

基于蒙特卡罗仿真和非线性规划技术的输电系统充裕度评估

周欣, 刘明波, 谢敏

(华南理工大学电力学院, 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 采用非序贯 Monte Carlo 仿真法抽取输电系统的故障状态, 并采用连接矩阵存储和广度优先搜索技术实现网络拓扑分析, 从而高效解决了多重故障识别和孤岛处理问题, 并节省了状态抽取的时间。同时建立了最优负荷削减非线性规划模型, 用非线性原对偶内点法求解。利用故障状态抽样概率和最优负荷削减量加权的方法对严重故障状态进行筛选和排序, 找出系统运行风险和薄弱环节。IEEE-RTS 实例的评估结果证明了所提算法的正确性和有效性。

关键词: 充裕度评估; 蒙特卡罗仿真; 最优负荷削减; 广度优先搜索; 非线性规划

Adequacy evaluation of transmission systems using Monte Carlo simulation and nonlinear programming technology

ZHOU Xin, LIU Ming-bo, XIE Min

(Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The non-sequential Monte Carlo simulation algorithm is applied to sample failure states of transmission systems, and network topology analysis is realized by means of the storage based on connection matrix and breadth first search techniques so that multiple failures and islanding are identified efficiently and sampling time of failure states is reduced. Also an optimal load shedding non-linear programming model is established which is solved by primal-dual interior point algorithm. Furthermore, the severe failure states are filtered and sorted through weighting the sampling probability of failure states and optimal load shedding quantity to find out operational risks and weaknesses of transmission systems. The correctness and effectiveness of the proposed method have been verified on IEEE-RTS system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50777021 and No.50907023).

Key words: adequacy evaluation; Monte Carlo simulation; optimal load shedding; breadth first search; nonlinear programming

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0045-06

0 引言

输电系统的充裕度评估是分析稳态情况下系统满足用户电力需求的能力, 其任务是: 在考虑电源到负荷之间各种设备的实际运行条件和约束下, 对系统的可靠性进行定量评估; 其目的是: 为电力系统的规划和运行提供决策依据, 使电力系统能够连续且经济地保证电能质量的供应电力^[1-4]。

输电系统的充裕度评估由三个部分组成: 状态选择、状态分析、可靠性指标计算。对于系统状态的选择一般采用两种方法: 解析法^[5-6]和 Monte Carlo 仿真法^[7-11]。解析法包括网络法、状态枚举法、故

障树方法等, 它适用于结构简单的小型电力系统; 而 Monte Carlo 仿真法分为非序贯模拟和序贯模拟两种^[9-10], 适用于大型电力系统。

系统状态分析的两个最主要的步骤是潮流计算和最优负荷削减计算^[12]。选取不同的潮流计算方式, 就会有相应的削减负荷优化调整方法, 所以一般分为基于直流潮流的线性规划模型^[13-14]和基于交流潮流的非线性规划模型两种^[15]。文献[13]采用了不同的目标函数, 得到了多种负荷削减策略, 但由于它完全忽略无功潮流和节点电压的约束, 存在较大的模型误差; 文献[14]将有功发电再调度和无功电压校正转化成两个线性规划来解; 文献[15]同时建立了最优负荷削减的线性规划模型, 并对二者进行了对比, 并建议采用非线性规划最优负

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50777021, 50907023)

荷削减模型，它的评估方法是和状态枚举法相结合的，不适应于大型电力系统的评估。

在上述研究的基础上，本文采用了非序贯 Monte Carlo 仿真法对输电线路进行抽样，从而选取系统故障状态，并对筛选出的严重故障模式进行分析；采用交流潮流模型对线路过负荷和电压越限情况进行分析；采用连接矩阵存储系统当前状态结构参数和采用广度优先搜索法进行网络拓扑分析^[16-17]；同时提出了更加完备的输电系统可靠性评估的最优负荷削减非线性规划模型，进行有功无功的综合调整，使调整策略更符合实际情况。并通过 IEEE-RTS^[18]实例计算验证所提方法的有效性。

1 系统状态模拟模型

本文采用非序贯蒙特卡罗方法选取系统故障状态，非序贯蒙特卡罗方法常常又被称为状态抽样法^[2,10]，它的依据是，一个系统状态是所有元件状态的组合，且每一元件状态可由对元件出现在该状态的概率进行抽样而决定。

