

发输电系统可靠性评估的蒙特卡洛改进算法

黄殿勋¹, 张文¹, 郭萍¹, 刘艳华²

(1. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007; 2. 河南省电力公司物流服务中心, 河南 郑州 450007)

摘要: 在发输电系统可靠性评估的蒙特卡洛算法过程中, 根据发电机与线路的故障情况, 引入系统状态的解析判断方法, 针对不同的系统状态做不同的处理。针对可能需要切负荷的系统状态, 运用线性规划模型进行有功功率优化调整。同时推导出有功潮流分布因子的计算式, 利用分布因子, 使线路故障时可快速生成导纳矩阵, 简化了有功潮流的计算。编写程序进行验证, 证明了蒙特卡洛改进算法计算速度快, 收敛性好, 适用于节点支路较多的电力系统的可靠性评估。

关键词: 可靠性评估; 蒙特卡洛改进算法; 有功潮流; 解析判断; 可靠性指标

The Monte Carlo improved method for reliability evaluation of generation and transmission systems

HUANG Dian-xun¹, ZHANG Wen¹, GUO Ping¹, LIU Yan-hua²

(1. Henan Electric Power Survey & Design Institute, Zhengzhou 450007, China;
2. Electric Power Logistics Service Center of Henan, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In the process of the Monte Carlo method for generation and transmission systems reliability evaluation, based on the fault conditions of generators and lines, analytical judgment of the system state is added, different process is taken with different system conditions. For the system state that may conduct load-shedding, linear programming model is used to adjust the active power. And the distribution factor of active power flow is derived, so the reactance matrix can be modified rapidly when few lines fault, and the power flow calculation is simplified. Calculation programs are written to verify that the Monte Carlo improved method. The result shows that improved method has rapid computation and good convergence and is suitable for power system reliability evaluation with a large number of nodes and branches.

Key words: reliability evaluation; Monte Carlo improved method; active power flow; analytical judgment; reliability index

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0179-05

0 引言

发电厂以及把这些电厂发出的电能送到主要负荷点的输电系统的总和称为发输电组合系统(Composite Generation and Transmission Systems), 发输电组合系统的可靠性研究是电力系统可靠性研究的重要组成部分^[1], 可靠性研究主要是在考虑电源到负荷之间各种设备的实际运行条件和系统的约束下, 对发输电组合系统的可靠性进行定量评估。在电力系统的可靠性评估中, 分析过程一般由三个步骤组成: 状态选择, 状态估计和指标计算^[2]。蒙特卡洛法用抽样的方法进行状态选择, 用统计的方法得到可靠性指标; 而解析法用故障枚举法进行状态选择, 用解析的方法计算出可靠性指标。在蒙特卡洛法中, 系统的状态是从设备概率分布函数中抽样确定的, 然后对产生状态进行状态估计。一个模

拟序列表示一个实际的样本, 系统的可靠性指标是在累积了足够数目的样本后, 对每次状态估计的结果进行统计而得到的。

蒙特卡洛法属于统计试验方法, 比较直观, 易于被工程技术人员掌握和理解, 可以发现一些人们难以预料事故, 采样次数与系统的规模无关, 容易处理各种实际运行控制策略, 所以蒙特卡洛方法在进行大型复杂电力系统的可靠性评估时更具有优越性^[3]。它的主要不足在于计算时间与计算精度的紧密相关性, 为了获得精度较高的可靠性指标, 往往需要很长的计算时间。

本文提出蒙特卡洛改进算法, 在蒙特卡洛方法的计算过程中, 加入对系统状态的解析判断, 同时利用有功潮流的分布因子快速修改潮流分布。经过算例验证, 在保证计算精度不变的情况下, 改进后的算法所需的计算量和计算时间显著减少。

1 系统状态的解析判断

1.1 发输电系统元件的状态模型

运用蒙特卡洛法时，系统的状态是从设备概率分布函数中抽样确定的。虽然影响电力系统可靠性的不确定因素非常庞大，但在蒙特卡洛法中仅考虑那些对系统运行状态起主要作用的不确定性因素^[4]。若只考虑发电机和输电线路，对于发电机和线路，认为这两类元件仅有运行和故障两种状态。对于两状态设备，利用计算机产生一个服从均匀分布 $U(0,1)$ 的随机数，将此随机数与设备的故障率比较，确定该设备的状态：故障退出还是正常运行，即

$$\eta_g = \begin{cases} 1 & x \geq F_{gi} \\ 0 & x < F_{gi} \end{cases} \quad (1)$$

$$\eta_l = \begin{cases} 1 & x \geq F_{lj} \\ 0 & x < F_{lj} \end{cases} \quad (2)$$

