

不确定条件下的电压暂降概率评估

杨晓东, 李庚银, 周明, 李国栋

(电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Probability Assessment of Voltage Sag Under Uncertain Conditions

YANG Xiao-dong, LI Geng-yin, ZHOU Ming, LI Guo-dong

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control
(North China Electric Power University), Ministry of Education, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Uncertainty is one of the difficulties in the assessment of voltage sag. In this paper a method to simulate and assess probability of voltage sag under uncertain conditions is proposed, in which the influence of random factors, such as startup and shutdown of units, load fluctuation and variation of system operation modes, on assessment indices of voltage sag and emphatically analyzed. When operation condition of units varies, the initial power flow distribution is modified by linearization method. A pattern of iteration calculation of voltage sag under load fluctuation is built to avoid the recalculation of power flow for each time of iteration, thus the calculation efficiency of the proposed algorithm is improved. The Monte Carlo simulation results of IEEE 30-bus system and the calculation results of assessment indices vary the effectiveness of the proposed method.

KEY WORDS: voltage sag; Monte-Carlo simulation; uncertainty; assessment indices

摘要: 不确定性问题是电压暂降评估工作的难点之一。文中提出了一种在不确定条件下的电压暂降概率仿真与评估方法, 重点分析发电机组的启停、负荷波动和系统运行方式的变化等随机性因素对负荷点电压暂降评估指标的影响。机组运行状态发生变化时, 运用线性化方法修正初始潮流分布。文中建立了负荷波动时的电压暂降迭代计算格式, 避免了每次迭代时重新计算潮流, 提高了算法的计算效率。对IEEE 30节点试验系统的蒙特卡洛仿真以及评估指标的计算验证了文中方法的有效性。

关键词: 电压暂降; 蒙特卡洛仿真; 不确定性; 评估指标

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB219706); 国家自然科学基金资助项目(70773039, 70911130016); 高等学校学科创新引智计划项目(B08013)。

The National Basic Research Program (973 Program)(2009CB219706); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(70773039, 70911130016).

0 引言

不确定性因素存在于电力系统的诸多领域^[1-4], 如何处理不确定性问题是电压暂降评估工作中的难点之一^[5]。随着敏感性负荷在负荷结构中所占比例越来越高, 电源启停、负荷波动等随机性因素极大地增加了系统的复杂性^[6-11], 因而在不确定条件下计算负荷点的电压暂降评估指标更具实际价值。

当前的电压暂降评估方法大多是针对特定的网络结构和运行方式进行仿真和指标计算, 如临界距离法^[12-14]、故障点法^[15-18], 或者只考虑某一种不确定性因素对评估指标的影响^[19]。基于确定性分析的电压暂降评估算法难以处理各种随机性问题的原因主要表现在2个方面: 1) 故障计算过程中的某些不确定性因素(如分布式电源启停、支路开断等)可能导致系统结构和运行方式的变化, 以确定性分析方法对系统中可能出现的各种状态进行统计、评估, 其计算量非常庞大; 2) 故障情况下的负荷建模是一项复杂且繁琐的工作, 常规方法难以准确分析负荷随机波动对系统电压的影响。基于故障仿真的方式在通用性和快速性方面存在难以克服的困难, 因而无法估计负荷的变动对电压暂降评估指标的影响。从目前的研究成果来看, 确定性分析方法可能对某一随机因素下的指标计算有效, 但无法兼顾所有的不确定情形。因此电压暂降的概率仿真成为不确定条件下对负荷点电压暂降频次进行预估的有效手段。

本文对不确定性条件下的电压暂降进行蒙特卡洛仿真, 分析电源启停、负荷波动和故障持续时间等随机因素对敏感负荷停运频率的影响。故障时负荷功率与系统电压之间呈现较强的非线性, 在故障运行点处直接使用线性化方法可能产生较大的

误差。本文将采用迭代的方法求解节点电压在负荷变动下的变化量，采用灵敏度分析法计算发电机启停引起的潮流变化量，并通过暂降持续时间的随机模拟得到电压暂降密度指标和负荷停运频率指标。