所以每一元件可用一个在 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数来模拟。设元件 i 为两状态元件，其正常工作的概率为 p_i ，发生故障的概率为 q_i ，其中 $p_i=1-q_i$ 。在计算机上产生服从 $[0,1]$ 区间均匀分布的随机数，如果在一次抽样中随机数 u_i 满足 $u_i > q_i$ ，那么在这次模拟试验中元件 i 正常工作，用 $s_i=0$ 表示，否则元件 i 发生故障，用 $s_i=1$ 表示。对于一个有 m 条输电线路的系统，抽取 m 个随机数 u_1, u_2, \dots, u_m ，则能确定一个系统状态 $S_k=(s_1, s_2, \dots, s_k, \dots, s_m)$ ，重复上述过程 N 次，则能得到一个包含 N 个系统状态样本的集合 $S_{\text{All}}=(S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_N)$ 。应该注意的是，样本不具有唯一性，可能存在多个重复的系统状态。

一个系统状态在抽样中进行选定后，则需要进行分析以判断是否为失效状态，如果是，则对系统风险指标进行修正。

状态抽样法的可靠性指标统一计算公式为^[2]：

$$E(F) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_f(S_i) F(S_i) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中： $F(S_i)$ 是以 S_i 作为自变量的可靠性指标测试函数， $F(S_i)$ 取不同测试函数时， $E(F)$ 代表不同的可靠性指标； I_f 是以 S_i 作为自变量的二值函数，如果 S_i 是故障系统状态，则取1；反之则取0。 N 为抽样次数。

通常用反映计算精度的方差系数 β 作为收敛判据：

$$\beta = \frac{\sqrt{V[\bar{E}(F)]}}{\bar{E}(F)} = \frac{\sqrt{V(F)/N}}{\hat{E}(F)} \quad (2)$$

式中： $V[\bar{E}(F)]$ 、 $V(F)$ 分别表示随机变量 $\bar{E}(F)$ 和 $F(S)$ 方差。

当由式(2)计算所得指标的方差系数达到收敛条件后，系统失效状态的抽样频率可作为其概率的无偏估计，如式(3)：

$$P(S_{\text{All}}) = \frac{m(S_{\text{All}})}{N} \quad (3)$$

式中： $m(S_{\text{All}})$ 是在抽样状态 S_{All} 中故障状态出现的次数； N 是抽样次数。得到系统的失效概率后，即可推出系统失效频率、失效平均持续时间及系统其他可靠性指标，其计算方法将在2.3小节详述。

2 系统状态评估模型和可靠性指标

2.1 网络拓扑分析和孤岛处理

基于非序贯 Monte Carlo 抽样的输电系统可靠性评估，由于不限制抽样产生的故障状态的重数，状态选择时有可能会出现多条线路停运的情况，有时甚至会导致系统解列，形成孤岛。因此在潮流计算前，应该对网络进行拓扑分析，并提出系统解列的处理措施。

网络拓扑分析的任务是在系统发生故障后，判断系统的连通性，对各个子网络拓扑重构，按块形成电气参数。

本文采用存储连接矩阵的方法存储电气结构参数^[16]。连接矩阵是 $N_{\text{BUS}} \times N_{\text{BUS}}$ 阶次的方阵， N_{BUS} 是节点个数，其中的元素为0或1，当两节点间有线路直接相连时，对应元素是1，无连接时为0，对角元素为0。采用对原始连接矩阵进行修改的方法记录故障线路，即如果某条线路故障了，则将原始连接矩阵对应的元素置零，修改后的连接矩阵就对应当前的系统状态。

同时，利用存储的状态的连接矩阵判定是否属于抽样到的重复状态，如果出现重复状态时，就不需要进行相应的状态分析。

本文应用广度优先搜索算法判断当前系统状态的连通性，其算法描述为：从图中某个顶点 v 出发，访问与此顶点相邻接的其他顶点 w_1, w_2, \dots, w_k ，然后再依次访问与 w_1, w_2, \dots, w_k 相邻接的未被访问的其他顶点，直至图中所有和 v 有路径相通的点被