式中：1 表示元件正常运行；0 表示元件故障； η_g 和 η_l 分别表示发电机 i 和线路 j 的状态； F_{gi} 和 F_{lj} 分别表示第 i 台发电机和第 j 条线路的故障率； x 是服从均匀分布 $U(0,1)$ 的随机数。系统中各设备的状态组成了系统的状态相量 \mathbf{x} ，全部可能的状态 \mathbf{x} 的集合 C 称为系统的状态空间。

采样完成后，对于每个发电机节点，判断此节点处是否有发电机故障，若无，认为此节点正常，标记此节点的状态为 1；若有发电机故障，但通过投入本节点的备用容量可以保证本节点发出的有功不变，标记为 1，若备用全部投入也不能弥补本节点发电机故障带来的损失，标记此节点的状态为 0。于是，得到了用节点状态和线路状态描述的系统状态。经过这样处理后，有功功率约束条件的数量与发电机节点个数相同，很大程度上降低了有功功率优化调整计算的维数。

1.2 系统状态的解析判断

采样完成后，采样所获得的系统状态可以划分为四个区域，如图 1 所示。 N_F 表示节点注入功率改变； N_N 表示所有节点注入功率不变； T_F 表示输电线路有故障发生； T_N 表示输电线路全部正常运行。

I 区为系统的正常运行状态，II、III、IV 区为系统的故障状态。其中，II 区为只有节点注入功率改变的状态，III 区为只有输电线路故障的状态，IV 区为节点与线路组合故障状态。对于 I 区的所有状态，系统不会切负荷。而对于 II、III、IV 区，可以

将其划分为两个部分，一部分为不会引起系统切负荷的故障状态子集 S_{NLC} (Subset of No Load Curtailment)，而另一部分为可能引起系统切负荷的故障状态子集 S_{LC} (Subset of Load Curtailment)^[5]，如图中的阴影部分。

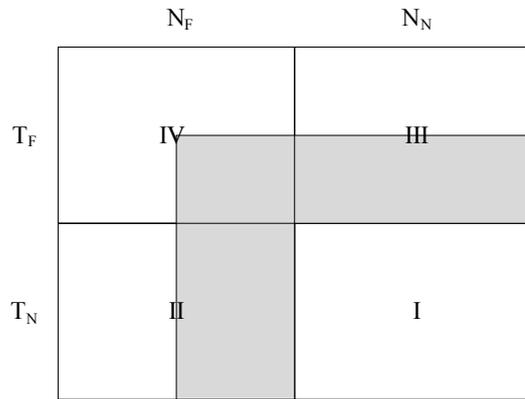


图 1 系统状态的划分

Fig.1 The judgment of system state

计算时，首先应形成系统正常情况下的注入功率阵 P 、电抗矩阵 X (即 B 的逆) 以及各条线路的初始潮流 P_{ij} ^[4]。采样完成后，若判断出系统未解列，对 II、III、IV 区的解析判断方法叙述如下：

II 区状态的解析判断：只修改注入功率阵 P ，用有功潮流模型计算各线路的有功潮流；若有线路过负荷，即该状态属于 S_{LC} ，则需要对发电机节点有功进行优化调整；否则，进入下一次采样。

III 区状态的解析判断：运用有功潮流的分布因子，结合各线路初始潮流 P_{ij} ，快速求出各线路的有功潮流；若有线路过负荷，即该状态属于 S_{LC} ，则需要对发电机节点有功进行优化调整；否则，进入下一次采样。

IV 区状态的解析判断：修改注入功率阵 P ，对于每一条故障线路，运用有功潮流的分布因子快速修改电抗矩阵 X ；用有功潮流模型计算各线路的有功潮流；若有线路过负荷，即该状态属于 S_{LC} ，则需要对发电机节点有功进行优化调整；否则，进入下一次采样。

本文所提出的蒙特卡洛改进算法，是在蒙特卡洛模拟中尽可能地利用了解析法所提供的信息，尽可能减少不必要的运算，从而加快了计算的速度。

1.3 有功功率的优化调整

发电机有功功率的优化调整采用线性规划方法。通过对采样状态的解析判断，可将大量不出现切负荷的故障状态排除。针对可能需要切负荷的状态，引入发电机出力的优化调整，以消除由于发电

机、线路(包括变压器)故障而引起线路过负荷现象, 求出满足系统运行条件的最小切负荷量。线性规划模型的目标和约束条件为

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N P_{Di} \quad (3)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{P}_L = \mathbf{P}_G + \mathbf{P}_D, \quad \sum_{i=1}^N P_{Gi} + \sum_{i=1}^N P_{Di} = \sum_{i=1}^N P_{Li},$$

$$\underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \overline{P}_{Gi}, \quad 0 \leq P_{Di} \leq P_{Li}, \quad |T_j| \leq \overline{T}_j$$

