

基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估

周玮^{1,2}, 姜汀¹, 胡姝博¹, 孙辉¹, 闫德武³, 林涛³, 从宇³

(1.大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2.国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006; 3.大连供电公司, 辽宁 大连 116001)

摘要: 传统的交直流系统电压稳定分析大多是建立在确定性方法上的, 没有考虑系统中各种随机因素的影响, 不利于交直流系统运行的经济性和合理性。为了弥补确定性方法的不足, 提出了一种基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定分析方法。该方法考虑负荷水平和负荷增长系数的随机性, 建立了交直流混合系统的负荷裕度模型。通过少量确定性计算求出负荷裕度和临界点处节点电压的前3阶矩, 从而得到待求变量的近似概率分布, 确定某一负荷水平下交直流系统电压失稳的概率。与蒙特卡罗法进行比较, 计算精度满足要求, 并且大大地缩短了计算时间。

关键词: 交直流混合系统; 电压稳定; 负荷裕度; 两点估计法; 概率评估

Probabilistic assessment on voltage stability of AC/DC hybrid systems based on two-point estimate method

ZHOU Wei^{1,2}, JIANG Ting¹, HU Shubo¹, SUN Hui¹, YAN Dewu³, LIN Tao³, CONG Yu³

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;
3. Dalian Power Supply Company, Dalian 116001, China)

Abstract: Traditional voltage stability analyses of AC/DC hybrid systems are mostly based on deterministic methods, without taking into account the influence of various uncertain factors, this will do harm to the economy and rationality of system operation. In order to make up the deficiency of deterministic analysis method, this paper proposes a voltage stability analysis of AC/DC hybrid systems based on two-point estimate method. The method takes into account the uncertainties of load levels and power growth factors and establishes the loading margin model of AC/DC hybrid systems. The first three statistic moments of loading margin and bus voltage on the point of voltage collapse are computed by a few deterministic computations, thus the probabilistic distributions of the desired variables are obtained and the probability of voltage instability under some load level is determined. Compared with Monte Carlo simulation, the computational accuracy is satisfied and the execution time is significantly shortened.

Key words: AC/DC hybrid systems; voltage stability; loading margin; two-point estimate method; probabilistic assessment

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0008-06

0 引言

现代电网正朝着大电网大机组、远距离超高压和交直流混合输电的方向发展, 使得一直存在的电压稳定问题更加严重。直流输电技术因其造价低、损耗小、没有输送距离限制、调节速度快、不存在

同步稳定性问题等优点, 在现代电网中得到越来越广泛的应用。加入直流系统之后, 直流换流站需要消耗大量无功功率, 使得与直流端相连的交流母线变得很弱, 这势必对电力系统的电压稳定性产生影响^[1]。因此, 对分析交直流混合系统电压稳定问题的研究具有重要的理论和实践意义。

电压稳定问题中的一个重要评估指标就是负荷裕度^[2-6]。求解交流系统负荷裕度的方法主要有连续

潮流法^[7-11]、崩溃点法^[12-14]和静态非线性规划法^[15]。目前连续潮流法, 崩溃点法和内点法已经应用于交直流系统的电压稳定分析中^[16-18]。文献[19]采用崩溃点法分析交直流混合系统的电压稳定性, 计算简单, 计算量小, 并且能方便地考虑直流系统变量的约束及运行方式的合理调整。但该方法对初值要求较高, 无法反映发电机无功功率约束。文献[18]采用了连续潮流法, 计算精度高, 且考虑系统中的各种控制约束, 计算结果更接近于实际。以上两种方法都是基于确定的系统运行方式和恒定的网络参数, 很少考虑系统中的各种随机因素的影响。以最严重的系统状态作为研究对象得到的分析结果大多偏于保守, 为了系统运行的经济性, 需要将概率评估方法引入到交直流系统的电压稳定分析中。现在已有蒙特卡罗法(MCS)^[20-21]、解析法^[22-23]和点估计法^[24]应用于交流系统的负荷裕度求解。蒙特卡罗法原理简单, 能够得到较准确的结果, 但计算过程耗时过长, 难以应用于复杂的实际电力系统中, 通常只作为评价各种算法优劣的标准。文献[24]采用了点估计法分析交流系统电压稳定性, 方便地统一处理线路故障及节点注入功率的不确定性, 计算精度与效率都令人满意。