访问到;若此时图中尚有顶点未被访问,则另选图中一个未曾访问的顶点作起点,重复上述过程,直到图中所有顶点都被访问到为止。

利用广度优先搜索算法^[17]对当前状态的连接矩阵进行搜索,如果是连通的,那么仅从系统中任一顶点出发,进行广度优先搜索,便可访问到系统中所有顶点;反之则是非连通的,便可搜索到各个子系统的节点集,从而形成各子系统的结构参数。

当电网分裂成多个孤岛时,需要对每个岛内的节点进行重新连续编号,并按新编号确定相应参数。系统解列后产生的孤岛要分四种情况处理:

(1) 如果该岛中仅含有负荷节点,而无发电机节点,那么不需要进行计算即可判定该岛的负荷将全部丢失。同时要记录该岛中总的负荷削减量。

(2) 如果该岛中仅仅含有发电机节点,而无负荷节点,则也不要进行潮流计算和最优削减负荷计算,并且总的削减负荷量为0。

(3) 如果该岛中既含有发电机节点,又含有负荷节点,但是平衡机不在此岛中,则需要在此岛中重新选出力最大的发电机作为新的平衡机,进行潮流计算,并根据是否满足运行约束来判断是否需要最优削减负荷计算。

(4) 如果该岛中既含有发电机节点,又含有负荷节点,平衡机也在此岛中,则就直接进行潮流计算,并也根据是否满足运行约束来判断是否需要最优削减负荷计算。

2.2 最优负荷削减模型

对于系统抽样到的故障状态,应用潮流计算对各个子系统进行分析,如果违背了运行约束,则需要应用最优负荷削减模型进行优化调整,对于这种故障状态可能产生两个结果,第一种通过调节机组出力可避免负荷削减的紧急状态,第二种是通过调节机组出力也无法避免负荷削减的故障状态。

为了更实际地反映电力系统运行中的实际调整策略,选择发电机有功和无功出力、负荷削减量、无功补偿装置出力、有载调压变压器变比做为控制变量,以系统总负荷削减量最小为目标,具体的最优负荷削减模型可描述如下:

$$\min \sum_i^{N_{LOAD}} \Delta P_{Li} \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j \neq i} P_{ij} = P_{Gi} - (P_{Li} - \Delta P_{Li}), i \in N_{BUS} \quad (5)$$

$$\sum_{j \neq i} Q_{ij} = Q_{Gi} - (Q_{Li} - \Delta Q_{Li}), i \in N_{BUS} \quad (6)$$

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \overline{V}_i, i \in N_{BUS} \quad (7)$$

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi}, i \in N_{GEN} \quad (8)$$

$$\underline{Q}_{Gi} \leq Q_{Gi} \leq \overline{Q}_{Gi}, i \in N_{GEN} \quad (9)$$

$$\underline{Q}_{Ci} \leq Q_{Ci} \leq \overline{Q}_{Ci}, i \in N_{VAR} \quad (10)$$

$$\underline{k}_i \leq k_i \leq \overline{k}_i, i \in N_{TRANS} \quad (11)$$

$$|P_{ij}| \leq \overline{P}_{ij}, ij \in N_{LINE} \quad (12)$$

$$0 \leq \Delta P_{Li} \leq P_{Li}, i \in N_{LOAD} \quad (13)$$

$$0 \leq \Delta Q_{Li} \leq Q_{Li}, i \in N_{LOAD} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta P_{Li}}{\Delta Q_{Li}} = \frac{P_{Li}}{Q_{Li}}, i \in N_{LOAD} \quad (15)$$

其中:式(5)~式(14)分别为节点有功功率平衡、节点无功功率平衡、节点电压、发电机有功出力、发电机无功出力、无功补偿装置出力、有载调压变压器变比、线路潮流、负荷节点切除有功负荷量约束和负荷节点切除无功负荷量的约束;式(15)为负荷功率因素约束,意思是保持负荷的功率因素为常量,即假定切除一定的有功负荷的同时,相应地切除一定的无功负荷。式中, N_{LOAD} 、 N_{BUS} 、 N_{GEN} 、 N_{TRANS} 、 N_{VAR} 、 N_{LINE} 分别代表负荷节点、节点、发电机、有载调压变压器、无功补偿装置和线路的数目。 ΔP_{Li} 、 ΔQ_{Li} 表述负荷有功和无功削减量。 P_{Li} 、 Q_{Li} 分别表示各个负荷的有功和无功功率;式(7)~式(14)不等式约束中的 \underline{u} 和 \overline{u} 分别表示物理量的上下限。

