

考虑支路随机断线的概率潮流方法及应用

董雷, 程卫东, 杨以涵

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 采用交流概率潮流方法, 综合考虑负荷的随机波动、发电机的随机停运以及支路的随机故障对系统潮流的影响, 并应用于系统的静态安全分析。为提高计算效率, 采用线性化的潮流方程, 并利用潮流计算中的灵敏度矩阵, 在网络的相应节点上引入随机补偿功率来模拟支路的随机开断, 结合半不变量和 Gram-Charlier 级数展开的方法来求取各节点电压和各支路潮流的概率分布, 避免了复杂的卷积运算。同时采用故障排序技术, 根据预想事故严重程度的顺序对各支路进行随机开断分析, 减少了计算量。分别采用 IEEE30 节点系统和 IEEE118 节点系统进行概率潮流分析, 得到系统静态安全评估的概率指标, 并与蒙特卡罗法进行比较, 验证了该方法的快速性和准确性。

关键词: 概率潮流; 支路随机故障; 半不变量; Gram-Charlier 级数展开

Probabilistic load flow method with consideration of random branch outages and its application

DONG Lei, CHENG Wei-dong, YANG Yi-han

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: An AC probabilistic load flow analysis considering the fluctuation of loads, the unscheduled unit outages and random branch outages is proposed. And then it is applied to analyze the power system's static state security. Linear load flow model is used and the random branch outages are simulated as the probabilistic compensation power at the relative nodes by using the sensitivity matrix, then a method combining Cumulants with Gram-Charlier Series expansion is applied to obtain the probabilistic distribution of nodal voltages and line flows, which avoids the complex convolution calculation. Simultaneously, this paper adopts the technology of contingency sequencing to analyze the random outages of each branch according to the severity order of contingency, which reduces the calculation amount. Applying this method into probabilistic load flow analysis of the IEEE30 test system and IEEE118 test system, the probabilistic indices of static state security is obtained. The comparison results with Monte Carlo simulation verify the accuracy and higher speed of the proposed method.

Key words: probabilistic load flow; random branch outages; cumulants; Gram-Charlier series expansion

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0079-06

0 引言

概率潮流反映了电力系统中各种因素的随机变化对系统运行的影响, 它能综合考虑电力系统网络拓扑结构、元件的参数、节点负荷、发电机出力等变量变化的不确定情况, 并通过一些概率性指标来衡量这些随机因素对系统的影响大小, 如线路潮流大于其热稳定的概率, 节点电压超出稳定运行约束范围的概率等。这些指标对系统的运行和规划^[1]具有重要的作用。

为了简化计算, 很多概率潮流模型都假设网络结构保持不变^[2-3], 它忽略了网络元件停运的概率。然而在实际运行中, 网络元件经常会出现故障, 从而导致网络结构发生变化。因此, 这种假设就限制

了概率潮流方法的应用。

目前, 文献[4-5]对相应问题进行了研究。文献[4]考虑了网络结构的不确定性对潮流结果的影响。但它采用了直流模型, 不能分析系统运行时的电压信息。文献[5]用补偿法求得虚拟注入功率, 用 Von Mises 提出的方法由各阶矩求离散分布, 并与连续分布卷积得到电压和支路功率的分布函数, 计算较为复杂。

本文采用结合累积量和 Gram-charlier 级数展开的概率潮流方法^[2], 并考虑了支路随机停运的影响, 较于文献[5]而言, 避免了复杂的卷积运算。其中采用潮流计算中的灵敏度矩阵进行快速断线分析, 同时为了减少工作量, 采用故障排序方法, 避免对所有线路进行随机开断校验。

本文对IEEE30节点系统和IEEE118节点系统进行仿真分析,得到了各节点电压和各支路潮流的概率分布,用以分析节点的过电压指标和支路的过负荷指标,并应用于分析系统的静态安全^[6-8]。另外,通过与蒙特卡罗法的结果比较,验证了本文方法的快速性与准确性。

