

基于网损灵敏度二阶指标的电压稳定概率评估

彭昱,周玮,孙辉,邹积岩

(大连理工大学电气工程系,辽宁 大连 116024)

摘要: 大多数电力系统电压稳定评估主要采用的是确定性的分析方法。简要介绍了概率的分析方法在进行电力系统电压稳定分析中的应用,提出了一种以蒙特卡罗法和网损灵敏度二阶指标确定电压稳定负荷裕度相结合的方法,同时引入两个概率指标——电压崩溃概率指标和电压崩溃点负荷水平期望值。采用该方法对重载下的 AEP30 节点系统进行了电压崩溃的概率评估,并侧重于分析负荷的随机特性对负荷水平(电压崩溃点)的影响,以及输电线断线的概率评估和相应减小电压崩溃概率的措施比较。

关键词: 电压崩溃点; 网损灵敏度二阶指标; 蒙特卡罗法; 概率评估

中图分类号: TM712, TM744 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)18-0022-05

0 引言

随着电力系统的不断发展,由于系统重载、线路开断或无功缺失导致的电压稳定问题显得越来越突出。而以负荷缓慢增长引起负荷端母线电压缓慢下降,并在接近崩溃点时发生不可逆转的突然下降为特征的电压崩溃一直是电力系统运行研究人员关注的热点^[1,2]。此时电压崩溃点与鞍节分岔点,以及潮流雅可比矩阵奇异点、网络极限潮流和负荷最大功率点是重合的。大多数文献采用静态电压稳定的确定性分析方法获得电压崩溃点(或鞍节分岔点),从而对电压稳定进行裕度评估^[3~6]。而实际系统中由于输入量的不确定性会导致用于电压崩溃评估的负荷裕度也相应成为随机变量。因此有些文献在电压稳定评估中引入了概率的分析方法,在考虑了由于节点负荷的随机波动,发电机的再调配以及网络元件的随机开断等给系统带来的随机性的基础上,对负荷裕度进行了概率评估,为给定运行状况可能发生电压崩溃的概率提供了有效的指标,并且根据这些指标,可以确定相应的补救措施来减小电压崩溃概率^[7~12]。

由于蒙特卡罗法算法简单,局限性小,而网损灵敏度二阶指标计算快速简捷,因此本文主要采用蒙特卡罗法和网损灵敏度二阶指标相结合的方法对重载下的 AEP30 节点系统进行电压崩溃概率分析。通过对负荷的随机取样获得崩溃点处负荷水平的概率分布函数,并做相应的概率分析。采用概率指标进行了事故的概率分析并比较了用以减少电压崩溃概率的三种措施。该方法为电力系统规划运行人员

进行电压稳定分析提供了有效的手段。

1 基于网损灵敏度二阶指标的负荷裕度计算方法

通常在电力系统中用于计算负荷裕度的方法主要有连续潮流法^[5],指标法^[3,4]或非线性规划^[6]等方法。而连续潮流法和非线性规划法可以方便地计及各种约束,获得的负荷裕度准确性高,但计算量过大。相对而言大多数用于计算负荷裕度的指标的计算量较小,但往往忽略了无功限制等因数从而导致裕度估算偏于乐观。本文采用的基于网损灵敏度二阶指标的裕度求取的算法补偿了一阶指标的非线性性,提高了计算的准确性。

网络中功率损耗应等于所有节点注入功率之和:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{n_b} V_i \sum_{j=1}^{n_b} V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1)$$

这里, n_b 是所有节点总数; G_{ij} 和 B_{ij} 分别是节点导纳阻抗的实部和虚部; V_i 和 V_j 代表节点 i 和 j 的电压幅值; δ_{ij} 是节点 i 和 j 的电压相角差。

因此,系统网损可以看作是节点注入功率或节点电压的函数:

$$P_{\text{loss}} = F(P, Q) = f(V, V)$$

则:联合潮流程序,得到

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: J 是潮流的雅克比矩阵。

$$\begin{cases} \frac{dP_{\text{loss}}}{d_n} = 2 \sum_{i=1}^{n_b} V_i V_n G_{in} \sin \theta_{in} \\ \frac{dP_{\text{loss}}}{dV_n} = 2 \sum_{i=1}^{n_b} V_i G_{in} \cos \theta_{in} \end{cases} \quad (3)$$

(第一个式中的 n 为 PQ 和 PV 节点,第二式中的 n 为 PQ 节点)

