

基于蒙特卡罗随机选线最优潮流的电压崩溃临界点算法

马瑞, 袁文伟

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 提出了基于蒙特卡罗随机选线最优潮流的电压崩溃临界点算法。在最优潮流的基础上, 融入蒙特卡罗随机选线以及基于负荷预测的负荷正态分布, 以系统能够承受的最大负荷为目标函数, 对由负荷的不确定性导致的变量随机性建立起相应的机会约束规划, 采用非线性规划方法对目标函数进行优化, 直接求得满足某一概率约束下的系统最大负荷。以IEEE3机9节点系统为例进行仿真, 研究负荷分布和蒙特卡罗随机抽样下的支路切除对电力系统电压崩溃点的影响, 计算出不同情况下的电压崩溃临界点, 以此检验此模型的有效性。

关键词: 蒙特卡罗方法; 随机最优潮流; 概率约束; 系统极限负荷; 电压崩溃临界点; 蒙特卡罗随机选线

An approach for determining voltage collapse critical point based on Monte Carlo stochastic line selection optimal power flow

MA Rui, YUAN Wen-wei

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: An approach for determining voltage collapse critical point based on Monte Carlo stochastic line selection optimal power flow is presented. The static voltage characteristic and load normal distribution based on load forecasting are added to optimal power flow model. And it uses the maximum load that the system can afford as the objective function, establishes the corresponding chance-constrained programming of variables randomness caused by load uncertainty, and then optimizes it directly by the way of nonlinear programming, with the purpose of obtaining the maximal load that subjects to certain probability. At last, it uses the IEEE 3-generator 9-bus system as the example and simulates it, mainly studies the influence of the load probability distribution and static load characteristic on voltage collapse critical point, and calculates voltage collapse critical point of different positions, so as to testify the validity of this approach.

Key words: Monte Carlo method; stochastic optimal power flow; probability constraint; system maximum load; voltage collapse critical point; Monte Carlo stochastic line selection

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0065-05

0 引言

在电力系统电压稳定分析与控制中, 电压崩溃临界点的确定具有十分重大的意义。若得到较为准确的电压崩溃临界点, 就可以知道系统处于极限运行状态时的各种信息, 如系统最大负荷、电压稳定裕度和灵敏度等, 据此可判断出当前状况下系统的稳定度, 从而提出更为有效的系统控制策略以及控制方案, 提高电力系统稳定性^[1-2]。

基金项目: 湖南省教育厅优秀青年项目(06B007); 清华大学电机系电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室开放基金资助项目(GZH(2007)08)

到目前为止, 电力界和学术界已经提出了多种旨在精确求解电压稳定临界点的实用算法^[3-11], 这些算法的出现大大推动了电压稳定性的研究, 但大多数模型及算法建立在系统网络参数和负荷确定的基础上, 而电力系统在运行过程中存在大量的不确定因素, 如负荷功率或发电出力的随机变化, 发输变电设备随机故障退出运行等, 考虑这些不确定因素更符合实际情况^[12-13], 随机潮流计算是解决上述问题的有效方法和手段, 文献[14]针对考虑负荷概率分布的随机最优潮流问题, 建立起了相应的机会约束规划模型并探索解法, 是对传统最优潮流的最新发展。

电力系统本质上是一个随机系统, 通过概率模

拟方法对电力系统进行分析能从整体和宏观上评价电力系统的性能。本文在考虑负荷概率分布随机最优潮流的基础上，还考虑到线路可能发生的随机故障，根据蒙特卡罗方法随机选择线路并将其断开，模拟实际系统故障，求解出不同故障情况下的系统能承受的最大负荷。本算法能承受一定的负荷预测误差，对于改善系统的稳定性能起到一定的作用。

1 基于随机最优潮流的电压崩溃临界点模型

1.1 随机最优潮流基本模型

随机最优潮流模型不考虑发电机和支路的随机故障，仅考虑负荷的不确定性，以发电费用期望的最小为目标。对于母线电压幅值、支路传输功率和发电机无功处理这三类状态变量，要求以较大的概率满足上下限约束，目标函数表达式为：

$$\min \sum_{i \in S_G} F(\bar{P}_{Gi}) \quad (1)$$

式中： \bar{P}_{Gi} 为发电机*i*的有功输出； S_G 为发电机集合。

(1) 功率平衡约束

$$\tilde{P}_{Gi} = \tilde{P}_{Di} + \tilde{U}_i \sum_{j \in i} \tilde{U}_j (G_{ij} \cos \tilde{\theta}_{ij} + B_{ij} \sin \tilde{\theta}_{ij}) \quad (2)$$

$$\tilde{Q}_{Gi} = \tilde{Q}_{Di} + \tilde{U}_i \sum_{j \in i} \tilde{U}_j (G_{ij} \sin \tilde{\theta}_{ij} - B_{ij} \cos \tilde{\theta}_{ij}) \quad (3)$$