1 数学模型

1.1 线性化的交流潮流模型

概率潮流计算模型的功率方程矩阵形式:

$$\begin{cases} W = f(X, Y) \\ Z = g(X, Y) \end{cases} \quad (1)$$

式中: W 为节点有功、无功注入功率变量; f 为功率方程; X 为节点电压、相角组成的状态变量; Y 为网络参数; Z 为支路潮流随机变量; g 表示支路潮流方程。

将式(1)在基准运行点处利用泰勒级数展开并忽略二次以上的高次项,可得到:

$$\begin{cases} \Delta X = \mathbf{J}_0^{-1} \cdot \Delta W = \mathbf{S}_0 \cdot \Delta W \\ \Delta Z = \mathbf{G}_0 \cdot \mathbf{J}_0^{-1} \cdot \Delta W = \mathbf{T}_0 \cdot \Delta W \end{cases} \quad (2)$$

式中: ΔX 为对应于随机扰动 ΔW 的随机响应; \mathbf{J}_0 为潮流计算最后一次迭代的雅可比矩阵; \mathbf{S}_0 为灵敏度矩阵, $\mathbf{S}_0 = [f'_x(X_0, Y_0)]^{-1}$; $\mathbf{G}_0 = [g'_x(X_0, Y_0)]$ 。

1.2 基于灵敏度分析的随机补偿功率的计算

为了快速地进行断线分析计算,本文采用潮流计算中的灵敏度矩阵,在网络的相应节点上引入随机补偿功率来模拟支路的随机开断。

当系统的网络发生变化 ΔY , 则状态变量也会出现变化 ΔX , 将式(1)在基准运行点处利用泰勒级数展开,得到:

$$\begin{aligned} \Delta W = & f'_x(X_0, Y_0) \cdot \Delta X + f'_y(X_0, Y_0) \cdot \Delta Y + \\ & \frac{1}{2} [f''_{xx}(X_0, Y_0) \cdot (\Delta X)^2 + 2f''_{xy}(X_0, Y_0) \cdot \\ & \Delta Y \cdot \Delta X + f''_{yy}(X_0, Y_0) \cdot (\Delta Y)^2] + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

忽略 $(\Delta X)^2$ 项及高次项,又由于 $f(X, Y)$ 是 Y 的线性函数,故 $f''_{yy}(X_0, Y_0) \cdot (\Delta Y)^2 = 0$, 当不考虑节点注入功率变化时, $\Delta W = 0$, 化简可得到:

$$\begin{aligned} \Delta X = & [f'_x(X_0, Y_0) + f''_{xy}(X_0, Y_0) \cdot \Delta Y]^{-1} [-f'_y(X_0, Y_0) \cdot \Delta Y] = \\ & \mathbf{S}_0 [\mathbf{I} + f''_{xy}(X_0, Y_0) \cdot \Delta Y \cdot \mathbf{S}_0]^{-1} [-f'_y(X_0, Y_0) \cdot \Delta Y] = \\ & \mathbf{S}_0 \Delta W_y \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵; ΔW_y 是由于断线而引起的节点

注入功率的扰动。

本文仅考虑单条线路开断的情况。假设开断的支路两端的节点为 i 和 j , 通过推导并最终写成矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \begin{bmatrix} P_{ij} \\ Q_{ij} \\ P_{ji} \\ Q_{ji} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{I}_{4 \times 4} + \begin{bmatrix} -H_{ij} & 2P_{ij} - N_{ij} & H_{ij} & N_{ij} \\ -J_{ij} & 2Q_{ij} - L_{ij} & J_{ij} & L_{ij} \\ H_{ji} & N_{ji} & -H_{ji} & 2P_{ji} - N_{ji} \\ J_{ji} & L_{ji} & -J_{ji} & 2Q_{ji} - L_{ji} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_{ii}^{(1)} & S_{ii}^{(2)} & S_{ij}^{(1)} & S_{ij}^{(2)} \\ S_{ii}^{(3)} & S_{ii}^{(4)} & S_{ij}^{(3)} & S_{ij}^{(4)} \\ S_{ji}^{(1)} & S_{ji}^{(2)} & S_{jj}^{(1)} & S_{jj}^{(2)} \\ S_{ji}^{(3)} & S_{ji}^{(4)} & S_{jj}^{(3)} & S_{jj}^{(4)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $S_{ii}^{(1)}, S_{ii}^{(2)}, S_{ii}^{(3)}, S_{ii}^{(4)}, \dots$ 为灵敏度矩阵中行和列都与断线端点相关的元素; $H_{ij}, N_{ij}, J_{ij}, L_{ij}, \dots$ 为雅可比矩阵中的相应元素; $\Delta P_i, \Delta Q_i, \Delta P_j, \Delta Q_j$ 分别为断开线路 i, j 时形成的补偿功率。

