第 14 卷　第 7 期　　智 能 计 算 机 与 应 用　　2024 年 7 月
Vol.14　No.7　　Intelligent Computer and Applications　　Jul. 2024

徐朝君. 基于改进蒙特卡洛法的电网二次系统风险评估[J]. 智能计算机与应用,2024,14(7):90-93. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.240713

基于改进蒙特卡洛法的电网二次系统风险评估

徐朝君
(东莞市电子商贸学校, 广东 东莞 523000)

摘　要: 为了降低电网二次系统运行风险,本文提出了一种基于改进蒙特卡洛法的电网二次系统评估方法。采用马尔科夫链对蒙特卡洛法进行改进;利用改进蒙特卡洛法对电网运行数据进行算例分析,对电网二次系统进行风险评估。仿真结果表明,改进蒙特卡洛法的各项稳定性指标更好,电网在冬季最大运行方式下的运行风险最大,可靠性最差,仿真结果对电网风险管理具有指导意义。

关键词: 电网; 二次系统; 风险评估; 改进蒙特卡洛法

中图分类号: TM732　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 2095-2163(2024)07-0090-04

Risk assessment of power grid secondary system based on improved Monte Carlo Method

XU Chaojun
(Dongguan Electronics & Commerce School, Dongguan 523000, Guangdong, China)

Abstract: In order to reduce the operational risks of the secondary system of the power grid, this paper proposes an improved Monte Carlo Method for evaluating the secondary system of the power grid. The markov chain is used to improve the Monte Carlo Method, and the improved Monte Carlo Method is used to analyze the operational data of the power grid. The risk assessment of the secondary system of the power grid is carried out. The results show that the improved Monte Carlo Method has better stability indicators, and the power grid has the highest operational risk and the worst reliability under the maximum operating mode in winter. The simulation results have guiding significance for power grid risk management.

Key words: power grid; secondary system; risk assessment; improved Monte Carlo Method

0　引　言

电力系统分为一次系统和二次系统,一次系统中包含大量一次设备,一次设备运行情况相对直观,可以通过人工巡视发现是否存在运行风险[1-2]。作为一次系统的辅助部分,二次系统集控制、保护、监控和调节功能于一体,对保障电力系统的正常运行至关重要[3]。二次系统中包含大量生产指挥信号和测量数据,如果二次系统出现故障,可能引起测量数据丢失、信号传输错误等,从而影响电网正常调度[4-5]。另外,一次设备发生故障时,保护装置及自动化装置等二次设备无法正常运作,导致故障不能快速排除,扩大故障范围,造成更大经济损失[6-7]。

为了减少二次系统故障的电网损失,本文对电网二次系统风险评估进行研究,提出一种基于改进蒙特卡洛法的电网二次系统风险评估方法,并采用实际算例验证该评估方法的正确性和实用性。

1　改进蒙特卡洛法

蒙特卡洛模拟是一种典型的参数估计方法,在数学、物理学、经济学等领域均得到了广泛应用[8-9]。有研究表明,在蒙特卡洛法中引入马尔科夫链能够更好地处理样本的随机性,提高评估结果的可靠性[10]。

1.1　改进蒙特卡洛法的基本原理

改进蒙特卡洛法的基本原理: 样本 $\{X_{k+1} \mid X_k\}$ 的一个序列为 $X_0, X_1, \cdots, X_{k+1}$, 该序列即为一条马尔科夫链,其中 X_0 为初始条件。

为了使样本分布更平稳,在对均值 $E[f(x)]$ 进行评估时,去掉其中 M 个抽样值,利用剩下的 $N-M$

作者简介: 徐朝君(1969-),男,硕士研究生,高级讲师,主要研究方向:信息技术应用。

收稿日期: 2023-04-20

个采样值进行估算，得到均值 $E[f(x)]$，公式(1)：

$$E[f(x)]=\frac{1}{N-M}\sum_{k=M+1}^{N}f(x_k) \tag{1}$$

其中，$f(x)$ 表示目标函数值。

式(1)即为随机过程中的平均遍历理论，$E[f(x)]$ 的计算方差见公式(2)：

$$V[\hat{E}(f)]=V(f)/n \tag{2}$$

其中，$V(f)$ 为总体方差，n 为样本数量。

1.2 收敛性分析

为了提高评估精度，本文采用改进蒙特卡洛法进行收敛性分析。

由遍历定理可知，当 $n\to\infty$ 且 M 值确定时，式(1)一定存在一个趋近于 $f(x)$ 的均值[11]。

首先对马尔科夫链 $X_1,X_2,\cdots,X_n$ 进行分割，将其等分为 k 份，每份有元素 m 个，即

$$\underbrace{\underbrace{X_1,\cdots,X_m}_{m},\underbrace{X_{m+1},\cdots,X_{2m}}_{m},\cdots,\underbrace{X_{(k-1)m-1},\cdots,X_{km}}_{m}}_{km}。$$