两点估计法(2PEM)^[25-26]是由各随机变量的概率分布求出待求变量各阶矩的方法, 假设系统中有 n 个随机变量, 利用 2^n 个点构成的离散分布求取待求变量的前3阶矩, 就可得出它的近似概率分布。但随机变量越多, 这种方法越不经济。因此 H.P.Hong 对上述方法进行了改进^[27], 对于有 n 个随机变量的系统只需要进行 $2n$ 次计算, 即可得到待求变量的前3阶矩, 继而求得待求变量的概率分布。本文将在交直流系统的连续潮流负荷裕度模型的基础上引入文献[27]中的方法, 算法中考虑了节点负荷水平和负荷增长系数的随机性。在测试系统上分别用两点估计法和蒙特卡罗法进行计算, 对比结果确保了本文算法的准确性。

1 考虑随机特性的交直流混合系统负荷裕度模型

负荷裕度是系统当前运行点到电压崩溃点的距离, 用增加的负荷量表示。它是目前最有效, 最广泛接受的电压稳定指标。在计算负荷裕度的连续潮流法(CPF)中, 为了反映负荷变化, 引入负荷参数 λ , 则节点负荷和发电机出力修改为^[28]

$$\begin{cases} P_{Li} = P_{Li0}(1 + \lambda k_{PLi}) \\ Q_{Li} = Q_{Li0}(1 + \lambda k_{QLi}) \\ P_{Gi} = P_{Gi0}(1 + \lambda k_{PGi}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{Li0} 、 Q_{Li0} 是基本负荷; P_{Gi0} 是基本发电机出力; k_{PLi} , k_{QLi} 是负荷的有功和无功功率增长系数; k_{PGi} 是发电机出力的有功功率增长系数。参数 P_{Li0} 、 Q_{Li0} 、 k_{PLi} 和 k_{QLi} 是系统中的随机变量, 均服从正态分布。

对于交直流混合系统, 按照交流系统的节点上是否接有换流变压器, 把节点分为直流节点和纯交流节点。设系统中共有 n 个节点, 直流节点数为 n_c , 则交流节点有 $n_a = n - n_c$ 个。潮流计算方程式如下。

(1) 节点功率方程式

对于交流节点

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, n_a$

对于直流节点

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \pm \\ V_{dk} I_{dk} = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \pm \\ V_{dk} I_{dk} \operatorname{tg} \varphi_k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$i = n_a + k$
 $k = 1, 2, \dots, n_c$

式中, 正负号分别对应逆变站和整流站。

(2) 换流器基本方程

$$\Delta d_{1k} = V_{dk} - k_{Tk} V_{na} + k \cos \theta_{dk} + X_{ck} I_{dk} = 0 \quad (4)$$

$$\Delta d_{2k} = V_{dk} - k_{\gamma} k_{Tk} V_{na} + k \cos \varphi_k = 0 \quad (5)$$

(3) 直流网络方程

$$\Delta d_{3k} = \pm I_{dk} - \sum_{j=1}^{n_c} g_{dkj} V_{dj} = 0 \quad (6)$$

式中: 正负号分别对应逆变站和整流站; g_{dkj} 是直流输电网络消去联络节点后导纳矩阵 \mathbf{G}_d 的元素。

(4) 控制方程

潮流计算中考虑的直流控制方式一般有: 定电流控制, 定电压控制, 定功率控制, 定控制角控制和定变比控制。从以上五种控制方式中选取两种作为补充方程:

$$\Delta d_{4k} = d_{4k}(I_{dk}, V_{dk}, \cos \theta_{dk}, k_{Tk}) = 0 \quad (7)$$

$$\Delta d_{5k} = d_{5k}(I_{dk}, V_{dk}, \cos \theta_{dk}, k_{Tk}) = 0 \quad (8)$$