此最优负荷削减模型式(4)~式(15)属于一个典型的非线性规划问题,我们采用非线性原对偶内点算法^[19]进行求解。

2.3 可靠性指标

应用非序贯Monte Carlo方法,对系统多次抽样,对每次抽取的系统故障状态进行最优负荷削减计算,获得最小的负荷削减量,并统计系统与负荷削减量相关的可靠性指标,当方差系数满足一定的精度要求后,即停止计算。

充裕度指标分为节点指标和系统指标两类^[2,20-21],系统指标计算公式如下:

1) 切负荷概率 P_{LOLP} :

$$P_{LOLP} = \frac{N_f}{N} \quad (16)$$

式中: N 为总的抽样次数; N_f 为抽样中故障状态出现的次数。

2) 切负荷频率 F_{LOLP} (次/a):

$$F_{LOLP} = \frac{1}{N} \sum_{S_i \in f} \left(\sum_{k=1}^m \lambda_k \right) \quad (17)$$

式中: $S_i \in f$ 表示 S_i 是故障状态, λ_k 是以当前抽样

状态 S_i 时第 k 个元件工作状态的二值函数, 即当前状态下如果第 k 个元件在工作, 则 λ_k 取值为失效率; 如果第 k 个元件处于停运, 则 λ_k 取值为修复率。这里的切负荷频率是略去系统失效状态间转移频率的近似表达式。由于实际系统中, 正常状态和失效状态间的转移占据了支配地位, 所以这种近似是可以接受的。

1) 切负荷功率期望值 $EDNS$ (MW/a)

$$EDNS = \frac{1}{N} \sum_{S_i \in f} C(S_i) \quad (18)$$

式中, $C(S_i)$ 表示状态 S_i 时的负荷削减量。

2) 切负荷电量期望值 $EENS$ (MWh/a)

$$EDNS = \frac{1}{N} \sum_{S_i \in f} C(S_i) \times 8760 \quad (19)$$

3) 切负荷平均持续时间 D_{LOLP} (h/次)

$$D_{LOLP} = \frac{P_{LOLP}}{F_{LOLP}} \quad (20)$$

2.4 算法流程

综上所述, 充裕度指标计算流程如图 1 所示。

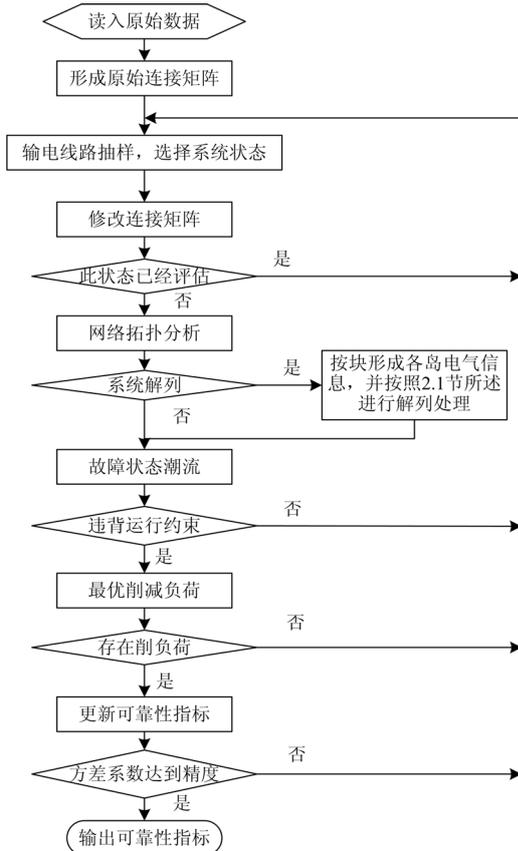


图 1 输电系统充裕度评估算法流程

Fig.1 Flow chart of adequacy evaluation of transmission systems

3 算例分析

采用IEEE-RTS系统作为试验系统验证所提算法的有效性。该系统总装机容量3 405 MW, 最大负荷为2 850 MW, 包含24个节点, 其中有17个负荷节点、34条支路、32台发电机机组和1台同步调相机, 其系统结构图、电气参数和线路可靠性参数详见文献[18]。