(2) 控制变量的上下限约束

$$P_{Gi, \min} < \tilde{P}_{Gi} < P_{Gi, \max} \quad i \in S_G \quad (4)$$

$$U_{i, \min} < \tilde{U}_i < U_{i, \max} \quad i \in S_G \quad (5)$$

(3) 机会约束

$$P_r \{ \tilde{Q}_{Gi} \geq Q_{Gi, \min} \} \geq p_{Gi, \min} \quad i \in S_G \quad (6)$$

$$P_r \{ \tilde{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi, \max} \} \geq p_{Gi, \max} \quad i \in S_G \quad (7)$$

$$P_r \{ \tilde{U}_i \geq U_{i, \min} \} \geq p_{U_i, \min} \quad i \in S_{PQ} \quad (8)$$

$$P_r \{ \tilde{U}_i \leq U_{i, \max} \} \geq p_{U_i, \max} \quad i \in S_{PQ} \quad (9)$$

$$P_r \{ |\tilde{I}_{ij}| \leq I_{ij, \max} \} \geq p_{I_{ij}, \max} \quad i, j \in S_L \quad (10)$$

$$P_r \{ |\tilde{I}_{ji}| \leq I_{ji, \max} \} \geq p_{I_{ji}, \max} \quad i, j \in S_L \quad (11)$$

其中：“~”表示的是随机变量；“—”表示变量的数学期望； P_{Di} 和 Q_{Di} 分别表示负荷节点上的有功和无功功率需求； P_{Gi} 和 Q_{Gi} 分别表示发电机*i*的有功

和无功出力； U_i 和 θ_i 表示节点*i*的电压幅值和相角； G_{ij} ， B_{ij} 表示节点*i*，*j*之间互导纳的实部和虚部； I_{ij} ， I_{ji} 表示支路(*i*，*j*)分别从两个支路端节点流出的电流； $P_r\{\}$ 表示不等式满足的概率值； p_{\min} 和 p_{\max} 分别表示下限和上限的概率值； S_{PQ} 表示的是PQ节点的集合； S_L 表示线路的集合。

由于系统的负荷是一个随机量，那么导致系统中的其他状态变量如节点的电压幅值和相角、支路的传输功率等都成了随负荷功率需求而变化的随机量，对于由负荷变化引起的机会约束的处理，参见文献[13]的逐步调整机会约束限值的启发式方法，按此方法的随机最优潮流收敛后，继续做下列的改进，形成基于蒙特卡罗随机选线的随机最优潮流的电压崩溃临界点模型。

1.2 蒙特卡罗随机选线模型

蒙特卡罗法的基本思想是：首先建立一个概率模型，使其参数等于问题的解，然后通过对模型的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特性。

本文利用计算机产生的服从均匀分布的伪随机数，根据各支路的故障率大小，随机抽样确定系统中各支路的运行状态后，系统的运行状态也就已确定。然后调用电力系统随机最优潮流计算程序，计算在该运行状态下系统最大负荷，从而将蒙特卡罗模拟与电压崩溃临界结合起来，求出系统在不同故障条件下的最大崩溃点及相应的潮流信息。

一般情况下，假设支路发生事故的概近似满足柏松分布，即：

$$P(E_i) = (1 - e^{-\lambda_i}) \times \exp(-\sum_{j \neq i} \lambda_j) \quad (12)$$

式中： E_i 是第*i*个系统事故； λ_i 为第*i*条支路的故障率。

在抽样过程中，先产生一个服从均匀分布的随机数 N_i ，如果 $N_i < P(E_i)$ ，则认为该支路出现故障，运行状态置零，即退出运行，抽样结束，进行最优潮流计算，反之则认为该支路正常运行，则返回继续进行下一轮抽样。

1.3 基于蒙特卡罗随机选最优潮流的电压崩溃临界点模型

本算法模型仅考虑负荷的概率分布，不考虑其他一些随机因素对系统的影响，以系统的有功负荷为目标函数，要求各变量在满足最优潮流各变量上下限约束的同时，还要求节点电压幅值、发电机无功出力以及支路潮流等满足概率约束，其中概率约