当换流器控制角和变压器变比的调节不能满足要求时, 需要调整直流系统运行方式。在整流器定功率, 逆变器定电压控制的运行方式下, 当整流侧交流电压下降较多时, 整流器转为定最小触发角控制, 逆变器转为定电流控制。

将式(1)~式(8)表示成

$$Y = h(X) \quad (9)$$

式中: X 由系统中的随机变量组成, 包括节点负荷水平和负荷增长系数; Y 为待求变量, 包括负荷裕度和节点电压的幅值及相角。

2 基于两点估计法分析交直流混合系统电压稳定性

2.1 两点估计法

两点估计法可以求出待求量在各种随机因素作用下的概率分布。用 Y 来表示 n 个随机变量 X 的非线性函数, $Y=h(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。已知 X 中的每一个分量 $x_k(k=1, 2, \dots, n)$ 的均值 μ_k 和标准差 σ_k , 对每一个分量找出2个点, 这 $2n$ 个点组成了一个离散分布, 分别求出每个点的权重, 计算对应函数值 Y 的离散分布的前3阶矩, 使其与待求量 Y 的前3阶矩相等, 即可得到 Y 的近似概率分布。

各随机变量相互独立, 可以利用式(10)求出待求变量的前3阶矩。

$$m_j \cong \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^2 p_{k,i} \times [h(\mu_1, \mu_2, \dots, x_{k,i}, \dots, \mu_n)]^j \quad (10)$$

$j=1, 2, 3$

式中: $x_{k,i}$ 为随机变量 x_k 的第 i 个样本; $p_{k,i}$ 是点 $(\mu_1, \mu_2, \dots, x_{k,i}, \dots, \mu_n)$ 的权重。 x_k 的两个样本分别取为

$$x_{k,i} = \mu_k + \xi_{k,i} \sigma_k, \quad i=1, 2 \quad (11)$$

系数 $\xi_{k,i}$ 和权重 $p_{k,i}$ 可通过式(12)进行计算。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^2 p_{k,i} (\xi_{k,i})^j = \lambda_{k,j}, & j=1, 2, 3 \\ \sum_{i=1}^2 p_{k,i} = \frac{1}{n}, & k=1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\lambda_{k,j}$ 是 x_k 的 j 阶中心距对 σ_k 的 k 次方的比值; $\lambda_{k,1}=0$ 、 $\lambda_{k,2}=1$ 、 $\lambda_{k,3}$ 被称为偏度系数, 用于衡量概率分布较正态分布是否有偏。

解方程式(12), 得到

$$\begin{cases} \xi_{k,1} = -\xi_{k,2} = \sqrt{n} \\ p_{k,1} = p_{k,2} = \frac{1}{2n} \end{cases} \quad (13)$$

之后, 根据式(10)求出待求变量 Y 的前3阶矩 m_1 、 m_2 、 m_3 , 进而由式(14)~式(16)可得出 Y 的均值 μ_y 、标准差 σ_y 和偏度系数 β_1 。

$$\mu_y = m_1 \quad (14)$$

$$\sigma_y = \sqrt{m_2 - \mu_y^2} \quad (15)$$

$$\beta_1 = \frac{E[(Y - \mu_y)^3]}{\sigma_y^3} \quad (16)$$

2.2 求解交直流系统负荷裕度流程

应用两点估计法求解交直流系统电压稳定问题过程如图1所示。图1中, 随机变量 $X=[P_{Li0}, Q_{Li0}, k_{PLi}, k_{QLi}]$ 、待求变量 $Y=[\lambda, u]$, 分别为交直流系统负荷裕度和各节点临界电压幅值。由于实际系统中存在的不确定因素很多, 还应考虑设备故障、线路故障等随机因素。