为了运用所提方法对IEEE-RTS进行输电系统充裕度评估, 对此测试系统附加一些计算条件, 它们是: 母线负荷采用年度最大峰荷值, 并假定各个母线上的发电机都在正常工作; 对于最优负荷削减模型中母线电压的上下限分别按1.06 pu和0.94 pu给定, 发电机有功出力上限按额定出力的1.2倍给定, 变压器的变比上下限按额定变比的1.1 pu和0.9 pu给定。对于母线14上的同步调相机的无功出力上下限2 pu和-0.5 pu给定。

表1列出了对输电系统采用非序贯蒙特卡罗方法的抽样, 并取EDNS的方差系数 β 为10%、5%、3%的三个收敛精度时, 系统状态模拟的结果。

表1 状态模拟结果

Tab.1 Results of state simulation

| 故障重数 | $\beta = 10\%$ | | $\beta = 5\%$ | | $\beta = 3\%$ | |
|----------|----------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| | 状态数 | 概率/% | 状态数 | 概率/% | 状态数 | 概率/% |
| 0 | 76 537 | 97.718 | 321 742 | 97.676 | 875 911 | 97.677 |
| 1 | 1 765 | 2.254 | 7 571 | 2.298 | 20 592 | 2.296 |
| 2 | 21 | 0.026 | 81 | 0.025 | 227 | 0.025 |
| 3 | 1 | 0.002 | 2 | 0.001 | 4 | 0.002 |
| ≥ 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 总计 | 78 324 | 100.0 | 329 396 | 100.0 | 896 734 | 100.0 |

从表1可见, 随着模拟精度的提高, 模拟状态数将急剧增加, 但是无论在哪个精度要求下, 抽样所得到的状态大部分都是正常状态, 占97%以上, 对于IEEE-RTS测试系统这个可靠性较高的系统来说, 这个结果是可信的。一重故障在所有故障中占有很大比重, 这就是现行系统规划时一般只校验N-1故障的原因。而多重故障(二重及二重以上)的概率为0.028%, 属于极小概率事件, 但是小概率事件也应引起重视, 因为它的重数高, 一旦发生将会对电力系统造成极大破坏, 所以对于筛选出的严重多重故障模式, 要采取相应措施消除安全隐患。

表2给出了用于IEEE-RTS的输电系统充裕度评

估的状态分析数和计算时间。

表2 状态分析数和计算时间

Tab.2 Number of state analysis and computational time

| | $\beta = 10\%$ | $\beta = 5\%$ | $\beta = 3\%$ |
|---------|----------------|---------------|---------------|
| 模拟总状态数 | 78 324 | 329 396 | 896 734 |
| 实际评估状态数 | 57 | 108 | 197 |
| 切负荷状态数 | 100 | 415 | 1 133 |
| 计算时间/s | 14.859 | 52.813 | 141.125 |

本文算法中采用了对连接矩阵修改和存储的方法,对已经评估状态进行存储和判断,避免了对已评估状态进行重复计算,从表2可以看出,对于EDNS的方差系数 β 为10%、5%和3%的三个计算精度,实际进行评估的状态数仅分别占抽样总数的0.0728%、0.0328%、0.0220%,实际切负荷状态数分别是实际计算评估状态数的175.2%、384.3%、575.1%,这样大大减少了状态分析的次数。与文献[10]中的结果比较,对于EDNS的方差系数在 $\beta = 5\%$ 和 $\beta = 3\%$ 计算精度,本文方法的计算时间分别是文献[10]中方法的53.6%和47%,从而节省了状态抽取时间。

表3和4给出了对IEEE-RTS的输电系统充裕度年度指标和文献[10]用状态抽样法对IEEE-RTS的完整输电系统充裕度评估结果,表4只列出了对应方差系数为 β 为5%和3%时的结果。从表3和4的对比可以看出,输电系统的充裕度评估和完整发电机组系统的充裕度评估结果相差较大,可见,如不考

