故障概率,具体分 2 种情况:假设改造系统线路,将每条架空线路分别换成电缆,极大地降低线路的故障概率,即在仿真中把该条线路发生故障的概率设为通常概率的 1/10;用均一概率模型作线路故障的概率模型,计算负荷点电压暂降幅值的期望值。通过对比分析,得出电网的薄弱环节。节点的电压暂降幅值期望值的计算流程如图 1 所示。

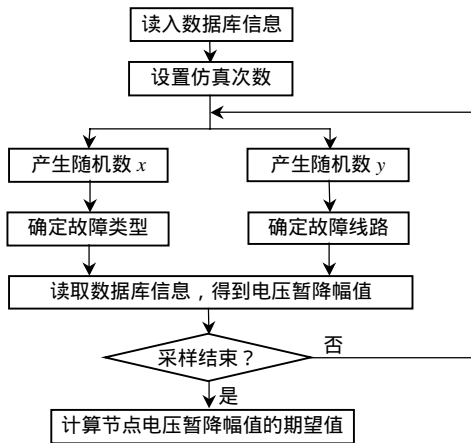


图 1 节点电压暂降幅值期望值的计算流程  
Fig. 1 Calculation flow chart of the expected magnitude of voltage sags

## 2 仿真模型

本文对某实际电力系统进行仿真，采用的参数全部为实际参数。系统将 500 kV 母线和 110 kV 电厂作为恒压源供电。对于瞬时故障，故障自动消失，平均故障时间为 60 ms；对于永久故障，开关动作时间(包括保护动作和开关动作)为 100 ms，线路切除时间为 200 ms。考察 10 条架空线路，其中  $L_1 \sim L_4$  是 220 kV 等级的线路， $L_5 \sim L_{10}$  是 110 kV 等级的线路，其它线路为 10 kV 电缆，比架空线路的故障率低、长度短，可不作考虑。本文采用恒阻抗负荷等值模型<sup>[15]</sup>作为评估点的 5 个 10 kV 负荷节点，用等值负荷等效其余变电站母线上的其它线路。仿真的电力系统单线图如图 2 所示，故障类型的比例<sup>[16]</sup>和线路长度参数分别见表 1~2。

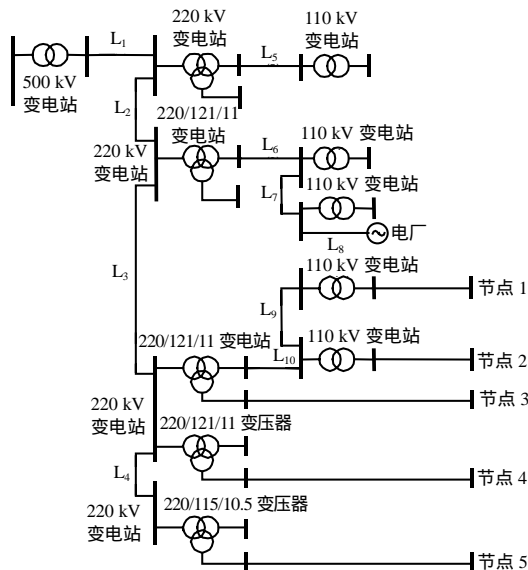


图 2 仿真的电力系统  
Fig. 2 Power system for simulation

表 1 故障类型的比例

Tab. 1 Proportion of fault types

故障类型	三相短路	两相短路	两相短路接地	单相接地
故障比例/%	73	6	17	4

表 2 线路长度

Tab. 2 Length of lines

线路	长度/km	线路	长度/km
$L_1$	10.00	$L_6$	3.90
$L_2$	7.70	$L_7$	5.90
$L_3$	3.90	$L_8$	2.00
$L_4$	5.00	$L_9$	2.50
$L_5$	3.45	$L_{10}$	2.90

## 3 仿真结果与分析

本文以故障前节点的实际电压为基准值，得到的仿真结果均以标么值表示。

图 3 为 5 个负荷节点的电压暂降幅值期望值。暂降情况最严重的是节点 1，其电压暂降的幅值期望值  $\bar{U}_1 = 0.7392$ ，暂降情况最轻微的是节点 4，其电压暂降的幅值期望值  $\bar{U}_4 = 0.7685$ 。从总体来看，上述 5 个节点的电压暂降都较严重，有必要针对每个节点找到对其影响最大的环节并对其进行改造治理。