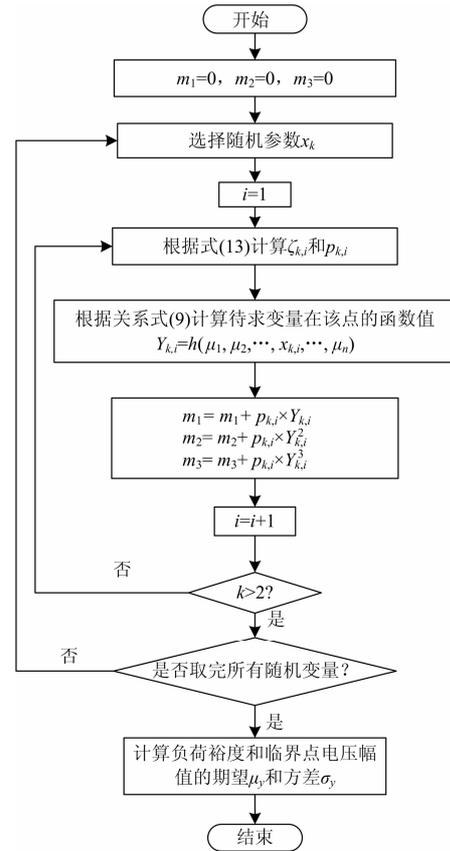


图1 本文中所用方法流程图

Fig. 1 Flow chart of the method used in this paper

3 算例分析

以包含直流输电线的 IEEE14节点系统作为测试系统进行分析计算, 将系统中2-5节点间的交流线换成直线, 参数见文献[29]。并在计算过程中考

考虑各节点负荷水平服从正态分布, 并且负荷增长系数也服从正态分布, 均值为1, 标准差为各自均值的2%^[20]。

在计算过程中, 整流站变压器变比达到上限, 分接头失去调节作用, 减小燃弧角 α 以补偿电压下降, 到达临界点后燃弧角没有达到最小值, 所以并没有发生直流运行方式的转换。计算得到交直流系统负荷裕度的均值和方差分别为0.794 9和0.014 3。采用蒙特卡罗法校验计算结果的正确性, 进行1 000次抽样计算, 计算结果如表1所示。

表 1 2PEM 与 MCS 的计算结果和计算时间对比

2PEM and MCS			
参数	2PEM	MCS	
λ	μ	0.794 9	0.793 1
	σ	0.014 3	0.015 0
计算时间/s	36.64	1 222.70	

将两种方法的计算结果进行比较发现, 2PEM 与 MCS 的计算误差在5%以内, 而2PEM 的计算时间大大缩短。两点估计法与蒙特卡罗法相比有明显优势。

此时, 待求变量负荷裕度的前3阶矩分别为0.794 9、0.632 1和0.502 8。两点估计法迭代过程中44个随机变量两个样本的负荷裕度结果见图2。

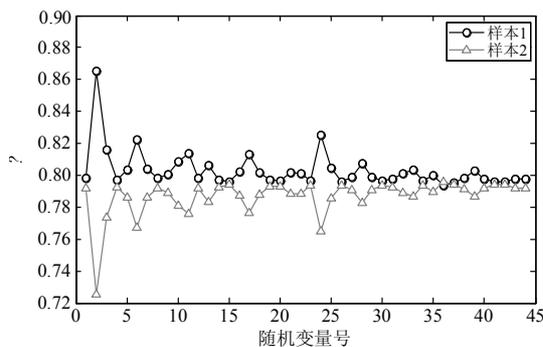


图 2 两点估计法迭代过程中各随机变量对应的负荷裕度

Fig. 2 Loading margin of each random variable in two-point estimate method iterative process

为验证系统规模变化时本文方法的优越性, 增加 IEEE57节点算例, 将该系统13-15节点间交流线换成直流线, 参数与 IEEE14节点系统直流线相同。从表2对比结果来看, 随着系统规模的增大, 本文方法与蒙特卡罗法相比在计算效率上仍然具有明显的优势。

表 2 不同系统规模下的2PEM 与 MCS 的计算时间对比

Table 2 Contrast of calculation time using 2PEM and MCS

系统	计算时间/s	
	2PEM	MCS
IEEE14	36.64	1 222.70
IEEE57	203.28	1 741.90

此外, 本文还采用两点估计法计算了含有直流线路的 IEEE14系统引入输电线路故障时的负荷裕度分布情况。为凸显考虑线路故障对电压稳定结果的影响, 所有输电线路故障率取3%。并在此基础上, 分别将负荷重载1.75和1.8倍, 统计系统的失稳概率。