1 基于蒙特卡洛仿真的故障信息提取

1.1 故障线路的确定

故障线路的选取应保证被抽到的次数与其故障概率成正比，可由下式判断线路是否出现故障

$$\begin{cases} x \leq P_1(l), & \text{第}l\text{条线路故障} \\ x > P_1(l), & \text{第}l\text{条线路正常} \end{cases} \quad (1)$$

式中： x 为 $[0, 1]$ 内均匀分布的随机变量； $P_1(l)$ 为线路 l 的故障概率。

1.2 故障类型的判断

按照三相短路故障、单相接地故障、相间短路故障和两相接地故障 4 种故障类型将区间 $[0, 1]$ 分为 4 段，各区间长度 m_i 满足

$$\begin{cases} m_i = P_2(i) \\ \sum_{i=1}^4 m_i = \sum_{i=1}^4 P_2(i) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： i 代表故障类型， $i=1, 2, 3, 4$ ； $P_2(i)$ 为第 i 种故障的发生概率。

定义分段函数

$$\begin{cases} P_0 = 0 \\ P_j = \sum_{i=1}^j P_2(i), \quad j=1,2,3,4 \end{cases} \quad (3)$$

产生随机数 $y \sim U(0, 1)$ ，则当 $P_{j-1} < y \leq P_j$ 时，判定第 j 类故障发生。故障类型的比例分配为：单相接地故障 80%，两相接地故障 10%，相间短路故障 5%，三相短路故障 5%。

1.3 故障位置的确定

故障位置一般以故障点到线路首端之间的距离的标幺值 p_{ij} 表示，且 $p_{ij} \sim U(0, 1)$ 。对于长度为 L_{ij} 的故障线路，故障点 K 到线路首端的距离 L_{iK} 可表示为 $L_{iK} = p_{ij} L_{ij}$ 。

1.4 故障持续时间的模拟

设故障线路的电压等级为 v ，故障持续时间 T 可以认为在区间 $[t_{v,\min}, t_{v,\max}]$ 上服从均匀分布 ($t_{v,\max}, t_{v,\min}$ 分别为 T 的上、下限)。在此基础上结合敏感性负荷的电压容忍曲线可以得到其临界电压。

1.5 电源运行状态的确定

配电网中电源的运行状态一般具有较大的随机性。系统侧发电机组的启停只改变初始潮流分

布，分布式电源的启停则导致系统结构和运行方式的变化。机组的启停规则如下

$$\begin{cases} z \leq P_3(s), & \text{第}s\text{台机组停运} \\ z > P_3(s), & \text{第}s\text{台机组投运} \end{cases} \quad (4)$$

式中： $z \sim U(0,1)$ ； $P_3(s)$ 为机组 s 的不可用率。为避免每次状态模拟时重新计算潮流，可运用灵敏度分析法对机组停运时的负荷点电压 V_0 进行修正。

稳态时的系统潮流方程可表示为

$$\mathbf{S} = f(\mathbf{V}) \quad (5)$$

式中： \mathbf{S} 为节点注入功率向量； \mathbf{V} 为节点电压向量。

在基准运行点处将潮流方程线性化，可得

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \mathbf{J}_0^{-1} \Delta \mathbf{S} \quad (6)$$

式中： \mathbf{V}_0 为基准运行点处的电压向量； \mathbf{J}_0 为潮流计算最后一次迭代的雅可比矩阵； $\Delta \mathbf{S}$ 为注入功率的变化量。

若分布式电源停运，则需修改节点导纳矩阵中其所在节点 i 的对角线元素

$$y_{ii}^j = y_{i0}^j - 1/Z_s^j \quad (7)$$

式中： $j=1, 2, 0$ ，分别表示正序、负序和零序； y_{i0}^j 、 y_{ii}^j 分别表示修正前和修正后节点 i 的对角元素； Z_s^j 为机组 s 的序阻抗。

1.6 负荷波动的模拟

当负荷发生波动时，可认为功率因数不变，即

$$\Delta \mathbf{L} = \alpha \mathbf{L}_0 \quad (8)$$

式中： \mathbf{L}_0 为初始负荷向量； $\Delta \mathbf{L}$ 为负荷的变化量； α 为负荷波动率，满足 $\alpha \sim N(0, \xi)$ 。