其中: 节点编号 $i=1, 2, \dots, N$; 线路编号 $j=1, 2, \dots, M$; P_{Di} 、 P_{Gi} 、 P_{Li} 、 \underline{P}_{Gi} 、 \overline{P}_{Gi} 分别为节点 i 的切负荷量、发出的有功功率、有功负荷、发电机的有功下限、发电机的有功上限; T_j 和 \overline{T}_j 为线路 j 的有功功率和有功功率上限。

2 有功潮流的分布因子

大电网可靠性评估均采用有功潮流模型, 一方面有功潮流模型可以满足可靠性指标的精度要求, 另一方面若采用交流潮流, 则在有功的优化调整将成为非线性规划问题, 难以求解。本文通过推导公式, 利用有功潮流的分布因子来加快计算速度。在系统状态获得以后, 经过有功潮流计算获得本次切负荷量, 用来累计可靠性指标。

有功潮流方程是^[1]

$$\mathbf{P} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} \text{ 或 } \boldsymbol{\theta} = \mathbf{X}\mathbf{P} \quad (4)$$

式中: \mathbf{B} 是用 $1/x$ 为支路参数建立的 $n \times n$ 阶电纳矩阵; \mathbf{X} 是 \mathbf{B} 的逆。

设网络无故障时电纳矩阵为 \mathbf{B} , 通过求逆运算得到 \mathbf{B} 的逆矩阵为 \mathbf{X} ; 设网络中线路 l 开断, 则 \mathbf{B} 阵中少量元素发生变化, 若重新计算 \mathbf{B}^{-1} , 则计算量较大, 事实上也不必要。以下导出单条支路开断时有功潮流的分布; 对于多条支路开断的情况, 等价于多次开断单条支路, 逐次利用下述方法即可得到有功潮流的分布。

引入如下计算定理^[6], 设 $\mathbf{A}_{n \times n}$ 可逆, $\boldsymbol{\alpha}$ 、 $\boldsymbol{\beta}$ 均为 n 维列向量, 且 $1 + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{A}^{-1} \boldsymbol{\alpha} \neq 0$, 则 $\mathbf{A} + \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}^T$ 可逆, 且

$$(\mathbf{A} + \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}^T)^{-1} = \mathbf{A}^{-1} - \frac{\mathbf{A}^{-1} \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{A}^{-1}}{1 + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{A}^{-1} \boldsymbol{\alpha}} \quad (5)$$

设网络中线路 l 开断, \mathbf{S} 为节点支路关联矩阵, 当节点 i 为线路 l 的起始节点时, $S_{il} = 1$, 当节点 j 为线路 l 的末端节点时, $S_{jl} = -1$, 当节点 k 不是

线路 l 两端的节点时, $S_{kl} = 0$ 。设 \mathbf{B} 为线路故障前系统的电纳矩阵, $\tilde{\mathbf{B}}$ 为线路故障后系统的电纳矩阵, 则有

$$\tilde{\mathbf{B}}^{-1} = \mathbf{B}^{-1} + \frac{\mathbf{B}^{-1} \mathbf{S}_l \mathbf{S}_l^T \mathbf{B}^{-1}}{x_l - \mathbf{S}_l^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{S}_l} \quad (6)$$

由此, 可以在一条线路故障时简单地修改系统的 $\tilde{\mathbf{B}}^{-1}$ 阵。

由上式可导出线路 l 故障后任意线路 k 上的有功潮流:

$$\tilde{P}_k = P_k + \lambda_{k-l} P_l \quad (7)$$

其中: λ_{k-l} 是支路 k 与支路 l 之间的支路潮流分布因子, 其计算式为

$$\lambda_{k-l} = \frac{\mathbf{S}_k^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{S}_l / x_k}{1 - \mathbf{S}_k^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{S}_l / x_l} \quad (8)$$

在一般情况下, $\mathbf{S}_k^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{S}_l < x_l$, 上式的分母取 0~1 之间的有限值。只有当支路 l 开断引起网络分解成两个独立的子网络时, $\mathbf{S}_k^T \mathbf{B}^{-1} \mathbf{S}_l = x_l$, 此时 λ_{k-l} 无定义。