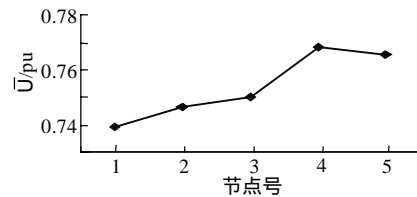


图 3 负荷节点电压暂降的幅值期望值

Fig. 3 Voltage sags expected magnitude of load buses

以节点 2 为例，为分析对节点 2 的电压影响最大的线路，分别在文中第 1 节中描述的 2 种线路故障概率模型下，假设某条线路故障概率降低为通常值的 1/10，计算节点 2 的电压暂降幅值期望值。2 种线路故障概率模型下节点 2 的电压暂降的幅值期望值如图 4 所示，其中三角形表示的点是基于式(3)的概率模型(模型 1)得到的，正方形表示的点是基于式(5)的概率模型(模型 2)得到的。从图 4 可看出，在 2 种线路概率模型下，假设任意一条线路故障概率降低，节点 2 的暂降幅值期望值均有所提高。

如果采用模型 1，当线路  $L_1$ 、 $L_2$  的故障概率降低时，电压暂降幅值提高的幅度较大。因上述 2 条线路均是 220 kV 线路，高压输电线路故障对负荷节点的电压暂降影响较低压配电网的影响大<sup>[17]</sup>，且上述 2 条线路的长度在 220 kV 线路中最长，这说明线路长度和电压等级可影响负荷节点的电压暂降幅值期望值。如果采用模型 2，消除线路长度的影响，则线路  $L_3$ 、 $L_{10}$  的故障概率降低时，电压暂降幅值

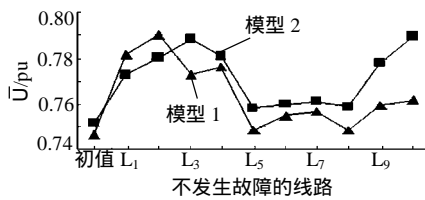


图 4 2 种线路故障概率模型下节点 2 的电压暂降幅值的期望值

Fig. 4 Voltage sags expected magnitude of bus 2 under different fault probability models of lines

有较大提高,这说明上述 2 条线路对节点 2 的电压质量有决定性影响。根据上述分析可知,线路 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>10</sub> 对该用户的电压暂降有关键性影响。

为进一步判断上述关键线路对负荷点的影响,可将正常电压的概率和电压瞬时中断的概率作为辅助指标来分析。IEEE 将下降幅值在 90% 以上的情况视为正常电压,将下降幅值在 10% 以下的情况视为电压瞬时中断。实质上,正常电压和电压瞬时中断是电压暂降的 2 种极端情况,电压瞬时中断实质上是幅值在 10% 以下的电压暂降。图 5 和图 6 分别为 2 种线路故障概率模型下,某条线路故障概率降低,节点 2 电压正常和电压瞬时中断的概率。从图 5 可看出:当采用模型 1 时,线路越长,电压正常的概率越高,反之概率越低,这可以解释为线路长度和故障发生概率成正比,因此长线路的故障概率降低后,整个系统的故障概率下降较大,出现正常电压的概率越大;当采用模型 2 时,各线路电压正常的概率近似相等。从图 6 可明显看出,不论采用哪种模型,当线路 L<sub>3</sub>、L<sub>10</sub> 的故障概率降低后,节点 2 发生电压中断的概率显著降低。从图 2 可看

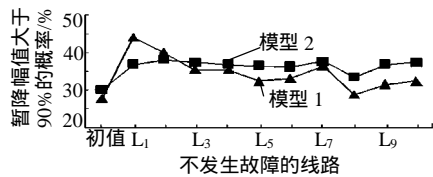


图 5 2 种线路概率模型下节点 2 暂降幅值大于 90% 的概率

Fig. 5 Probability of bus 2 whose magnitudes are above 90% of normal values under different fault probability models of lines