2 电压暂降幅值的计算

2.1 三相短路故障

设 m 为负荷点， K 为故障点，则三相短路故障下的负荷点电压为^[20]

$$\dot{V}_m = \dot{V}_{m0} - Z_{mK} \dot{V}_K / Z_{KK} \quad (9)$$

式中： \dot{V}_{m0} 为故障前的负荷点稳态电压； \dot{V}_K 为故障前的故障点电压； Z_{KK} 为故障点 K 的自阻抗； Z_{mK} 为节点 m 、 K 之间的互阻抗。

若考虑负荷功率的波动，则初始电压向量 V_0 应做如下修正

$$\mathbf{V}'_0 = \mathbf{V}_0 + \mathbf{Z} \Delta \mathbf{L}^* / \mathbf{V}_m^* \quad (10)$$

式中： \mathbf{V}'_0 为修正后的节点电压向量； \mathbf{V}_m^* 为故障时节点电压向量的共轭； \mathbf{Z} 为节点阻抗矩阵。

将式(9)以矩阵形式表示

$$\mathbf{V}_m = \mathbf{F}_1(\mathbf{V}_0, \dot{V}_K) \quad (11)$$

由此建立电压暂降的迭代计算格式

$$\begin{cases} \dot{V}'_0 = V_0 + \mathbf{Z}\Delta\mathbf{L}^*/V_m^* \\ \dot{V}_m = F_1(\dot{V}'_0, \dot{V}_K) \end{cases} \quad (12)$$

式中 $F_1(\cdot)$ 表示三相短路故障。

2.2 单相接地故障

设故障相为 A 相, 则单相接地故障发生时的负荷点三相电压为

$$\dot{V}_{m,A} = \dot{V}_{m0} - \frac{Z_{mK}^1 + Z_{mK}^2 + Z_{mK}^0}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2 + Z_{KK}^0} \dot{V}_K \quad (13)$$

$$\dot{V}_{m,B} = a^2 \dot{V}_{m0} - \frac{a^2 Z_{mK}^1 + a Z_{mK}^2 + Z_{mK}^0}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2 + Z_{KK}^0} \dot{V}_K \quad (14)$$

$$\dot{V}_{m,C} = a \dot{V}_{m0} - \frac{a Z_{mK}^1 + a^2 Z_{mK}^2 + Z_{mK}^0}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2 + Z_{KK}^0} \dot{V}_K \quad (15)$$

式中: Z_{KK}^j 、 Z_{mK}^j ($j=1, 2, 0$)分别为对应 Z_{KK} 、 Z_{mK} 的正序、负序和零序阻抗; $a=e^{j120^\circ}$ 。

考虑负荷功率波动时的电压暂降迭代格式为

$$\begin{cases} \dot{V}'_0 = V_0 + \mathbf{Z}\Delta\mathbf{L}^*/V_{m,ABC}^* \\ \dot{V}_{m,ABC} = F_2(\dot{V}'_0, \dot{V}_K) \end{cases} \quad (16)$$

式中 $F_2(\cdot)$ 表示单相接地故障。

2.3 相间短路故障

设故障相为 B、C 相, 则相间短路故障发生时的负荷点三相电压为

$$\dot{V}_{m,A} = \dot{V}_{m0} - \frac{Z_{mK}^1 - Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} \dot{V}_K \quad (17)$$

$$\dot{V}_{m,B} = a^2 \dot{V}_{m0} - \frac{a^2 Z_{mK}^1 - a Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} \dot{V}_K \quad (18)$$

$$\dot{V}_{m,C} = a \dot{V}_{m0} - \frac{a Z_{mK}^1 - a^2 Z_{mK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} \dot{V}_K \quad (19)$$

考虑负荷波动时的电压暂降迭代格式为

$$\begin{cases} \dot{V}'_0 = V_0 + \mathbf{Z}\Delta\mathbf{L}^*/V_{m,ABC}^* \\ \dot{V}_{m,ABC} = F_3(\dot{V}'_0, \dot{V}_K) \end{cases} \quad (20)$$