令 $\overline{F_i}$ 表示 m 个元素的均值，公式(3)；$\overline{F}$ 表示马尔科夫链样本的均值，公式(4)：

$$\overline{F_i}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}F(X_{(i-1)m+j}),i=1,2,\cdots,k \tag{3}$$

$$\overline{F}=\frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}\overline{F_i},i=1,2,\cdots,k \tag{4}$$

根据统计学理论，当样本空间足够大时，平均值 $\overline{F_1},\overline{F_2},\cdots,\overline{F_k}$ 是独立同分布的，根据概率统计分布原理，可得式(5)：

$$\frac{|\overline{F}-E[F(x)]|}{\sqrt{\hat{V}(F)/n}}\sim t_{(k-1)} \tag{5}$$

令式(5)的置信度为 α，应满足式(6)：

$$|\overline{F}-E(F)|<t_{\alpha}^{k-1}\sqrt{\frac{\hat{V}(F)}{n}} \tag{6}$$

从式(6)可以看出，当 $k\to\infty$ 时，t 满足标准正态分布，此时估计结果的方差决定了改进蒙特卡洛法的收敛性。

改进蒙特卡洛法的误差 ε，公式(7)：

$$\varepsilon=t_{\alpha}^{k-1}\sqrt{\frac{\hat{V}(F)}{n}} \tag{7}$$

方差采用误差 β 来表示，公式(8)：

$$\beta=t_{\alpha}^{k-1}\sqrt{\frac{\hat{V}[\hat{E}(F)]}{\hat{E}(F)}} \tag{8}$$

经过进一步整理可以得到式(9)：

$$\beta=\frac{\sqrt{\hat{V}(F)}}{\sqrt{n}} \tag{9}$$

抽样次数决定了改进蒙特卡洛法的计算量，由式(9)可知，系统复杂性不会对改进蒙特卡洛法的抽样次数产生影响，这与传统蒙特卡洛法一致。

2 Gibbs 抽样

利用改进蒙特卡洛法可以获得一条分布平稳的马尔科夫链，马尔科夫链的构造通过 Gibbs 抽样方法来完成。

Gibbs 抽样法是一种随机抽样方法，采用该方法获得的马尔科夫链具有以下 3 个特点[12]：

(1)集合中的元素相互关联；

(2)上一时刻的状态对下一时刻状态的影响很大；

(3)抽样目标是马尔科夫链的极限分布。

对于二次系统，可以采用概率函数抽样的方式确定其状态，二次系统状态表征量很多，本文选取二次回路和保护装置的状态进行 Gibbs 抽样。

令二次系统状态变量的集合为 X_k，则第 k 次样本的抽样状态可表示为式(10)：

$$X_k=[X_0,X_1,\cdots,X_{km}]^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

其中，m 为待抽样元件的个数。

元件 i 在第 k 次抽样时的状态 X_{ki} 可表示为式(11)：

$$X_{ki}=\begin{cases}1 & \text{元件 } i \text{ 在第 } k \text{ 次抽样时为正常状态}\\0 & \text{元件 } i \text{ 在第 } k \text{ 次抽样时为故障状态}\end{cases} \tag{11}$$

其中，$i=0,1,\cdots,m$。

初始时刻所有元件的状态均为正常，令二次系统初始故障概率为 P_0，获得第 $k+1$ 次样本的抽样状态 X_{k+1} 的步骤如下：

(1)由概率分布 $p\{X_{k+1},i|X_{k/i}\}$ 得到元件 i 在下一时刻的变化概率 P_{abn} 和 P_{norm}，在概率 $p\{X_{k+1},i|X_{k/i}\}$ 中，该元件当前所处状态序列的表达式为式(12)：

$$X_{k/i}=\{X_{k+1,1},X_{k+1,2},\cdots,X_{k+1,i-1},X_{k+1,m-i},\cdots X_{km}\} \tag{12}$$

其中，前 $i-1$ 个元素为第 $k+1$ 次采样时元件的状态，后 $i-1$ 个元素第 k 次采样时元件的状态。

为了使变化概率 P_{abn} 和 P_{norm} 在区间[0,1]内，对 P_{norm} 进行取对数操作，公式(13)：

$$P_{\mathrm{norm}}(P_{\mathrm{abn}})=\ln[\prod_{j=1}^{i=1}p_j^{1-X_{k+1,j}}(1-p_j)^{1-X_{k+1,j}}\prod_{l=i+1}^{i=1}p_j^{1-X_{k,l}}(1-p_j)^{1-X_{k,l}}] \tag{13}$$