网损灵敏度的二阶导数可以通过有限微分求得^[13,14]:

$$\frac{d^2 P_{\text{loss}}}{d^2} = \frac{dP_{\text{loss}}}{d} (+) - \frac{dP_{\text{loss}}}{d} () \quad (4)$$

这里的 的取值应小,通常为 5 倍潮流允许误差。

崩溃点(系统的崩溃点负荷水平取弱节点处的值)的算法如下:

1)以初始运行点作为起点,以 5 倍潮流允许误差的步长增加负荷需求 ($= (P - P_0) / P_0$),得到第二个运行点,通过嵌入了网损灵敏度计算的潮流程序计算出两个运行点的网损灵敏度,再通过有限微分求得初始运行点在网损灵敏度二阶指标上的值。

2)在第二个运行点的基础上增加一定的负荷功率得到第三个运行点₀,并在此基础上以 5 倍潮流允许误差的步长增加负荷功率得到第四个运行点,并保证第三个和第四个运行点的潮流收敛,计算它们的网损灵敏度,同样得到第三个运行点在网损灵敏度二阶指标上的值。

3)通过网损灵敏度二阶指标上的两点作直线,与参数轴 相交的值₁为电压崩溃初始值。

4)判断₁是否潮流收敛,若收敛,则回到第 2 步,适当增加负荷重新计算第三个运行点。若不收敛,则计算一个新的值_{new} = (₀ + ₁) / 2。

5)再判断这个新的 是否收敛,若收敛则以代替公式中的₀计算下一个新的;若不收敛则以这个新的 代替₁,带入公式计算。

6)当 (₁ - ₀) $\leq 10^5$,则认为迭代收敛。

2 电压稳定概率评估

确定性方法的主要局限是对过去的经验、数据和未来的预测没有考虑其可能性,因此人们希望通过将概率引入过去的经验和数据中,由此而进行的任何计算分析都在带有随机性的环境中。

2.1 概率的分析方法

概率分析需要的数据包括设备的可利用率、负

荷的概率分布函数等。通常潮流问题可以有两个非线性方程代表^[12]:

$$\begin{aligned} Y &= f_c(X_c) \\ Z &= g_c(X_c) \end{aligned} \quad (5)$$

Y 为输入的随机变量(有功和无功注入等),其不确定性来源于负荷随机波动或发电机停运; X 为状态随机变量(电压幅值和角度); Z 为输出随机变量(支路潮流); c 是特定的网络结构,也属于随机量,跟输电设备的停运有关。解方程的过程就是根据 Y 的均值、方差及概率密度函数来确定 X 和 Z 的均值、方差及概率密度函数。所有 Y 的不确定性都会反映到状态量的数字特征。通常求解上面的方程式的方法主要包括解析法和模拟法,及其组合应用^[12,15]。解析法包括直流法、线性化交流法、保留非线性交流法等等。其中线性化交流法还包括卷积、FFT、累积元(半不变量法)和 Gram-Charlier级数等等。用解析方法时,由于变量的随机性及潮流方程的非线性,要真正求出概率潮流的精确解相当困难。因此,大多数文献常作一些合理的假设使问题简化,如假设各节点注入功率相互独立或线性相关、节点负荷用正态分布的随机变量或离散的随机分布描述、带基荷的电厂出力为二项分布的随机变量、非线性潮流方程线性化等。模拟法,也就是蒙特卡罗法,是通过随机变量的统计试验、随机模拟来求解数学物理、工程技术问题近似解的数值方法。其基本思想是:当所要求的问题是某种事件出现的概率,或是某个随机变量的期望值时,它们通过某种“试验”的方法,得到这种事件出现的频率或者这个随机变量的平均值,并用它们作为问题的解。蒙特卡罗法的特点是它的应用范围比较广,适用性很强,算法比较简单。

2.2 基于蒙特卡罗法的电压稳定概率评估

这里我们采用蒙特卡罗法和第 2 节介绍的负荷裕度求解方法进行电压稳定的概率分析,其步骤如下:

- 1)根据负荷水平随机特征数据进行取样;
- 2)如果初始负荷状态的潮流发散,计数并返回步骤 1;
- 3)采用第 1 节介绍的方法确定电压稳定的负荷裕度;
- 4)当仿真次数为设定值(如 1 000 次)时停止仿真,否则返回步骤 1。