式中 $F_3(\cdot)$ 表示相间短路故障。

2.4 两相接地故障

设故障相为 B、C 相, 两相接地故障下的负荷点三相电压为

$$\dot{V}_{m,A} = \dot{V}_{m0} - \frac{(Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0)Z_{KK}^2 + (Z_{mK}^1 - Z_{mK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0 + Z_{KK}^0 Z_{KK}^1} \dot{V}_K \quad (21)$$

$$\dot{V}_{m,B} = a^2 \dot{V}_{m0} - \frac{(a^2 Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0)Z_{KK}^2 + (a^2 Z_{mK}^1 - a Z_{mK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0 + Z_{KK}^0 Z_{KK}^1} \dot{V}_K \quad (22)$$

$$\dot{V}_{m,C} = a \dot{V}_{m0} - \frac{(a Z_{mK}^1 - Z_{mK}^0)Z_{KK}^2 + (a Z_{mK}^1 - a^2 Z_{mK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0 + Z_{KK}^0 Z_{KK}^1} \dot{V}_K \quad (23)$$

考虑负荷波动时的电压暂降迭代格式为

$$\begin{cases} \dot{V}'_0 = V_0 + \mathbf{Z}\Delta\mathbf{L}^*/V_{m,ABC}^* \\ \dot{V}_{m,ABC} = F_4(\dot{V}'_0, \dot{V}_K) \end{cases} \quad (24)$$

式中 $F_4(\cdot)$ 表示两相接地故障。

3 计算流程

综合以上过程, 本文提出的电压暂降仿真和评估方法的主要内容包括 5 个方面: 初始潮流计算; 运用蒙特卡洛模拟法提取故障信息; 电压暂降幅值的计算; 故障持续时间的模拟和负荷停运的判定; 电压暂降特征量(幅值、持续时间)的统计、密度指标^[13]和负荷停运频率指标^[16]的计算。

负荷停运频率指标 F 计算如下:

$$F = N_1 \{V_m \leq V(T)\} + \frac{1}{3} \sum_{i=2}^4 \sum_{j=1}^3 N_i \{V_{m,j} \leq V(T)\} \quad (25)$$

式中: i 为故障类型, $i=1, 2, 3, 4$ (1 为三相短路故障, 2 为单相接地故障, 3 为相间短路故障, 4 为两相接地故障); j 为相序号; $V(T)$ 为某一负荷对应于故障持续时间 T 的电压临界值; $N_i\{\cdot\}$ 表示第 i 种故障类型下电压暂降幅值低于电压临界值的次数。算法的评估流程如图 1 所示。

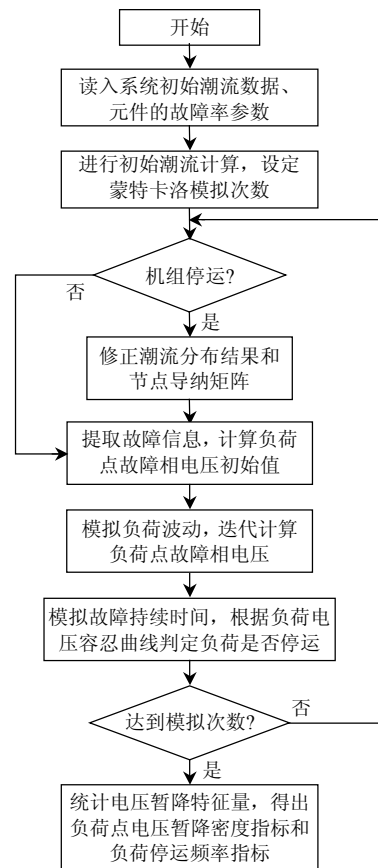


图 1 电压暂降仿真和评估算法的总体流程
Fig. 1 Flow chart for voltage sag simulation and assessment algorithm

4 算例分析

运用电压暂降概率评估算法对 IEEE 30 节点试验系统进行测试，其结构如图 2 所示。系统各序参数、线路长度和故障率均来自文献[20]。选取节点 11、13 为分布式电源节点，不可用率为 0.1；其余电源为系统电源，且均包含 2 台发电机，机组的不可用率为 0.002。电源内阻抗忽略不计。