（2）确定元件在下一状态为 1 的概率，式（14）：

$$\xi = \frac{1}{e^{P_{\text{abn}} - P_{\text{norm}}} + 1} \tag{14}$$

（3）随机产生一个随机数 $\mu, \mu \in [0,1]$，且服从均匀分布，比较 μ 与 ξ 的大小，即可确定二次回路和保护装置的运行状态，式（15）：

$$X_{k+1,i} = \begin{cases} 1, & \mu < \xi, \quad \text{元件 } i \text{ 为正常状态} \\ 0, & \mu < \xi, \quad \text{元件 } i \text{ 为故障状态} \end{cases} \tag{15}$$

（4）如果元件状态在该时刻发生变化，则元件下一时刻仍保持该状态的概率为 P_{abn} 或 P_{norm}。

按照上述步骤采样，即可得到满足系统概率分布的马尔科夫链，将其作为样本对二次系统进行分析评估，得到相关风险控制指标。

3 二次系统风险评估模型

3.1 评估模型

在风险评估过程中，系统风险是由发生危害事件的概率和危害事件带来的损失决定的，其表达式（16）：

$$R(t) = L(t) \times P(t) \tag{16}$$

其中，t 为事件持续时间；R 为事件持续一定时间的系统风险；L 为事件持续一定时间带来的损失；P 为事件持续一定时间发生危害事件的概率。

由式（16）可知，本文的研究对象为二次系统，系统负荷损失也只针对二次系统故障，因此对于发生危害事件的概率因素暂不考虑，二次系统风险只通过危害事件带来的损失来衡量。

3.2 风险评估指标

风险一般是由未来时间内的随机性和不确定性造成的，因此在对二次系统风险进行评估需要确定风险评估指标[13-14]。本文选取的风险评估指标如下：

1）切负荷概率

切负荷概率（PLS）是指系统出现故障后出现切负荷操作的可能性，其计算公式（17）：

$$PLS = \sum_{i=1}^{Q} \left(\sum_{s \in \Omega} \frac{n(s)}{N_i} \right) \frac{T_i}{T} \tag{17}$$

其中：s 为电力系统所处状态；$n(s)$ 为状态 s 在抽样过程中产生的次数；Ω 表示系统出现故障的集合；N_i 为抽样次数；Q 为电力负荷的分级数量；T_i 为负荷 i 的小时数；T 为总负荷曲线小时数。

2）停电量期望

停电量期望（$EENS$）是指停电后符合损失的电量期望值，其计算公式（18）：

$$EENS = \sum_{i=1}^{Q} \left(\sum_{s \in \Omega} \frac{n(s)C(s)}{N_i} \right) T_i \tag{18}$$

其中，$C(s)$ 为电力系统在状态 s 的负荷切除量。

3）切负荷频率

切负荷频率（$EFLS$）是指一定时间内切除负荷的次数，其计算公式（19）：

$$EFLS = \sum_{i=1}^{Q} \left(\sum_{s \in \Omega} \frac{n(s)}{N_i} \sum_{j=1}^{m(s)} \lambda_j \right) \frac{T_i}{T} \tag{19}$$

其中，λ_j 状态 s 的转移率。

4）负荷切除时间

负荷切除时间（$ADLS$）是指故障发生后切除电力负荷的时间，其计算公式（20）：

$$ADLS = \frac{PLS \times T}{EFLS} \tag{20}$$

5）停电功率期望

停电功率期望（$EDNS$）的表达式（21）：

$$EDNS = \sum_{i=1}^{Q} \sum_{s \in \Omega} \frac{n(s)C(s)}{N_i} \tag{21}$$

3.3 负荷损失模型

在构建负荷损失模型时，对于二次系统需要考虑下列几个问题：

（1）二次系统失效会影响主设备正常运行，因此主设备系统损失也应当作为二次系统失效的一个评价指标；

（2）为了实现定量估算，本文二次系统的设备故障，暂不考虑原理性故障；

（3）对于二次系统风险评估，本文只对二次回路和保护装置的风险进行研究。

对于电力系统风险事故，衡量其严重程度的主要依据就是负荷功率损失[15]。由于切负荷主要出现在电网潮流不收敛和解列时，因此可以在电网调整有功和无功的过程中寻找运行点，以此来建立目标函数为切电力负荷最小的负荷损失函数，式（22）：

$$f = \min \sum (P_{Li} - P_{L0}) \tag{22}$$

其中，P_{Li} 为调整后发电侧输出功率，P_{L0} 为调整前发电侧输出功率。

等式约束主要是指系统平衡约束，公式（23）：

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{B\theta} \tag{23}$$

其中，$\boldsymbol{B}$ 为电纳矩阵，$\boldsymbol{\theta}$ 为系统电压相角向量。

不等式主要包括有功功率约束、无功功率约束、负荷功率约束以及线路输送功率约束等，式（24）：

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_G \leqslant P_{G\max} \\ 0 \leqslant Q_G \leqslant Q_{G\max} \\ 0 \leqslant P_{Li} \leqslant Q_{Li\max} \\ -F_{i\max} \leqslant F_i \leqslant F_{i\max} \end{cases} \tag{24}$$