当支路发生随机断线时,可将其看成支路两端节点的随机补偿功率的 0-1 分布。这样,支路的随机断线就可转化成为节点注入功率的扰动来处理。

1.3 半不变量和 Gram-charlier 级数展开

本文的概率潮流计算采用结合半不变量和 Gram-charlier 级数展开的方法^[2-3], 可将求取几个随机变量和的概率密度函数时的卷积和反卷积的计算简化为几个半不变量的代数运算,从而减少计算量。同时,利用 Gram-charlier 级数展开,经过一次计算就可以得到所求状态变量的概率密度函数 (Probabilistic Density Function, PDF) 和累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF), 与传统的蒙特卡罗法相比,它缩短了计算时间。

2 电力系统静态安全问题的概率分析

2.1 概述

传统的静态安全分析方法能给出具体运行方式下的静态安全指标。但由于电力系统的运行方式总是受到负荷的频繁变化和发电机停运等随机因素的干扰,系统在不同时刻的运行点往往不同。而对所有运行方式下的系统做静态安全分析,工作量将会很大。本文以概率潮流方法为工具,综合考虑发电机随机停运和负荷的不确定性,对电力系统在预想

故障下的状态做概率性评估,得到系统支路潮流的过负荷和节点电压越限的概率指标。

2.2 预想事故自动选择

由于电力网络中有一些线路在开断后并不引起系统过负荷,则我们可以根据各线路开断后引起系统过负荷的可能性进行故障排序,然后按照顺序依次对过负荷可能性较大的线路进行随机开断分析,当校验到某条线路的开断所引起的过负荷概率为零时,则排在后面的线路就可以不再进行校验分析,从而减少计算量。

为了表征各种开断情况下支路潮流违限的严重程度,可采用有功功率行为指标来衡量,即:

$$PI = \sum_{l=1}^L a_l \omega_l \left(\frac{P_l}{P_l^{\text{lim}}} \right)^2 \quad (7)$$

式中: P_l 为线路 l 的有功潮流; P_l^{lim} 为线路 l 的传输容量; a_l 为支路 l 中的并联线路数; ω_l 为线路 l 的权系数,反映该线路故障对系统的影响; L 为网络支路数。

2.3 计算过程

本文计算的假设条件为:有功负荷服从正态分布,而无功负荷可由有功负荷结合相应的功率因数得到,也服从正态分布,且忽略不同节点间注入功率的相关性;发电机的出力服从(0-1)分布。在此基础上采用交流概率潮流方法对电力系统在预想随机事故下的状态做概率性评估。计算步骤如下:

(1) 输入原始数据(包括常规潮流计算的相关数据,正态和离散负荷的分布情况,发电机出力及强迫停运率,以及支路的故障信息)。

(2) 在基准运行点下用牛顿拉夫逊法进行确定性潮流计算,求出节点电压和支路潮流的期望值、以及矩阵 S_0 和 T_0 。

(3) 结合步骤(2)中的潮流计算结果,由式(7)计算得出过负荷行为指标,并进行排序,得到预想事故一览表。

(4) 根据发电机输出功率及负荷功率的概率分布分别求出它们的各阶半不变量。

(5) 根据事故一览表,依次对各线路进行随机开断,由式(5)计算断线支路两端的随机补偿功率。按照(0-1)分布的特点计算其各阶半不变量。

(6) 将各节点负荷功率半不变量、发电机功率半不变量以及随机补偿功率的半不变量相加,得到注入功率的各阶半不变量。由式(2)求出节点电压和支路潮流的各阶半不变量。

(7) 用Gram-charlier级数展开得到节点电压和支路潮流的概率密度函数 $f(x)$ 和累积分布函数

$F(x)$ 。

$$f(x) = \phi(x) + \frac{c_1}{1!} \phi'(x) + \frac{c_2}{2!} \phi''(x) + \frac{c_3}{3!} \phi^{(3)}(x) + \dots \quad (8)$$