通过表3的结果可以看出, 考虑输电线路故障以后, 系统负荷裕度均值略有下降, 标准差则有所增加, 此时系统不会失去稳定。对负荷重载到1.75倍时, 电压失稳概率提升为0.003 1, 而重载到1.8倍时, 电压失稳概率则高达0.461 3, 系统有接近一半的机会会发生电压失稳现象。

表 3 考虑输电线路故障时的负荷裕度和系统电压失稳概率计算结果

Table 3 Calculation results of loading margin and voltage instability probability considering transmission line fault

参数	考虑线路	考虑线路	负荷重载	负荷重载	
	故障前	故障后	1.75倍	1.8倍	
λ	μ	0.794 9	0.793 7	0.014 8	0.000 2
	σ	0.014 3	0.026 7	0.005 4	0.002 1
电压失稳概率	0	0	0.003 1	0.461 3	

4 结论

本文将两点估计法引入到交直流混合系统的电压稳定问题中, 考虑系统负荷水平和负荷增长系数的随机性, 建立了交直流系统负荷裕度模型, 弥补了确定性分析方法的不足。该方法不仅避免了潮流方程的线性化, 而且与蒙特卡罗法相比, 在保证计算精度的前提下求解速度快。综合考虑两点估计法是一种较好的分析交直流系统电压稳定问题的方法。

参考文献

- [1] 周双喜, 吕佳丽, 张元鹏. 直流输电对电压稳定性的影响[J]. 清华大学学报, 1999, 39(3): 4-7.
ZHOU Shuangxi, LÜ Jiali, ZHANG Yuanpeng. Influence of HVDC on voltage stability[J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(3): 4-7.
- [2] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统静态电压稳定性评述指标[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.

- ZHOU Shuangxi, JIANG Yong, ZHU Lingzhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25(1): 1-7.
- [3] 顾伟, 万秋兰. 广域电压监控的线性稳定指标[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 110-115.
- GU Wei, WAN Qiulan. Linearized voltage stability index for wide-area voltage monitoring and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 110-115.
- [4] 杨黎晖, 马西奎. 基于分岔理论的含双馈风电机组的电力系统电压稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 1-8.
- YANG Lihui, MA Xikui. Analysis on voltage stability of power system with doubly fed induction generator wind turbine based on bifurcation theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 1-8.
- [5] 刘丽霞, 黄志刚, 李娟, 等. 天津电网电压稳定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 90-96.
- LIU Lixia, HUANG Zhigang, LI Juan, et al. Research on voltage stability of Tianjin power grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 90-96.
- [6] 张勇军, 蔡广林, 邱文锋. 基于最优乘子潮流估计的故障筛选与排序[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 123-128.
- ZHANG Yongjun, CAI Guanglin, QIU Wenfeng. Contingency screening and ranking based on optimal multiplier power flow evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 123-128.
- [7] 戴伟华, 熊宁, 李倡洪. 静态电压崩溃点的实用解法[J]. 继电器, 2007, 35(5): 25-28.
- DAI Weihua, XIONG Ning, LI Changhong. A practical method of tracing static voltage collapse point[J]. Relay, 2007, 35(5): 25-28.
- [8] 李娟, 陈继军, 司双. 连续潮流与免疫遗传算法结合的静态电压稳定裕度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 24-27, 32.
- LI Juan, CHEN Jijun, SI Shuang. Calculation of static voltage stability margin based on continuation power flow and immune genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 24-27, 32.
- [9] 吴昊, 卫志农, 王成亮, 等. 基于连续潮流综合算法的电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 99-104.
- WU Hao, WEI Zhinong, WANG Chengliang, et al. Voltage stability study based on synthesis method of continuous power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 99-104.
- [10] 祝达康, 程浩忠. 求取电力系统 PV 曲线的改进连续潮流法[J]. 电网技术, 1999, 23(4): 37-40, 48.
- ZHU Dakang, CHENG Haozhong. An improved continuation method in tracing PV curves of power systems[J]. Power System Technology, 1999, 23(4): 37-40, 48.
- [11] IBA K, SUZUKI H, EGAWA M, et al. Calculation of critical loading with nose curve using homotopy continuation method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 584-590.
- [12] 马冠雄, 刘明波, 王奇. 一种识别静态电压稳定分岔点的混合方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 17-20, 43.
- MA Guanxiong, LIU Mingbo, WANG Qi. A hybrid method for identifying bifurcation points in steady-state voltage stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 17-20, 43.
- [13] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压崩溃临界点计算的改进零特征根法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 63-66.
- GUO Ruipeng, HAN Zhenxiang. An improved zero eigen value method for point of collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 63-66.
- [14] DOBSON L. Observations on the geometry of saddle node bifurcation and voltage collapse in electrical power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 39(3): 240-243.
- [15] PARKER C J, MORRISON I F. Application of an optimization method for determining the reactive margin from voltage collapse in reactive power planning[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1996, 11(3): 1473-1481.
- [16] CANIZARES C A, ALVARADO F L. Point of collapse and continuation methods for large AC/DC systems[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1993, 8(1): 1-7.
- [17] CANIZARES C A, ALVARADO F L, DEMARCO C L. Point of collapse methods applied to AC/DC power systems[J]. IEEE Transactions on PWRs, 1992, 7(2): 673-683.
- [18] 王秀婕, 李华强, 李波, 等. 基于连续潮流法及内点法的交直流负荷裕度算法[J]. 继电器, 2006, 34(22): 22-26.
- WANG Xiujie, LI Huaqiang, LI Bo, et al. An algorithm for voltage stability assessment of AC/DC power system based on continuation method and interior point theory[J]. Relay, 2006, 34(22): 22-26.
- [19] 胡林献, 陈学允. 崩溃点法交直流联合系统电压稳定