表3 由本文方法获得的输电系统充裕度评估结果

Tab.3 Adequacy evaluation results of the transmission system

| obtained from the proposed method | | | |
|-----------------------------------|----------------|---------------|---------------|
| 指标 | $\beta = 10\%$ | $\beta = 5\%$ | $\beta = 3\%$ |
| P_{LOLP} | 0.001 27 | 0.001 25 | 0.001 26 |
| F_{LOLP} / (次/a) | 0.345 1 | 0.346 8 | 0.346 7 |
| EDNS / (MW/a) | 0.034 7 | 0.034 5 | 0.034 5 |
| EDNS / (MWh/a) | 303.557 | 302.439 | 302.500 6 |
| D_{LOLP} /h | 32.412 4 | 31.827 5 | 31.926 1 |

表4 由文献[10]中的方法获得的完整输电系统充裕度评估结果

Tab.4 Adequacy evaluation results of the full system consisting of generation and transmission obtained from reference [10]

| 指标 | $\beta = 5\%$ | $\beta = 3\%$ |
|--------------------|---------------|---------------|
| P_{LOLP} | 0.089 63 | 0.086 61 |
| F_{LOLP} / (次/a) | 39.50 | 37.92 |
| EDNS / (MW/a) | 15.72 | 14.97 |
| EDNS / (MWh/a) | 137 716 | 131 279 |
| D_{LOLP} /h | - | - |

虑发电系统故障对可靠性的影响,将会造成可靠性指标计算结果减小很多。

表5给出的是系统非序贯 Monte Carlo 仿真得出的严重故障模式。限于篇幅列出10个筛选出的严重故障模式。

表5 模拟筛选出的严重故障模式

Tab.5 Severe failure mode filtered from Monte Carlo simulation

| 故障模式 | 故障线路 | 故障概率/ ($\times e^{-7}$) | 最优削减负荷/MW | 削减负荷点位置 |
|------|------------|------------------------------|-----------|---------|
| 1 | 2-6、6-10 | 6.500 | 136.00 | 6 |
| 2 | 3-9、3-24 | 7.200 | 80.31 | 3 |
| 3 | 6-10 | 13e4 | 27.141 | 6 |
| 4 | 3-4、6-10 | 23.4 | 27.141 | 6 |
| 5 | 6-10、10-12 | 23.4 | 27.141 | 6 |
| 6 | 6-10、9-12 | 23.4 | 27.141 | 6 |
| 7 | 6-10、15-16 | 5.20 | 27.141 | 6 |
| 8 | 6-10、18-21 | 5.20 | 27.141 | 6 |
| 9 | 6-10、20-23 | 5.20 | 27.141 | 6 |
| 10 | 4-9、6-10 | 5.20 | 27.141 | 6 |

表3中的排序是根据故障后系统的最大削减负荷量和故障发生的概率加权的方法进行严重程度排序,对于故障模式1,由于电缆线路6-10和2-6的故障,造成负荷节点6变成孤岛,节点6的负荷将全部丢失,而节点6之外的网络采用最优削减负荷重新调整发电机出力后达到功率平衡。对于故障模式2,3-9、3-24线路故障,系统功率平衡打破,节点3只能通过一个线路获取功率,潮流计算发散,采取最优削减负荷之后,节点3削减去负荷80.31 MW,重新达到平衡。对于故障模式3,6-10故障,节点6也只能通过一个线路获得功率,潮流计算收敛,节点6电压偏低,最优削减负荷减载27.141 MW重新达到平衡。对于故障模式4-10,都是由于有线路6-10故障导致,并且其他线路同时故障,导致节点6电压过低以及其他相关节点和线路违背运行约束,但是通过最优削减负荷计算,节点6都削去负荷量27.141 MW。

图2是EDNS的方差系数随模拟次数收敛过程。从图2可以看出,即便对于IEEE-RTS可靠性比较高的系统,也很快收敛到了稳定值,在方差系数取10%的情况下,抽样状态数78 324个,计算时间14.859 s的情况下已经达到和取方差系数5%和3%的要求下几乎相同的值。因此,对于其他系统,采用合适的方差系数,对于这么短的计算时间,对于输电网可靠性充裕度评估有望达到在线运用水平。