束是指要求这些变量以一定的概率满足其上下限约束, 目的在于求出在满足概率约束的情况下系统能够承受的最大负荷, 目标函数为:

$$\max \sum_{i \in S_D} (\bar{P}_{Di}) \quad (13)$$

其中: P_{Di} 为负荷节点 i 的有功需求; S_D 为负荷节点功率需求的集合。

$$P_{Di,\min} < \tilde{P}_{Di} < P_{Di,\max} \quad i \in S_D \quad (14)$$

文献[14]中负荷节点的功率需求是确定的, 即为常量, 在处理时是根据负荷分布的相关性, 并对历史数据进行统计分析, 在此基础上得出负荷之间的协方差, 进而得出受控变量的标准差, 考虑的是负荷的正态分布特点, 在处理的过程中不是作为变量, 本文把有功负荷作为一个独立的变量引入到系统里面, 让无功需求和有功满足固定的功率因数, 这样在求电压崩溃点的时候兼顾了系统无功方面的需求, 采用非线性规划法优化, 直接求解出系统能承受的负荷极限。这样式(4)~(15)就构成基于蒙特卡罗随机选线的随机最优潮流电压崩溃临界点算法模型。

2 求解方法

基于随机最优潮流的电压崩溃临界点算法基本流程如下:

Step1: 读入原始数据。

Step2: 采用蒙特卡罗随机选线方法从支路中选择一条支路从系统中断开。

Step3: 求解确定性最优潮流系统总的最大有功负荷, 以恒功率因数考虑无功增长。

模型求解时采用等价目标函数:

$$\min - \sum_{i \in S_D} \tilde{P}_{Di} \quad (15)$$

由于嵌入了 ZIP 描述的负荷静态电压特性, 因此系统潮流方程发生了改变, 体现在雅可比矩阵的变化上, 在式(2)和式(3)中, 将其潮流方程线性化, 得其修正方程式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{K} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: ΔP , ΔQ 分别为节点注入有功和无功的变化量; $\Delta \theta$, ΔU 为节点电压相角和幅值不平衡量;

$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{K} & \mathbf{L} \end{bmatrix}$ 为最优潮流方程对应的雅可比矩

阵, 其各子矩阵元素为: $\mathbf{H}_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j}$, $\mathbf{N}_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j}$,

$$\mathbf{K}_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j}, \quad \mathbf{L}_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j}。$$

考虑 ZIP 模型后与常规潮流相比, 对于 N 的增量 $\frac{\partial P_{Di}}{\partial U_i} = P_{Di}(2a_{pi}U_i + b_{pi})$, \mathbf{L} 的增量为

$$\frac{\partial Q_{Di}}{\partial U_i} = P_{Di} \tan \varphi (2a_{qi}U_i + b_{qi}), \quad Q_{Di} \text{ 为负荷节点 } i$$

的初始无功负荷。

Step4: 计算受控变量的标准差。

假设已知负荷正态分布信息, 可对历史数据进行统计分析, 计算出负荷间的协方差矩阵 \mathbf{V}_c , 根据受控变量与节点注入功率之间的关系求出各变量的标准差 σ_x , 如: 设发电机无功出力 Q_G 与 U 的函数关系为 $Q_G = f(U)$, 又 $U = \mathbf{J}_L [P_D, Q_D]$, 式中 \mathbf{J}_L 为灵敏度矩阵, 故可推导出 Q_G 与注入功率的灵敏度关系为, $\mathbf{J}' = f'(U)\mathbf{J}_L$, 则 Q_G 的方差向量 $\mathbf{V}_{QG} = \mathbf{J}'\mathbf{V}_c\mathbf{J}'^T$, 类似可求出其他方差, 从而求出标准差 σ_x 。

Step5: 判断所有机会约束是否满足式(13), 如满足, 则停止计算输出结果, 否则, 下一步。

Step6: 判断是否达到最大迭代次数, 如达到则停止计算输出结果, 否则, 下一步。

Step7: 根据机会约束形成新的机会约束的上下限, 回到 Step3。

3 算例分析

本文以 IEEE3机9节点作为算例, 假设负荷节点的功率需求服从正态分布, 决定正态分布特性的是其均值和方差(标准差)可以通过历史数据统计分析获得。本文正态分布的均值取3机9节点系统负荷需求的原始数据, 方差为均值的 $n\%$, 机会约束的概率取小于1的数。以下分情况讨论概率分布以及蒙特卡罗随机选线对电压崩溃临界点的影响。