$$F(x) = \Phi(x) + \frac{c_1}{1!} \phi'(x) + \frac{c_2}{2!} \phi''(x) + \frac{c_3}{3!} \phi^{(3)}(x) + \dots \quad (9)$$

式中: $\phi(x)$ 和 $\Phi(x)$ 分别为标准正态分布随机变量的PDF和CDF;系数 c_r 可由中心矩求出。

(8) 检验系统的过载概率及过电压概率是否为零,若是,则计算结束(为避免预想事故选择算法中的遮蔽现象,可连续校验其下两条线路,若都未引起系统过负荷的情况才终止分析);否则转入步骤(5)对预想事故一览表中的下一条支路进行随机开断分析。

3 算例分析

本文分别以IEEE30节点系统和IEEE118节点系统为例,通过Matlab7.1编制程序进行分析。文中考虑了单条支路的随机故障(不考虑导致系统解裂的支路故障)。假设所有支路的故障率都为0.2%。

3.1 IEEE30节点系统

3.1.1 故障排序结果

根据式(7)计算PI值,并从大到小进行排序,得到表1。表中仅给出排在前面的部分支路。

表1 预想事故一览表

序号	支路两端的节点号	序号	支路两端的节点号
1	27-28	5	6-28
2	6-8	6	9-10
3	10-21	7	4-6
4	4-12	8	6-9

3.1.2 支路的随机故障对系统的影响

如表1所示,支路27-28在开断时,出现过负荷或电压违限的程度最严重,现对其做随机开断分析,并将其结果与网络结构保持不变情形下的结果做比较。

图1给出了考虑支路随机故障和网络结构不变时的电压幅值CDF曲线。在这两种不同的假设条件下,节点27的电压分布曲线发生较大变化,其电压越下限概率由表2给出。

图2为考虑支路随机故障前后的支路有功CDF曲线。结果显示,支路的随机故障会导致其他支路的过载概率增加,具体情况如表3所示。

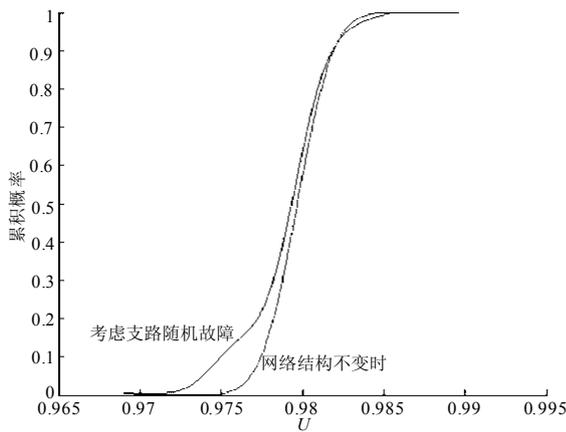


图1 节点27的电压幅值 CDF 曲线比较
Fig.1 CDF comparison of the voltage at node 27

表2 节点电压的越限概率
Tab.2 The probability of overvoltage

节点号	越限概率/% (网络结构不变时)	越限概率/% (考虑支路随机故障)
25	0	0.76
27	0	1.37
29	0	0.56
30	1.18	2.49

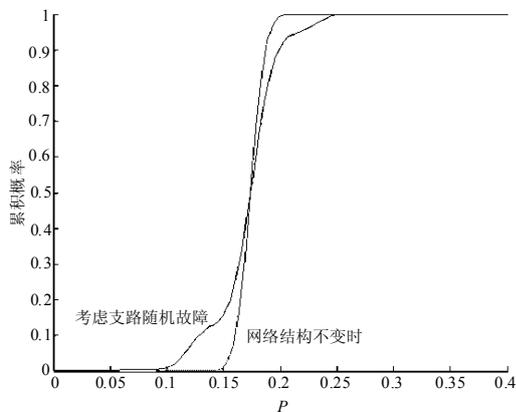


图2 支路6-28的有功功率 CDF 曲线比较
Fig.2 CDF comparison of active power flow of line 6-28

表3 支路有功功率的过载概率
Tab.3 The probability of line's active power flow violating its thermal limit