对于式(5), 当 $\boldsymbol{\alpha}$ 、 $\boldsymbol{\beta}$ 亦为 n 维矩阵时, 也有对应的求逆计算公式, 可将其应用于 n 条支路开断的情况, 但经过实际计算发现, 当 n 大于 3 时这种计算方法的计算量过大。因此, 对于多条支路开断的情况, 本文中直接采用逐次运用式(5)的方法进行处理, 可以减少多条线路故障时生成电纳矩阵的计算量。

3 蒙特卡洛改进算法流程

综合前文的阐述, 可以形成评估发输电系统可靠性的基本算法, 蒙特卡洛改进算法的程序流程图如图 2 所示。

4 算例分析

4.1 计算结果

在发输电系统可靠性研究中, 通常采用 IEEE-RTS 24 系统进行可靠性指标的计算对比, 来验证计算方法的正确性。IEEE-RTS 24 系统共有 24 个系统节点, 38 条线路, 其中 10 个发电机节点, 17 个负荷节点, 共 32 台发电机组, 总装机容量是 3 405 MW, 系统的最大负荷为 2 850 MW。系统包括 2 个电压等级, 分别为 230 kV 和 138 kV, 230 kV/138 kV 变电站两座, 降压变压器 5 台, 总容量 2 000 MVA。23 号节点为平衡节点^[8]。

采样 50 000 次, 随机数种子为系统时间, 获得的系统可靠性指标失负荷概率 LOLP(loss of load probability) 和电量不足期望值 EENS(expected energy not supplied) 与其他计算方法的结果对比如表 1^[8-9]。

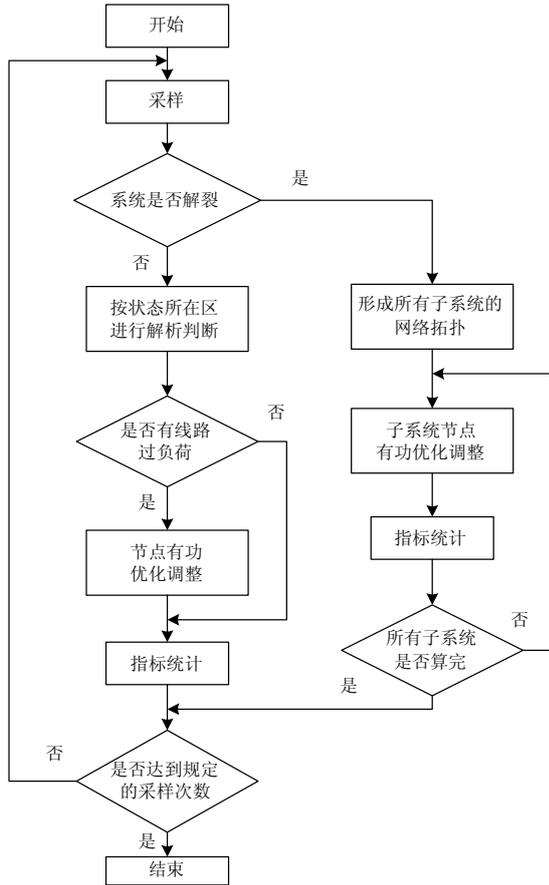


图 2 蒙特卡洛改进算法流程图

Fig.2 Flow charts of the improved method

表 1 IEEE-RTS 24 系统可靠性指标

Tab.1 Reliability index of IEEE-RTS 24 system

指标	解析法	蒙特卡洛法	蒙特卡洛改进算法
LOLP	0.084 575	0.084 4	0.084 3
EENS	128 695.3	127 397.86	128 879.18

可以看出, 使用蒙特卡洛改进算法可以满足计算精度的要求。

4.2 收敛速度分析

采样 50 000 次, 对蒙特卡洛改进算法的计算时间做了统计, 如表 2 所示, 可见相同的采样次数和计算精度下, 蒙特卡洛改进算法所需的计算时间大

大减少。

表 2 计算时间比较

Tab.2 Comparison of computing time

计算方法	时间/s	误差 β
蒙特卡洛法	750	0.019 75
蒙特卡洛改进算法	102	0.019 75

*CPU 主频 2.93 GHz

在发输电系统评估的蒙特卡洛法中, 电量不足期望值指标 (EENS) 的收敛速度较慢^[10-11]。因此, EENS 常作为可靠性指标收敛的判别标准。

系统 EENS 及其相对误差 β 的收敛速度如图 3 和图 4 所示。可以看出, 采样次数增加到 20 000 次时, 可靠性指标已经趋于收敛, 蒙特卡洛改进算法具有很好的收敛性。