1) 改变正态分布方差, 考察其对电压崩溃临界点的影响。表1为不同负荷分布标准差下的系统最大负荷。

以上是取不同方差时的系统最大负荷以及迭代次数, 可以看出改变方差时目标函数的值是几乎没什么变化的, 但是迭代的次数是逐步增加的, 这点和文献[14]很相似。

表1 不同负荷分布标准差下的系统最大负荷

Tab.1 The largest load of the system under different standard deviations of load normal distributions

标准差 n	最大负荷 / MVA	迭代次数
3	702.44	5
4	702.44	5
5	702.44	6
6	702.44	8
7	702.44	10
8	702.44	13
9	702.44	18

2) 通过蒙特卡罗随机选线方法可以随机选择一条线路并将其从系统断开, 以下是不同线路断开时的电压崩溃点信息。

表2~表7为9节点系统各支路断线时传统能承受的最大负荷, 从以上数据可以看出, 不同的支路在系统中的作用是不同的, 不同支路断线对系统稳定的影响不同, 支路(6, 7)的断线使系统最大负荷从702.44 MW降低到了579.93 MW, 从而可以推断出支路(6, 7)对系统稳定的影响最大, 支路(4, 5)影响为最小, 据此可以采取相应的措施来提高系统稳定性。

表2 支路4-5断开时电压崩溃点数据

Tab.2 Voltage collapse critical point data with branch 4-5 being removed

发电机			负荷				
节点号	P_G	Q_G	U_m	节点号	P_G	Q_G	U_m
1	204.63	119.18	1.100	5	107.43	35.78	0.958
2	224.70	109.58	1.091	7	280.00	98.00	0.988
3	254.96	105.54	1.099	9	280.00	112.0	0.953
合计	684.29	334.30		合计	667.43	245.78	

表3 支路5-6断开时电压崩溃点数据

Tab.3 Voltage collapse critical point data with branch 5-6 being removed

发电机			负荷				
节点号	P_G	Q_G	U_m	节点号	P_G	Q_G	U_m
1	224.41	110.19	1.096	5	109.04	36.31	0.996
2	229.18	99.88	1.094	7	280.0	98.0	0.990
3	145.19	49.75	1.069	9	199.11	79.65	0.991
合计	598.78	259.82		合计	588.15	213.96	

表4 支路7-8断开时电压崩溃点数据

Tab.4 Voltage collapse critical point data with branch 7-8 being removed

发电机			负荷				
节点号	P_G	Q_G	U_m	节点号	P_G	Q_G	U_m
1	190.86	161.47	1.100	5	253.65	84.47	0.946
2	203.14	72.23	1.095	7	139.20	48.72	0.982
3	270.00	116.54	1.100	9	244.38	97.75	0.945
合计	664.00	350.25		合计	637.24	230.94	

表5 支路9-4断开时电压崩溃点数据

Tab.5 Voltage collapse critical point data with branch 9-4 being removed

发电机			负荷				
节点号	P_G	Q_G	U_m	节点号	P_G	Q_G	U_m
1	181.15	96.16	1.091	5	280.00	93.24	0.952
2	226.47	105.89	1.093	7	280.00	98.00	0.987
3	254.34	98.34	1.089	9	83.88	33.55	0.973
合计	661.95	300.39		合计	643.88	224.79	

表6 支路6-7断开时电压崩溃点数据

Tab.6 Voltage collapse critical point data with branch 6-7 being removed

发电机			负荷				
节点号	P_G	Q_G	U_m	节点号	P_G	Q_G	U_m
1	222.33	114.33	1.080	5	257.95	85.90	0.945
2	226.21	106.45	1.098	7	170.77	59.77	0.985
3	147.97	36.64	1.062	9	151.22	60.49	0.997
合计	596.51	257.42		合计	579.93	206.15	