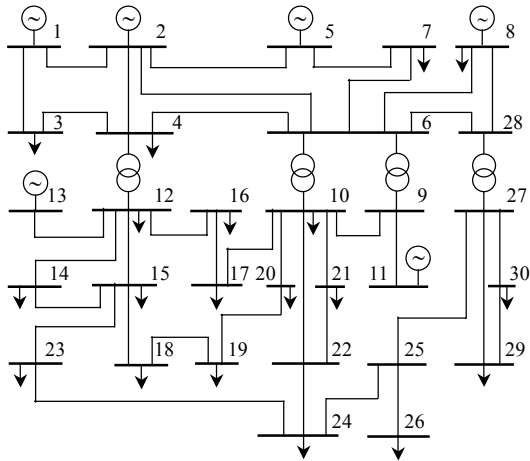


图 2 IEEE 30 节点系统结构

Fig. 2 Configuration of IEEE 30-bus system

设 132 kV 侧故障清除时间为 0.1~0.5 s，33 kV 侧故障清除时间为 0.5~0.9 s。负荷分布参数 $\xi=0.05$ ，蒙特卡洛模拟次数为 50 000。表 1 列出了负荷点 15 的电压暂降密度指标，其中绝大多数电压暂降幅值在 50% 以上。

表 1 负荷点 15 的电压暂降密度指标

Tab. 1 The voltage sag density indices of node 15

暂降幅值	故障持续时间/s				
	0.0~0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	≥0.8
80%~90%	0.153	0.320	0.524	0.667	0.330
70%~80%	0.117	0.226	0.651	1.069	0.528
60%~70%	0.069	0.099	0.415	0.729	0.357
50%~60%	0.015	0.020	0.204	0.407	0.202
40%~50%	0.002	0.006	0.054	0.142	0.070
30%~40%	0	0.005	0.069	0.093	0.070
20%~30%	0	0.002	0.062	0.113	0.061
10%~20%	0	0	0.039	0.073	0.028
0~10%	0	0	0.017	0.027	0.012

以 CBEMA 曲线作为负荷敏感曲线可以对负荷停运频率进行预估。表 2 为不确定评估与确定性评估 2 种模式下的负荷年停运频率，分别以 λ_1 和 λ_2 表示。表中数据表明，负荷点 18、19、24 为系统电压暂降的薄弱环节，且各种随机性因素能够显著增加负荷的停运频率。

为进一步说明不确定性因素对负荷停运频率的影响，图 3 给出了分布式电源不可用率 $P(s)$ 、负

表 2 部分负荷点的负荷停运频率指标

Tab. 2 The expected load-trip frequency of load points

负荷点	λ_1	λ_2	负荷点	λ_1	λ_2
12	0.94	0.77	23	3.91	3.43
14	1.93	1.74	24	4.07	3.71
15	2.63	2.32	26	3.79	3.23
18	4.25	3.75	29	2.48	2.27
19	4.16	3.94	30	2.68	2.34

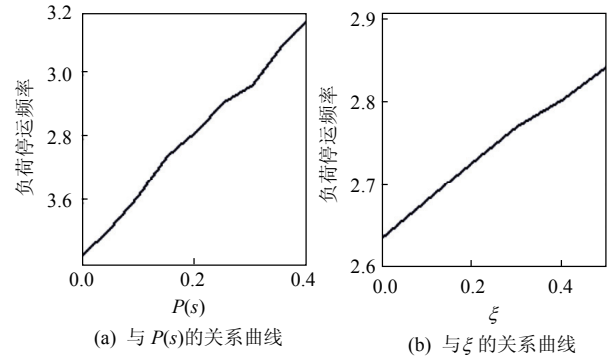


图 3 负荷停运频率与 $P(s)$ 和 ξ 的关系曲线
Fig. 3 The relationship between load-trip frequency and parameter $P(s)$ and ξ

荷功率偏差的概率分布参数 ξ 与负荷停运频率的关系曲线。从图中可以看出，分布式电源启停的不确定性是导致负荷停运频率升高的重要原因；负荷停运频率还受参数 ξ 的影响是因为负荷功率的正偏差对停运频率指标的贡献要高于负偏差。当负荷波动范围较小时，这种作用并不明显。

5 结论

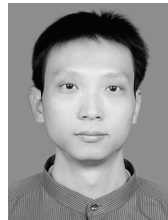
- 1) 本文方法适用于考虑不确定性因素的电压暂降概率评估。
- 2) 采用灵敏度分析法和电压暂降快速迭代格式避免了在每次迭代过程中重新计算潮流分布，提高了算法的执行效率。
- 3) 概率评估方法有助于计算电压暂降的密度指标和负荷停运频率指标，为分析系统的电压暂降薄弱环节提供了理论依据。

参考文献

[1] 胡泽春, 王锡凡, 张显, 等. 考虑线路故障的随机潮流[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 26-33.
Hu Zechun, Wang Xifan, Zhang Xian, et al. Probabilistic load flow method considering branch outages[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 26-33(in Chinese).