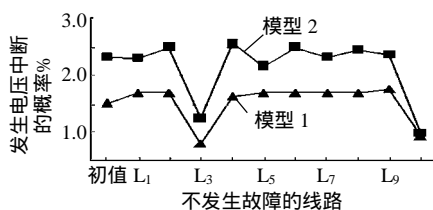


图 6 2 种线路故障概率模型下节点 2 发生电压中断的概率

Fig. 6 Interruptions probability of bus 2 under different fault probability models of lines

出,线路 L<sub>3</sub>、L<sub>10</sub> 直接对节点 2 供电,因此这两条线上发生故障会对节点 2 产生非常严重的影响。综合分析可知,对于节点 2,线路 L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>10</sub> 是值得关注的环节,其中线路 L<sub>3</sub>、L<sub>10</sub> 是最为薄弱的环节。

按照上述思路对其它节点进行评估,即可找出整个实际系统的薄弱环节。通过计算,得出其它节点在某条线路故障概率降低时的电压暂降幅值的期望值与节点 2 的情况大致相似。综合 5 个节点,发现在平均线路故障概率下,降低线路 L<sub>3</sub> 的故障概率,5 个节点电压暂降幅值的期望值提高最大且该线路的故障概率与每个节点的电压瞬时中断概率联系最为紧密。因此,对于这 5 个节点,线路 L<sub>3</sub> 是电网中最薄弱的环节,需高度重视。在此基础上,考虑经济、设备性能等其它因素,可制定电压暂降的解决方案。

#### 4 结论

(1) 用蒙特卡罗随机模拟方法可以计算负荷节点的电压暂降幅值的期望值,在数值上对节点的电压暂降进行评估,从而有效找到电网薄弱环节。

(2) 本文采用 2 种不同的线路故障概率模型进行计算、评估和对比,并用正常电压的概率和电压中断概率作为辅助指标,这使分析结果更明确。

(3) 在找出电网薄弱环节的基础上,可进一步对电网改造或缓解装置的应用进行研究,以解决大型电力用户的电压暂降问题。

#### 参考文献

- [1] IEEE Std. 1159-1995, IEEE recommended practice for monitoring electric power quality[S].
- [2] 肖遥,李树森. 供电系统的电压下凹[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 73-77.
- [3] Xiao Yao, Li Shusen. Voltage dip in power supply network[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 73-77(in Chinese).
- [4] 陶顺,肖湘宁,刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 63-69.
- [5] Tao Shun, Xiao Xiangning, Liu Xiaojuan. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 63-69(in Chinese).
- [6] 赵剑锋,王浔,潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 32-37.
- [7] Zhao Jianfeng, Wang Xun, Pan Shifeng. Study on power quality susceptibility testing system on AC contactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 33-37(in Chinese).
- [8] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
- [9] Lin Haixue. Main problems of modern power quality[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 5-12(in Chinese).

(下转第 75 页 continued on page 75)

- flow field under HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(2): 27-33(in Chinese).
- [9] 方正瑚, 顾翔宇. 直流离子流场的求解问题[J]. 中国电机工程学报, 1990, 10(增刊): 73-78.
- Fang Zhenghu, Gu Xiangyu. Solving problems of HVDC current field[J]. Proceedings of the CSEE, 1990, 10(Supplement): 73-78(in Chinese).
- [10] 王雪颀. 加权余量法用于直流离子流场的数值计算和分析[J]. 电工电能新技术, 1992, (3): 18-25.
- Wang Xuewan. Numerical calculation and analysis of DC ion flow field using the method of weighted residuals[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 1992, (3): 18-25(in Chinese).
- [11] 周浩, 孙志峰, 李升华. 多重网格法 HVDC 线路离子流场数值计算中的应用[J]. 高电压技术, 1993, 19(1): 9-12.
- Zhou Hao, Sun Zhifeng, Li Shenghua. Multigrid method applied to calculation of ion flow field under HVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 1993, 19(1): 9-12(in Chinese).
- [12] High Voltage Transmission Research Center. HVDC Transmission line reference book[R]. TR-102764, 1993.
- [13] Takuma T, Ikeda T, Kawamoto T. Calculation of ion flow fields of HVDC transmission lines by the finite element method[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(12): 4802-4810.
- [14] Suda T, Sunaga Y. Calculation of large ion densities under HVDC transmission lines by the finite difference method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(4): 1896-1905.
- [15] Abdel-Sattar S. Corona current and field profile underneath vertical bipolar HVDC lines with bundle conductors[J]. IEEE Trans on Electrical Insulation, 1986, 21(2): 197-204.
- [16] 杨勇, 陆家榆, 雷银照. 极导线垂直排列直流线路地面合成电场的一种计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 13-18.
- Yang Yong, Lu Jiayu, Lei Yinzhaoh. A calculation method for the total electric field strength at the ground level under vertical bipolar HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(21): 13-18(in Chinese).
- [17] Sarma P M. Corona performance of high-voltage transmission lines [M]. England: Research Studies Press Ltd., 2000.
- [18] 候远航, 邬雄, 万保权, 等.  $\pm 500$  kV 直流线路极导线垂直排列的合成场强[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 37-38, 57.
- Hou Yuanhang, Wu Xiong, Wan Baoquan, et al. Analysis of total electric field strength under the polar conductors in vertical arrangement on 500kV DC line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 37-38, 57(in Chinese).
- [19] CISPR 18-3 Amendment 1, Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment, Part 3: code of practice for minimizing the generation of radio noise[S].