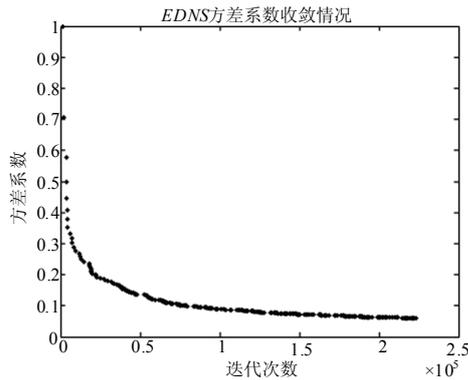


图2 可靠性指标 EDNS 的方差系数与模拟次数之间的关系
Fig.2 Relation between coefficient of variation of EDNS and simulation times

4 结论

Monte Carlo 抽样能抽取到严重的故障状态,与故障枚举法相比,能够模拟多重故障,发现系统可能存在的严重故障;采用连接矩阵存储已评估状态的技术,实际计算的切负荷状态数很少,减少了计算量,大大提高了计算效率,与其他算法相比,计算时间更短。基于非线性规划技术的最优削减负荷模型实现了更加完备的控制策略,使得评估更加准确;依据最优负荷削减量和抽样状态概率加权的办法,对严重故障模式进行筛选和进一步分析,寻找系统薄弱环节,可以为电力调度人员提供参考,有利于避免严重停电事故,提高电网的安全水平。

参考文献

[1] Billinton R. Composite system reliability evaluation[J]. IEEE Trans, 1969, 88 (4) : 276-281.

[2] 李文沅, 著. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

[3] 丁明. 发输电系统可靠性分析软件综述[J]. 电网技术, 2002, 26 (1) : 51-54.
DING Ming. A survey of composite generation and transmission reliability analysis software package[J]. Power System Technology, 2002, 26 (1) : 51-54.

[4] 郭永基. 电力系统可靠性原理和应用(上、下)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

[5] 赵渊, 周家启, 周念成, 等. 大电力系统可靠性评估的解析计算模型[J]. 中国电机工程报, 2006, 26 (5) : 19-25.
ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, ZHOU Nian-cheng, et al. An analytical approach for bulk power systems reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (5) : 19-25.

[6] Billinton R, LI Wen-yuan. Hybrid approach for reliability evaluation of composite generation and transmission

systems using monte carlo simulation and enumeration technique[J]. IEE Proceedings-C, 1991, 138 (3) : 233-241.

[7] Billinton R, LI Wen-yuan. A Monte carlo method for multi-area generation system reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7 (4) : 1487-1492.

[8] Billinton R, LI Wen-yuan. A system state transition sampling method for composite system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8 (3) : 761-767.

[9] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (6) : 68-75.
BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan. The application of monte carlo method to reliability evaluation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (6) : 68-75.

[10] 赵渊, 周念成, 谢开贵, 等. 大电力系统可靠性评估的系统状态抽取方法研究[J]. 中国电力, 2006, 39(6) : 5-9.
ZHAO Yuan, ZHOU Nian-cheng, XIE Kai-gui, et al. Research on technique of system state selection for bulk power system reliability assessment[J]. Electric Power, 2006, 39 (6) : 5-9.

[11] 宋云亭, 郭永基, 程林. 大规模发输电系统充裕度评估的蒙特卡罗仿真[J]. 电网技术, 2003, 27(8) : 24-27.
SONG Yun-ting, GUO Yong-ji, CHENG Lin. Monte-Carlo simulation to adequacy evaluation for large-scale power generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2003, 27 (8) : 24-27.

[12] 程林, 孙元章, 郑望其, 等. 超大规模发输电系统可靠性充裕度评估及其应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (11) : 75-78.
CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, ZHENG Wang-qi, et al. Large-scale composite generation and transmission system adequacy evaluation and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (11) : 75-78.

[13] 戴仁昶, 丁明, 洪梅, 等. 组合系统可靠性评估中有功校正策略研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (12) : 6-10.
DAI Ren-chang, DING Ming, HONG Mei, et al. A reasonable strategy for active power rescheduling used in composite system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (12) : 6-10.

[14] 丁明, 李生虎, 吴红斌. 电力系统概率充分性和概率稳定性的综合评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (3) : 20-25.
DING Ming, LI Sheng-hu, WU Hong-bin. Integrated evaluation of power system adequacy and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (3) : 20-25.

(下转第56页 continued on page 56)

163-166.
 LU Xiu-ling, ZHANG Song-hua, CAO Cai-kai, et al. New detecting method for harmonics and reactive currents in single-phase circuits[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (3): 163-166.