支路	过载概率/% (网络结构不变时)	过载概率/% (考虑支路随机故障)
6-28	0	9.80
4-12	0	1.85

3.1.3 与蒙特卡罗法的比较结果

为了显示本文方法的准确性，将其结果与蒙特

卡罗法 (Monte Carlo Simulation, MCS) 进行比较 (蒙特卡罗的抽样次数为5 000次), 并采用方差和的根均值 (Average Root Mean Square, ARMS) [2] 来衡量本文方法与蒙特卡罗法的偏差。

图3和图4分别为考虑支路随机故障前后的节点电压幅值CDF曲线和支路有功的CDF曲线。图中给出了本文方法和蒙特卡罗法的比较结果。

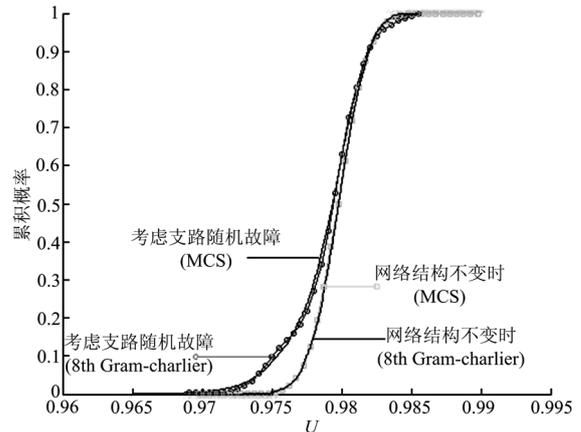


图3 节点27的电压幅值 CDF 曲线比较
Fig.3 CDF comparison of the voltage at node 27

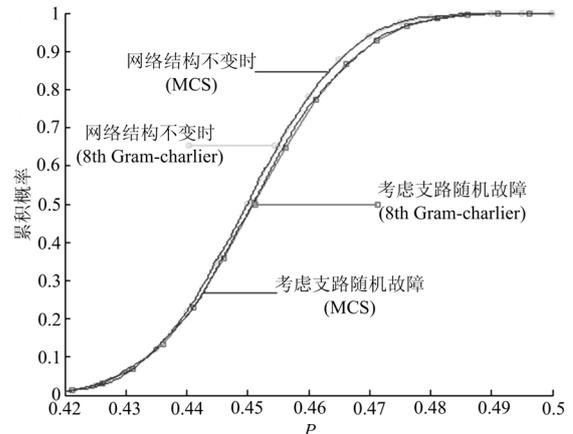


图4 支路4-12的有功功率 CDF 曲线比较
Fig.4 CDF comparison of active power flow of line 4-12

由于本文采用 Gram-charlier 级数对状态变量进行展开, Gram-charlier 级数的阶数对结果也有一定影响。图5显示了不同阶数的 Gram-charlier 级数对概率潮流结果的影响。表4为计算时间和偏差的比较。

从表4可以看出, 采用的Gram-charlier级数的展开项越多, 偏差值越小。当采用8阶展开项时, 就可将偏差降低到工程问题可接受的范围内, 且其计算时间远小于MCS。图3~5以及表4都显示了本文方法与蒙特卡罗法的结果几乎吻合, 说明本文将支路的随机故障等效成为支路两端节点的随机补偿