3 计算实例

本文以 AEP30 节点测试系统作为算例^[7],对其

进行电压崩溃的概率分析。我们假设每个发电机的强迫停运概率为 0.05,每个调相机强迫停运概率为 0.02,静态电容器联合强迫停运概率为 0.01。同时每条线路的强迫停运概率如表 1。

表 1 输电线强迫停运概率表

Tab 1 Data for transmission forced outage probability

输电线	强迫停运 概率 (×10 ⁵)	输电线	强迫停运 概率 (×10 ⁵)	输电线	强迫停运 概率 (×10 ⁵)
1 - 2	46	4 - 12	180	21 - 22	66
1 - 3	50	12 - 13	180	15 - 23	66
2 - 4	52	12 - 14	73	22 - 24	67
3 - 4	40	12 - 15	73	23 - 24	66
2 - 5	60	12 - 16	61	24 - 25	67
2 - 6	61	14 - 15	60	25 - 26	67
4 - 6	45	16 - 17	61	25 - 27	68
5 - 7	42	15 - 18	62	27 - 28	160
6 - 7	42	18 - 19	65	27 - 29	68
6 - 8	45	19 - 20	64	27 - 30	75
6 - 9	180	10 - 20	75	29 - 30	66
6 - 10	160	10 - 17	65	8 - 28	62
9 - 11	180	10 - 21	64	6 - 28	62
9 - 10	180	10 - 22	66		

3.1 负荷预测的不确定性对电压崩溃点负荷水平的影响

首先不考虑输电线、发电机或静态电容器的强迫停运的影响,只假设负荷为正态分布,且方差分别为 2%和 5%,计算相应的崩溃点处负荷水平的概率分布函数。

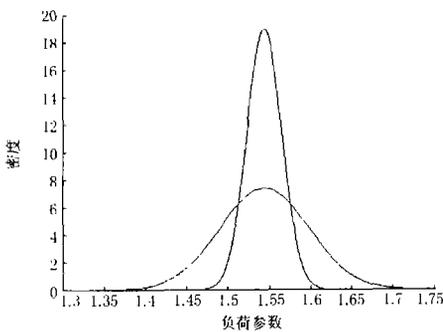


图 1 AEP30系统电压崩溃点负荷水平的概率分布函数

Fig 1 PDF of at PoC in AEP30

图 1显示了对方差为 2%和 5%均值的正态分布负荷的 AEP30系统分别进行 1 000次蒙特卡罗法仿真得到的随机变量 的概率密度函数。相应的电压崩溃期望值为 $E[J] = 1.544$,标准方差分别为 0.021和 0.054。表 2显示了两种负荷分布下 5种不同的负载对应的电压崩溃概率。

表 2 系统负荷水平百分数和电压崩溃概率

Tab 2 Percentage of system loading level and probability of voltage collapse

系统负荷 / (%)	电压崩溃概率 / (%)	
	2%	5%
30	0	0
40	0	0.38
50	1.8	20.76
55	61.25	54.42
60	99.6	85.01

当系统负载增长了基态的 30%的时候,负荷方差为 2%和 5%的系统发生电压崩溃的可能性都为零。当负荷增加 50%的时候,后者系统发生电压崩溃的可能性是前者的 12倍。当然给定相应的电压崩溃概率也可以获得相应的负荷水平。例如,当电压崩溃的概率为 30%的时候,两情况下系统负载分别为 1.505和 1.440。即当系统的负荷增加至 426.5 MW和 408.15 MW (基态为 283.4 MW)时,有 30%的可能性发生电压崩溃。

3.2 事故概率分析

电压崩溃的事故分析是电压稳定分析的重要内容。本文选取 AEP30系统中第 2节点处发电机、4台同步调相机、2台电容器以及 15条输电线断线分别进行 1 000次的蒙特卡罗仿真。负荷方差为 2%,取样后采用第 1节介绍的网损灵敏度二阶指标进行崩溃点处负荷水平的估算(弱节点为 30, 29或 26^[51]),最终得到负荷水平的期望值,并计算出事故导致电压崩溃的概率。其结果分别如表 3、4。

表 3、4中引入两个概率指标,电压崩溃发生的概率指标和电压崩溃负荷水平期望值。当崩溃发生的概率不为 0时,以此指标的大小进行排序;否则按照负荷水平期望值进行排序。从表中可见发电机、调相机和电容器事故并不是最严重的事故,而最严重的事故,如输电线 25-26、6-7断线并不一定涉及弱节点(26、30或 29)。虽然输电线 25 - 26断线在所选的 15条输电线中是最危险的,输电线 4-12、6 - 7等却与弱节点无关。