收稿日期: 2007-10-10。

作者简介:

杨 勇(1979 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统电磁环境;  
鞠 勇(1977 -), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统电磁环境;  
陆家榆(1957 -), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电磁场理论和计算及电磁兼容技术;  
雷银照(1956 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电磁场理论及其应用。

(责任编辑 马晓华)

(上接第 60 页 continued from page 60)

- [6] 王宾, 潘贞存, 徐文远. 配电系统电压跌落幅值估算分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 29-34.
- Wang Bin, Pan Zhencun, Xu Wenyuan. Voltage sags profile estimation for power distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 29-34(in Chinese).
- [7] 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): 29-35.
- 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): 29-35(in Chinese).
- [8] 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.
- Wang Bin, Pan Zhencun, Xu Bingyin. Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 56-59(in Chinese).
- [9] 郑亮宏, 朱守真, 武镜海. 新型电能质量在线监测[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 549-552.
- Liu Jinghong, Zhu Shouzhen, Wu Jinghai. Novel power quality on-line monitoring[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement): 549-552(in Chinese).
- [10] 李妍, 余欣梅, 熊信良, 等. 电力系统电压暂降分析计算方法综述[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 74-78.
- Li Yan, Yu Xinmei, Xiong Xinyan, et al. A survey on calculation and analysis methods of voltage sag[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 74-78(in Chinese).
- [11] 宋云亭, 郭永基, 张瑞华. 电压骤降和瞬时供电中断概率评估的蒙特卡罗仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 47-51.
- Song Yunting, Guo Yongji, Zhang Ruihua. Probabilistic assessment of voltage sags and momentary interruption based on Monte Carlo simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 47-51(in Chinese).
- [12] Juan A M, Jacinto M A. Voltage sag stochastic prediction using an electromagnetic transients program[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1975-1982.
- [13] 杨京燕, 倪伟, 肖湘宁, 等. 计及电压暂降的配网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 28-33.
- Yang Jingyan, Ni Wei, Xiao Xiangning, et al. Reliability evaluation of distribution network considering voltage sags[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 28-33(in Chinese).
- [14] Sherif O F, Roy B, Saleh A. Stochastic evaluation of voltage sag and unbalance in transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(4): 2631-2637.
- [15] Juan A M, Jacinto M A. Voltage sag studies in distribution networks-part II: voltage sag assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1679-1688.
- [16] Gupta C P, Jovica V M. Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 711-718.
- [17] Math H J B, Thavatchai T. Assessment of the number of voltage sags experienced by a large industrial customer[J]. IEEE Trans on Industrial Applications, 1997, 33(6): 1465-1471.

收稿日期: 2008-01-03。

作者简介:

易 杨(1983—), 女, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化研究工作, E-mail: yiyang166@yahoo.com.cn;  
张 尧(1948—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划研究工作;  
钟 庆(1978—), 男, 博士, 从事电力系统及其自动化研究工作。

(编辑 杜宁)