功率的0-1分布, 并采用结合累积量和Gram-charlier级数展开的方法是快速有效的。

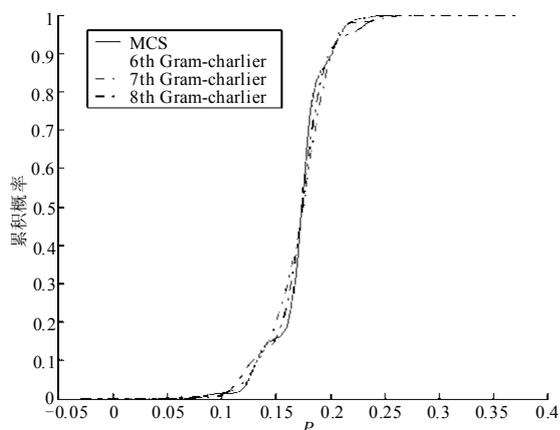


图5 采用不同阶数的 Gram-charlier 展开级数得到的支路6-28的有功 CDF 曲线

Fig.5 CDF of line 6-28 obtained by using different order of Gram-charlier expansion

表4 计算时间和偏差的比较

Tab.4 Comparison of computation time and ARMS

方法	计算时间/s	ARMS/%
MCS (5 000 次)	143.172 0	0
6 th Gram charlier expansion	0.641 0	1.354
7 th Gram charlier expansion	1.257 0	0.643
8 th Gram charlier expansion	1.411 0	0.361

另外, 根据预想事故一览表, 依次接着对支路进行随机开断分析, 比较节点电压和支路有功功率的变化, 发现当支路29-30随机开断时, 系统未出现节点过电压或者支路过载的情况, 且未出现遮蔽现象。因此, 排在其后面的12条支路就无需进行随机开断分析, 这样, 减少了29.27%的工作量, 提高了工作效率。

3.2 IEEE 118 节点系统

该系统有节点 118 个, 支路 179 条。通过故障排序, 并按照预想事故一览表依次对各支路进行随机开断, 以概率潮流为工具对系统进行分析并发现潜在的问题, 并进一步校验本文方法的快速性和准确性。

假设节点电压的合格范围为 (0.95~1.05) pu, 则当引起线路过负荷和过电压现象最严重的37-38支路随机开断时, 节点38有17.8%的概率大于1.05 pu, 而节点53, 76以及118分别有40.5%, 38.1%和35.3%的概率小于0.95 pu。它们的越限概率较大, 可考虑采用适当的补偿措施以保证系统维持在正常的电压水平下。

图6和图7分别为考虑37-38支路的随机开断时, 35节点的电压幅值CDF曲线以及38-65支路的有功功率CDF曲线, 两图均给出了本文方法和MCS的比较结果。另外, 计算结果表明, MCS (抽样次数为5 000次)的耗时是本文方法的上百倍, 大大体现出本文方法的速度优势。