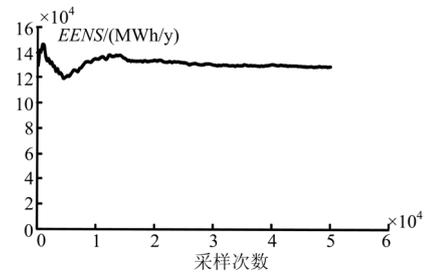


图 3 系统 EENS 的收敛示意图

Fig.3 Convergence of EENS

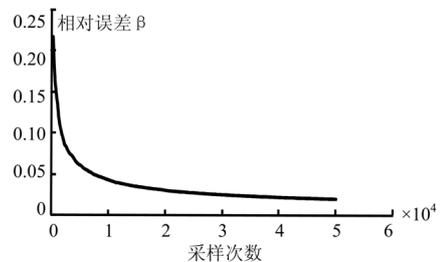


图 4 相对误差 β 的收敛速度示意图

Fig.4 Convergence rate of relative error β

5 结论

蒙特卡洛法是概率方法, 抽样的次数越多, 则计算结果越精确, 因此, 为使可靠性指标满足一定的精度要求, 需要较长的计算时间。通过在抽样过程中加入解析判断, 把系统状态进行分区并分别处理; 同时, 在线路故障时, 引入有功潮流的分布因子, 可以避免对故障后的电纳矩阵进行求逆运算, 该方法同样适用于多条线路故障的情况。搭建 IEEE 24 节点模型, 编写程序对蒙特卡洛改进算法进行验证, 结果表明, 在相同的采样次数和可靠性指标精

度下, 改进算法显著减少计算时间, 且具有良好的收敛性。

我国的电网近年来发展很快, 网络的容量不断增加, 网络的规模越来越大, 对可靠性评估的灵活性及计算速度的要求也越来越高, 因此, 对蒙特卡洛算法及其改进算法的研究将有更广泛的应用。

参考文献

- [1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Yong-ji. Power system reliability evaluation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 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 Chao-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.
- [3] 任震, 谌军, 黄雯莹, 等. 大型电力系统可靠性评估的模型及算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(5): 25-28.
REN Zhen, CHEN Jun, HUANG Wen-ying, et al. Model and algorithm of reliability evaluation for large power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(5): 25-28.
- [4] 温兴文, 张焰, 陈煜. 基于可靠性定量分析的输电网规划软件包开发及应用[J]. 供用电, 2006, 23(2): 22-24.
WEN Xing-wen, ZHANG Yan, CHEN Yu. Based on the reliability of quantitative analysis in transmission network plan software package development and application[J]. Distribution & Utilization, 2006, 23(2): 22-24.
- [5] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 电力系统可靠性评估的混合方法研究[J]. 中国电力, 2001, 34(3): 25-28.
BIE Chao-hong, WANG Xiu-li, WANG Xi-fan. Study of hybrid method on power system reliability evaluation[J]. Electric Power, 2001, 34(3): 25-28.
- [6] 魏战线. 线性代数与解析几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

- WEI Zhan-xian. Linear algebra and analytic geometry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [7] IEEE RTS task force of APM subcommittee. The IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans, 1996, 14(3): 1010-1020.
- [8] SONG Xiao-tong, TAN Zhen-yu. Power system reliability evaluation under reactive power adequacy constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 169-177.
- [9] 张硕, 李庚银, 周明. 基于序贯蒙特卡罗仿真的发输电系统充裕度评估算法[J]. 中国电力, 2009, 42(7): 10-15.
ZHANG Shuo, LI Geng-yin, ZHOU Ming. Research on adequacy evaluation algorithm of generation and transmission systems based on the sequential Monte-Carlo simulation[J]. Electric Power, 2009, 42(7): 10-15.
- [10] 赵渊, 沈智健, 周念成, 等. 大电网可靠性蒙特卡洛仿真的概率不确定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 61-67.
ZHAO Yuan, SHEN Zhi-jian, ZHOU Nian-cheng, et al. Probabilistic uncertainty analysis of Monte-Carlo simulation for bulk power system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 61-67.
- [11] Billinton R, Tang X. Selected considerations in utilizing Monte Carlo simulation in quantitative reliability evaluation of composite power systems[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(20): 205-211.

收稿日期: 2010-08-05; 修回日期: 2010-09-08

作者简介:

黄殿勋(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统可靠性评估、智能电网及调度自动化等领域的研究工作;
E-mail: huangdianxun@ha.sgcc.com.cn

张文(1985-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事电力系统调度自动化及电力系统可靠性评估等领域的研究工作。

(上接第 178 页 continued from page 178)

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

姜文(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新

能源、优化算法、电力系统可靠性分析; E-mail: clintonjiang@sjtu.edu.cn

严正(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力市场, 电力系统稳定分析。