[2] 王守相, 郑志杰, 王成山. 不确定条件下电力系统仿真的区间泰勒模型算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 46-50.
Wang Shouxiang, Zheng Zhijie, Wang Chengshan. Power system simulation under uncertainty based on interval Taylor model arithmetic [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 46-50(in Chinese).

- [3] Zhu H Y, Chen S. Identification of capacitor switching transients with consideration of uncertain system and component parameters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 213-220.
- [4] 邓慧琼, 艾欣, 张东英, 等. 基于不确定多属性决策理论的电网连锁故障模式搜索方法[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 50-55.
Deng Huiqiong, Ai Xin, Zhang Dongying, et al. Search technique for power system cascading outages based on uncertain multiple attribute decision-making[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 50-55(in Chinese).
- [5] 张敏, 肖彬. 配电系统电压衰减的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 129-134.
Zhang Min, Xiao Bin. Stochastic assessment method for voltage sags of power distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(10): 129-134(in Chinese).
- [6] 夏翔, 黄伟, 徐祥海, 等. 考虑小水电启停策略的准入容量计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 48-52.
Xia Xiang, Huang Wei, Xu Xianghai, et al. Penetration level calculation taking into consideration the unit commitment of small hydro power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 48-52(in Chinese).
- [7] 钱科军, 袁越, Zhou Chengke. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 74-78.
Qian Kejun, Yuan Yue, Zhou Chengke. Study on impact of distributed generation on distribution system reliability[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 74-78(in Chinese).
- [8] 胡金磊, 张尧, 郭力, 等. 多运行方式下发电机变量的概率特性计算[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(11): 39-43.
Hu Jinlei, Zhang Yao, Guo Li, et al. Probabilistic characteristic calculation of generator variables under multi-operating conditions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 39-43(in Chinese).
- [9] 戴伟华, 李曼丽, 熊宁. 基于负荷区间的最小电压稳定域求解方法[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 119-123.
Dai Weihua, Li Manli, Xiong Ning. A method to solve minimal voltage stability region based on load interval[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 119-123(in Chinese).
- [10] 熊宁, 程浩忠, 马则良, 等. 负荷不确定性电网的电压稳定性评价方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 24-27.
Xiong Ning, Cheng Haozhong, Ma Zeliang, et al. Voltage stability assessment method for power system with load uncertainty [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 24-27(in Chinese).
- [11] 邢洁, 陈陈. 不确定负荷下小干扰稳定的区间分析方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 6-10.
Xing Jie, Chen Chen. An interval analysis method of small-signal stability considering load uncertainty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(4): 6-10(in Chinese).
- [12] Bollen M H J. Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6): 1414-1423.
- [13] Bollen M H J. Method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(1): 70-76.
- [14] 李妍, 余欣梅, 熊信银, 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 Xinyin, et al. A survey on calculation and analysis methods of voltage sag[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 74-78(in Chinese).
- [15] Martinez J A, Martin-Arnedo J. Voltage sag studies in distribution networks(part I): system modeling[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1670-1678.
- [16] Martinez J A, Martin-Arnedo J. Voltage sag studies in distribution networks(part II): voltage sag assessment[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1679-1688.
- [17] Wang J, Chen S, Lie T T. System voltage sag performance estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1738-1747.
- [18] 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).
- [19] Park C H, Jang G, Thomas R J. The influence of generator scheduling and time-varying fault rates on voltage sag prediction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 1243-1250.
- [20] Park C H, Jang G. Stochastic estimation of voltage sags in a large meshed network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1655-1664.



杨晓东

收稿日期: 2009-12-05。

作者简介:

杨晓东(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量、电力市场, E-mail: patrician@yeah.net;
李庚银(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能质量、电力市场、新型输配电技术等;

周明(1967—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力市场、电能质量、电网调度自动化等。

(责任编辑 王晔)