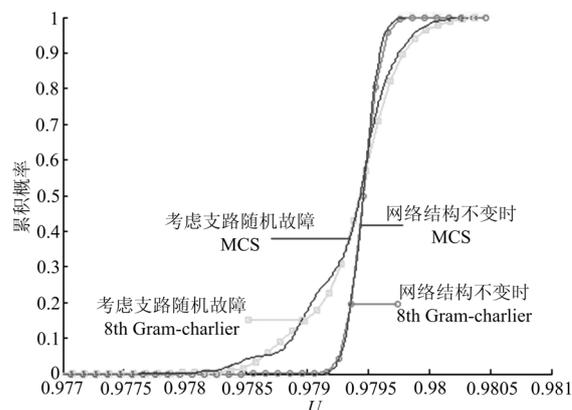


图6 节点35的电压幅值 CDF 曲线比较

Fig.6 CDF comparison of the voltage at node 35

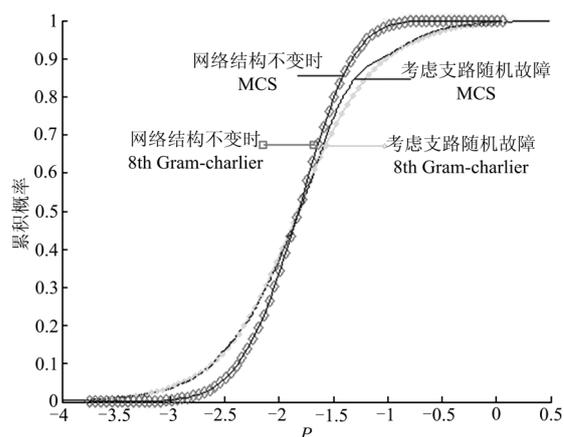


图7 支路38-65的有功功率 CDF 曲线比较

Fig.7 CDF comparison of active power flow of line 38-65

由于本文计算是基于灵敏度算法的, 其优点是 H 矩阵中的所有元素都可通过正常潮流得到, 无需重新计算, 计算速度快, 但当注入功率扰动过大时, 会增大计算误差。为证实算法的有效性, 本文分别采用灵敏度算法和线路开断情况下的牛顿-拉夫逊法进行计算, 对最大运行方式下的系统做 $N-1$ 及 $N-2$ 开断分析, 得到最大线路功率和节点电压误差。如表5所示。

通过对出现扰动情况最为明显的支路做单线开断和双线开断分析, 从比较结果来看, 对于大系统而言, 本文的方法是合理的。

表5 N-1开断及N-2开断综合指标

Tab.5 Comprehensive index of N-1 and N-2 outages

开断 支路号	电压最大误 差(标么值)	最大线路无功误 差(标么值)	最大线路有功误 差(标么值)
89-90	0.005 79	0.004 32	0.004 68
5-8, 76-77	0.006 89	0.009 70	0.005 89

同时,对其他一些小系统进行仿真,结果显示:当线路N-2开断后,特别是当系统规模较小、开断后电网结构不完整(解列或者负荷孤立)、机组无功裕度有限、受电网结构影响较大时,用灵敏度算法得到的误差较修改导纳阵后的常规潮流有所降低,这时可由补偿法进行求解。

4 结论

本文考虑支路随机断线的交流概率潮流,采用了灵敏度算法来计算随机补偿功率,同时运用半不变量法对连续变量以及离散变量进行计算,提高了计算速度,避免了复杂的卷积计算。

IEEE30 节点系统和 IEEE118 节点系统的仿真结果表明,支路的随机断线对系统运行工况有显著的影响,它可导致系统的节点过电压和支路过负荷的概率大大增加。本文以考虑支路随机故障的交流概率潮流方法为工具,同时结合故障排序方法,对系统的静态安全问题进行分析,得到量化的概率性指标,从而能更好地发现系统的潜在问题。

参考文献

[1] Leite da silva A M, Ribeiro S M P, Arienti V L, et al. Probabilistic load flow techniques applied to power system expansion planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5 (4): 1047-1052.

[2] Zhang Pei, Lee S T. Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and gram-charlier expansion[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19 (1) : 676-682.

[3] 王成山, 郑海峰, 谢莹华, 等. 计及分布式发电的配电系统概率潮流计算[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.

[4] DONG Lei, ZHANG Chuan-cheng, ZHANG Pei. Improvement of probabilistic load flow to consider network configuration uncertainties[C]. //Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2009.

[5] 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): 27-33.

HU Ze-chun, WANG Xi-fan, ZHANG Xian, et al. Probabilistic load flow method considering branch outages[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (24): 27-33.

[6] 周双喜, 姜勇, 朱凌志. 电力系统电压静态稳定性指标评述[J]. 电网技术, 2001, 25 (1): 1-7.

ZHOU Shuang-xi, JIANG Yong, ZHU Ling-zhi. Review on steady state voltage stability indices of power systems[J]. Power System Technology, 2001, 25 (1): 1-7.

[7] 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, DING Ming, WANG Xing-qiang. Probabilistic evaluation to static voltage security of power systems[J]. Automation of Electric Power Ssystems, 2003, 27 (20): 26-30.

[8] 陈得治, 张伯明, 吴文传, 等. 静态电压稳定分析的故障筛选和排序方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (14): 16-20.

CHEN De-zhi, ZHANG Bo-ming, WU Wen-chuan, et al. A contingency screening and ranking method for voltage stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (14): 16-20.

收稿日期: 2009-11-03; 修回日期: 2010-01-15

作者简介:

董雷 (1967-), 女, 博士研究生, 副教授, 研究方向为电力系统分析、运行与控制;

程卫东 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: chengweidong543@126.com

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制。