- 性分析[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 395-398.
- HU Linxian, CHEN Xueyun. Point of collapse method applied to voltage stability analysis of AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 395-398.
- [20] 彭昱, 周玮, 孙辉, 等. 基于网损灵敏度二阶指标的电压稳定概率评估[J]. 继电器, 2006, 34(18): 22-26.
- PENG Yu, ZHOU Wei, SUN Hui, et al. Probabilistic assessment based on second order loss sensitivity for voltage stability[J]. Relay, 2006, 34(18): 22-26.
- [21] 李生虎, 丁明, 汪兴强. 电力系统静态电压安全问题的概率评价[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 26-30.
- LI Shenghu, DING Ming, WANG Xingqiang. Probabilistic evaluation to static voltage security of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 26-30.
- [22] 周玮, 彭昱, 孙辉, 等. 含风电场电力系统的负荷裕度概率分析混合方法[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 79-83.
- ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. An approach to solve load margin probabilistic distribution for power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 79-83.
- [23] 戴建锋, 王海超, 周双喜, 等. 基于负荷裕度随机特性的电压失稳概率问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 26-30.
- DAI Jianfeng, WANG Haichao, ZHOU Shuangxi, et al. A study on probability of voltage instability based on the stochastic characteristic of load margin index[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 26-30.
- [24] 吴蓓, 张焰, 陈闽江. 点估计法在电压稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 38-43.
- WU Bei, ZHANG Yan, CHEN Minjiang. Application of point estimate method to voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 38-43.
- [25] ROSENBLUETH E. Two-point estimates in probability[J]. Application of Mathematical Modelling, 1981, 5(5): 329-335.
- [26] ROSENBLUETH E. Point estimate for probability moments[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1975, 72(10): 3812-3814.
- [27] HONG H P. An efficient point estimate method for probabilistic analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 59(3): 261-267.
- [28] AJJARAPU V, CHRISTY C. The continuation power flow: a tool for steady state stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [29] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
-
- 收稿日期: 2014-05-12; 修回日期: 2014-08-14
- 作者简介:
- 周 玮(1981-), 女, 博士后, 讲师, 研究方向为新能源并网后的电力系统调度运行与安全分析。E-mail: zhouwei@dlut.edu.cn
- (编辑 姜新丽)