表7 断开不同支路时电压崩溃点数据

Tab.7 Voltage collapse critical point of different branch removal

起始节点	4	5	7	9	6
末端节点	5	6	8	4	7
最大负荷	667.43	588.15	637.24	643.88	579.93

4 结论

本文建立了基于蒙特卡罗随机选线最优潮流的电压崩溃点模型。

着重比较了负荷的概率分布以及切除支路对电压崩溃临界点的影响, 可以分析出各支路对系统稳定的重要性, 并进行排序。

求出了基于蒙特卡罗随机选线最优潮流的电压崩溃点,可以以此为基础分析系统的运行状况,并进行下一步的研究。

参考文献

- [1] 赵晋江,江晓东,张伯明.一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法[J].电力系统自动化,2004,28(23):28-32.
ZHAO Jin-jiang, JIANG Xiao-dong, ZHANG Bo-ming. Approach for identification and computation of static voltage stability critical point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 28-32.
- [2] 江伟,王成山,余贻鑫,等.直接计算静态电压稳定临界点的新方法[J].中国电机工程学报,2006,26(10):3-8.
JIANG Wei, WANG Cheng-shan, YU Yi-xin, et al. A new method for direct calculating the critical point of static voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 3-8.
- [3] 郭瑞鹏,韩祯祥,王勤.电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法[J].中国电机工程学报,1999,19(4):14-17.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang, WANG Qin. Nonlinear programming model & algorithm for point of collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 14-17.
- [4] 郭瑞鹏,韩祯祥.计算最近电压崩溃临界点的实用算法[J].电网技术,2006,30(3):13-17.
GUO Rui-peng, HAN Zhen-xiang. A practical algorithm for calculating the closest point of collapse[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 13-17.
- [5] 罗明亮,黄宇保,王建全.基于最优潮流法含暂态稳定约束的最大传输容量计算[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):22-26.
LUO Ming-liang, HUANG Yu-bao, WANG Jian-quan. Calculation of transient stability-constrained TTC based on OPF method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 22-26.
- [6] 杭乃善,廖青华,李如琦,等.电力系统临界电压崩溃潮流的柔性节点算法[J].中国电机工程学报,2005,25(17):60-64.
HANG Nai-shan, LIAO Qing-hua, LI Ru-qi, et al. A flexible node algorithm for critical voltage collapse power flow in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 60-64.
- [7] 韦化,丁晓莺.基于现代内点理论的电压稳定临界点算法[J].中国电机工程学报,2002,22(3):27-31.
WEI Hua, DING Xiao-ying. An algorithm for determining voltage stability critical point based on interior point theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 27-31.
- [8] 胡泽春,王锡凡,程浩忠.最近电压稳定临界点的两层规划模型和信赖域算法[J].中国电机工程学报,2008,28(1):8-13.
HU Ze-chun, WANG Xi-fan, CHENG Hao-zhong. A bilevel programming formulation and trust region approach for closest critical point of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 8-13.
- [9] 谢俊,陈星莺.一种计及暂态稳定约束最优潮流的快速方法[J].继电器,2006,34(10):20-22,27.
XIE Jun, CHEN Xing-ying. Fast method for solutions of optimal power flow with transient stability constraints[J]. Relay, 34(10): 20-22, 27.
- [10] 付钢,刘明波.含暂态能量裕度约束最优潮流问题的线性规划解法[J].继电器,2005,33(10):12-16.
FU Gang, LIU Ming-bo. Linear programming algorithm for optimal power now problems incorporating transient energy margin constraint[J]. Relay, 2005, 33(10): 12-16.
- [11] 张尧,宋文南.节点电压稳定临界状态和弱节点的确定[J].中国电机工程学报,1993,13(6):40-45.
ZHANG Yao, SONG Wen-nan. Determination of the critical state of voltage stability in load buses and the weakest bus of the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 40-45.
- [12] 王成山,郑海峰,谢莹华,等.计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J].电力系统自动化,2005,29(24):39-44.
WANG Cheng-shan, ZHENG Hai-feng, XIE Ying-hua, et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 39-44.
- [13] 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 Ze-chun, WANG Xi-fan, ZHANG Xian, et al. Probabilistic load flow considering branch outages[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 26-33.
- [14] 胡泽春,王锡凡.考虑负荷概率分布的随机最优潮流方法[J].电力系统自动化,2007,31(16):18-22,48.
HU Ze-chun, WANG Xi-fan. Stochastic optimal power flow approach considering load probabilistic distributions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 18-22, 48.

收稿日期:2010-01-21; 修回日期:2010-05-31

作者简介:

马瑞(1971-)男,博士,教授,主要从事电力系统安全分析、风电并网问题、电力市场等方向的研究;

袁文伟(1984-)男,硕士研究生,主要从事电力系统电压稳定性分析与控制研究。E-mail: wwyuan628@163.com