表 3 发电机、调相机和电容器事故分析表

Tab 1 Data for contingency analysis of generator, synchronous condenser and capacitor

序号	设备	崩溃发生概率	负荷水平期望值
1	发电机 2	0	1.049
2	调相机 8	0	1.069
3	调相机 5	0	1.079
4	调相机 13	0	1.082
5	调相机 11	0	1.087
6	两个电容器	0	1.106

表 4 输电线事故分析表

Tab 4 Data for contingency analysis of transmission line

序号	输电线	崩溃发生概率	负荷水平期望值
1	25 - 26	1	-
2	28 - 27	1	-
3	6 - 7	0.873	1.002
4	2 - 6	0.36	1.016
5	4 - 6	0.19	1.022
6	9 - 10	0.08	1.028
7	2 - 4	0	1.065
8	27 - 30	0	1.066
9	6 - 9	0	1.075
10	12 - 13	0	1.081 5
11	9 - 11	0	1.087 2
12	27 - 29	0	1.091 6
13	6 - 8	0	1.099 8
14	12 - 15	0	1.101 8
15	6 - 10	0	1.106 8

根据表 3、4 的数据,可以获得对某个负荷水平,在未来 1 h 内电压崩溃发生的概率(该内容在以后文章中将有详述)。其值为所有事故的状态下电压发生崩溃的概率乘以事故发生的概率(见表 1),其数学表达式:

$$Pr(\text{Collapse}) = \sum_{E_i} Pr(\text{Collapse} | E_i) \cdot Pr(E_i)$$

若只考虑表 1 中的 15 条输电线,则电压崩溃发生的概率为表 4 第 2 列的值分别乘以表 1 中对应的输电线路停运概率,其值为 3.09×10^{-3} 。

考虑到不同的事故(对应不同的网络结构)导致系统不同的负荷水平,如图 2 所示。因此,表 3、4 中所获得的负荷水平期望值(包括剩余的 26 条输电线断线的负荷期望值,由于篇幅的原因未列出)可以根据事故发生的概率进行权重分析,得到的期望值为 1.137 5。

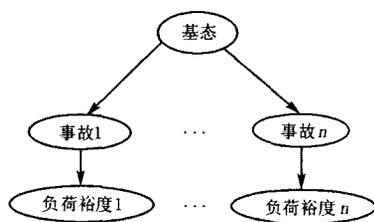


图 2 事故及负荷水平

Fig 2 Contingency and load level

为了减小表 4 中前 6 种事故导致的电压崩溃的概率,选择以下三种方式作为比较,结果见表 5。

- 在节点 26 处安装 10 Mvar 的电容器;
- 在节点 26 处安装 25 Mvar 的电容器;
- 在节点 26 处切 50% 的负荷。

表 5 措施比较

Tab 5 Strategies comparison

输电线	方法 a	方法 b	方法 c
25 - 26	1	1	1
28 - 27	1	0.102	1
6 - 7	0.313	0	0.405
2 - 6	0.05	0	0
4 - 6	0	0	0
9 - 10	0	0	0

表 4 显示输电线 25-26 和 28-27 断线都会导致电压崩溃,从表 5 中可见输电线 25-26 更为严重,因为无论采用何种方法对电压崩溃的概率不会减小。同时表 5 的数据也反应了在弱节点处切负荷和无功补偿都有效,但实际中切负荷的代价更大。

4 结论

由于蒙特卡罗法是电力系统概率分析中的常用方法,其通俗易懂且局限性小。而网损灵敏度二阶指标确定崩溃点的方法简单快速准确。因此本文提出一种将它们相结合的方法对电力系统进行电压稳定的概率评估。并将该方法应用于重载下的 AEP30 节点系统,通过引入的两个概率指标(电压崩溃概率指标和电压崩溃点负荷水平期望值)从负荷的不确定性对负荷裕度的影响、事故的概率评估和减小电压崩溃概率的措施比较等三个方面进行了电压稳定概率评估。算例分析显示了该方法应用简单且有效,为系统规划运行人员进行电压稳定的概率评估提供了一种分析手段。

参考文献:

- [1] Taylor C W. Power System Voltage Stability [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001. 17-34.
- [2] Chiang Hsiao-dong, Jean-jumeau R. Toward a Practical Performance Index for Predicting Voltage Collapse in Electric Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 584 - 592.
- [3] Zarate L A, Castro C A. Fast Method for Computing Power System Security Margins to Voltage Collapse [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm, and Distrib, 2004, 151(1): 19-26.
- [4] Berizzi A, Finazzi P. First and Second Order Methods for Voltage Collapse Assessment and Security Enhancement [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 543-551.
- [5] Chiang H D, Flueck A J, Shah K S, et al. CPFLOW: a Practical Tool for Tracing Power System Steady-state Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations

- [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (2).
- [6] WEI Hua, Sasaki H, et al An Interior Point Nonlinear Programming for Optimal Power Flow Problems with a Novel Data Structure [A]. IEEE/PICA. Ohio: 1997. 134-141.
- [7] Sharaf T A M, Berg G J. Probabilistic Voltage Stability Indexes [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1991, 138 (6): 499-504.
- [8] Billinton R, Aboreshaid S Voltage Stability Considerations in Composite Power System Reliability Evaluation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (2): 655 - 660.
- [9] Amjady N. A Framework of Reliability Assessment with Consideration Effect of Transient and Voltage Stabilities [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (2): 1005-1014.
- [10] Hatziaargyriou N D, Karakatsanis T S Probabilistic Load Flow for Assessment of Voltage Instability [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1998, 145 (2): 196-202.
- [11] 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 Sheng-hu, D N G M ing, WANG Xing-qiang Probabilistic Evaluation to Static Voltage Security of Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (20): 26-30.
- [12] Leite da Silva A M, Coutinho I P, Zambroni de Souza A C, et al Voltage Collapse Risk Assessment [J]. Electric Power Systems Research, 2000, 54 (3): 221-227.
- [13] Chiang Hsiao-dong, Jean-jumeau R. Toward a Practical Performance Index for Predicting Voltage Collapse in Electric Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (2): 584 - 592.
- [14] CHEN Ke, Hussein A, et al A Performance-index Guided Continuation Method for Fast Computation of Saddle-node Bifurcation in Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 753-760.
- [15] 丁明, 李生虎, 黄凯. 基于蒙特卡罗模拟的概率潮流计算 [J]. 电网技术, 2001, 25 (11): 10-15.
- D N G M ing, LI Sheng-hu, HUANG Kai Probabilistic Load Flow Analysis Based on Monte-carlo Simulation [J]. Power System Technology, 2001, 25 (11): 10-15.

收稿日期: 2006-03-13; 修回日期: 2006-04-06

作者简介:

彭昱 (1973 -), 女, 博士研究生, 主要从事电力系统电压稳定、优化的研究工作; E-mail: plyw@sina.com

孙辉 (1964 -), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析、稳定和电能质量的研究工作;

邹积岩 (1954 -) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统的统一质量管理体系、智能化开关电器理论及其应用。

Probabilistic assessment based on second order loss sensitivity for voltage stability

PENG Yu, ZHOU Wei, SUN Hui, ZOU Ji-yan

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Most approaches for voltage stability analysis in power system planning are based on the deterministic method. The application of probabilistic method for voltage stability analysis is introduced. A probabilistic method based on a combination of Monte Carlo method and the second order loss sensitivity index for PoC determination method is developed and thereby two probabilistic indices are presented, such as the voltage collapse probabilistic index and the load level expectation at PoC. Case study of probabilistic assessment for the stressed AEP30-bus system is carried out to illustrate the proposed probabilistic method, and especially to analyze the effects of load stochastic nature on load level of PoC, transmission contingency analysis and corresponding strategies for reducing voltage collapse probability.

Key words: PoC (point of voltage collapse); the second order loss sensitivity index; Monte Carlo method; probabilistic assessment

(上接第 8 页 continued from page 8)

Abstract: The proposed method can send the sample value of opposite side once in every sample period, the sample value will be synchronized using method of inserting data, so the special process of synchronizing is not necessary. This paper analyses the error caused by the method of inserting data, and introduces the advantage and disadvantage of the scheme. For the sampling speed of 24 point per period, the sample value error is smaller than 0.9%, amplitude error, 1.0% and for phase error, is 1.1°. The linear interpolation method has appropriate precision for most basic frequency quantity based protection devices, but it is not adapted to those protection principles which need harmonic quantity as well as basic frequency quantity. In the future, when the line is equipped with electronic transformers, this method will show its usability and value more obviously.

Key words: fiber communication; differential protection; data synchronization; interpolation; error; electronic transformers