[7] 张秀峰, 李群湛, 吕晓琴. 基于有源滤波器的 V, v 接同相供电系统[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(2): 98-103.
 ZHANG Xiu-feng, LI Qun-zhan, Lü Xiao-qin. V, v connection cophase power supply system based on active power filter[J]. China Railway Science, 2006, 27 (2): 98-103.

[8] 张秀峰, 连级三. 基于斯科特变压器的新型同相 AT 牵引供电系统[J]. 机车电传动, 2006 (4): 14-18.
 ZHANG Xiu-feng, LIAN Ji-san. A new cophase AT traction power supply system based on scott transformer[J]. Electric Drive for Locomotives, 2006 (4): 14-18.

[9] 张秀峰, 高仕斌, 钱清泉. 基于阻抗匹配平衡变压器和 AT 供电方式的新型同相牵引供电系统[J]. 铁道学报, 2006, 28 (4): 32-37.
 ZHANG Xiu-feng, GAO Shi-bin, QIAN Qing-quan. A novel cophase traction power supply system based on impedance matching balance transformer and AT power supply mode[J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28 (4): 32-37.

[10] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都: 西

南交通大学出版社, 2007.
 TAN Xiu-bing. AC electrified railway traction power supply system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Publishing House, 2007.

[11] GB-T14549-1993 公用电网谐波[S].

[12] GB-T15543-2008 三相电压允许不平衡度[S].

[13] GB 12325-2003 供电电压允许偏差[S].

[14] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
 LI Qun-zhan. Traction substation power supply analysis and integrated compensation technology[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.

[15] 刘光晔, 周有庆, 姚建刚. 新型平衡变压器的平衡条件及等值电路研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19 (4): 84-88.
 LIU Guang-ye, ZHOU You-qing, YAO Jian-gang. Study of requirements and equivalent circuit of new balance transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (4): 84-88.

收稿日期: 2009-11-20; 修回日期: 2009-12-19

作者简介:

魏光 (1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为电能质量分析与控制、新型牵引供电系统理论分析, 供变电工程设计。
 E-mail: weiguang1185@163.com

(上接第 50 页 continued from page 50)

[15] 赵渊, 周家启. 发电组合系统可靠性评估的最优负荷削减模型研究[J]. 电网技术, 2004, 28 (10): 34-37.
 ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi. Research of the optimal load shedding model in the composite generation and transmission system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2004, 28 (10): 34-37.

[16] 王元驰, 肖先勇, 邓武军. 一种基于邻接关系和广度优先搜索的网络拓扑分析方法[J]. 四川电力技术, 2007 (12): 29-32.
 WANG Yuan-chi, XIAO Xian-yong, DENG Wu-jun. A topology analysis method based on adjacent relation of elements in the network and breadth first search[J]. Sichuan Power Technology, 2007 (12): 29-32.

[17] 杨彬. 数据结构[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

[18] Reliability Test System Task force of the application of probability method subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979, 98 (6): 2047-205.

[19] 程莹, 刘明波. 求解离散无功优化的非线性原-对偶内点算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (9): 23-27, 60.
 CHENG Ying, LIU Ming-bo. Nonlinear primal-dual interior point algorithm for discrete reactive power

optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (9): 23-27, 60.

[20] 郑望其, 程林, 孙元章. 2005 年南方电网可靠性充裕度评估[J]. 电网技术, 2004, 28 (19): 5-8.
 ZHENG Wang-qi, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang. Adequacy evaluation for south China electric power grid in 2005[J]. Power System Technology, 2004, 28 (19): 5-8.

[21] 孙昕, 丁明. 大型电力系统可靠性评价体系 (1) 指标定义[J]. 合肥工业大学学报, 1998, 21 (S1): 18-21.
 SUN Xin, DING Ming. Reliability indices framework for bulk power system (1) definition[J]. Journal of Hefei University of Technology[J]. 1998, 21 (S1): 18-21.

收稿日期: 2009-11-04; 修回日期: 2010-02-01

作者简介:

周欣 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与计算; E-mail: zhouxingxing240@126.com
 刘明波 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统优化、运行与控制;
 谢敏 (1978-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统规划、运行与控制。