其中，P_G 和 Q_G 分别为调整后的有功功率和无功功率；$P_{G\max}$ 和 $Q_{G\max}$ 分别为有功功率和无功功率的最大值；F_i 为调整后的线路输送功率。

4 算例分析

4.1 计算可靠性指标

采用 IEEE 24 节点系统进行算例分析，其中负荷节点 17 个，系统中包含发电机 32 台，变压器 5 台，输电线路 33 条。采用 Gibbs 抽样 55 000 次，前 5 000 次进行 “退火”处理，以消除初值影响。

采用改进蒙特卡洛法计算可靠性指标，并与蒙特卡洛法、状态枚举法和卷积法等 3 种常用风险评估方法进行对比(结果见表 1)。由表 1 可知，改进蒙特卡洛法的切负荷概率、停电量期望和停电功率期望等 3 项指标均优于其他 3 种常用风险评估方法，验证了改进蒙特卡洛法的正确性。

表 1 4 种方法的结算结果

Table 1 Settlement results of four methods

评估方法	*PLS*(切负荷概率)	*EENS*(停电量期望)/MW·h	*EDNS*(停电功率期望)/MW
蒙特卡洛法	0.085 7	1.389×10^5	14.689
状态枚举法	0.085 8	1.388×10^5	14.718
卷积法	0.085 7	1.390×10^5	14.712
改进蒙特卡洛法	0.085 6	1.386×10^5	14.616

4.2 不同运行方式分析

以西南地区某地市电网为例进行不同运行方式下二次系统风险评估分析，将电网运行方式根据冬夏划分为冬季最大运行方式、冬季最小运行方式、夏季最大运行方式和夏季最小运行方式，抽样次数均为 5 000次，不同运行方式下的评估结果见表 2。

表 2 不同运行方式下的评估结果

Table 2 Evaluation results under different operating modes

运行方式	负荷/MW	*PLS*	*EENS*/ MW·h	*EDNS*/ MW
冬季最大	1.960×10^5	0.127	3.686×10^5	42.084
冬季最小	1.563×10^5	0.049	1.503×10^5	17.158
夏季最大	1.854×10^5	0.064	2.178×10^5	24.858
夏季最小	1.408×10^5	0.033	9.952×10^4	11.361

由表 2 可知，该电网在冬季最大运行方式下的评估结果最差，其原因在于该地区冬季湿冷，负荷需求最大，从而导致负荷峰值出现在该运行方式下，负荷需求和电厂出力基本相等，系统备用负荷容量较小，可靠性指标较差，二次系统风险较高，在此运行方式下出现二次系统故障，必然会对电网造成较大损失。

5 结束语

本文在蒙特卡洛法中引入马尔科夫链，得到改进蒙特卡洛法，采用样本极限分布建立各元素间的马尔科夫链，解决了样本初值不稳定的问题。在此基础上，提出了一种基于改进蒙特卡洛法的电网二次系统评估方法，仿真结果表明，改进蒙特卡洛法所需抽样次数更少，收敛结果更稳定。利用蒙特卡洛法对西南地区某地市电网进行评估结果表明，该电网在冬季最大运行方式下的运行风险最大，可靠性最差，对电网风险管理具有指导意义。

参考文献

[1] 杨庆，朱道华. 智能变电站二次系统失效风险评估方法[J]. 电力工程技术，2022，41(2)：179-185.

[2] 周虎兵，张焕青，杨增力，等. 二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J]. 电力系统保护与控制，2019，47(9)：120-127.

[3] 马一杰. 电力二次系统安全风险评估与安全加固要点[J]. 电子技术与软件工程，2019(9)：206-207.

[4] 许鹏程，林建森，林缔，等. 改进严重度模型下计及二次系统影响的电网风险评估[J]. 电力工程技术，2021，40(2)：212-219.

[5] 戴志辉，韩健硕，邱小强，等. 计及风险扩散的智能变电站二次系统风险评估模型[J]. 电测与仪表，2020，57(24)：66-75.

[6] 王建，熊张忞，南东亮，等. 灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估 [J]. 电力系统保护与控制，2024，52 (9)：16-26.

[7] 蔡新雷，董锴，孟子杰，等. 考虑源荷可调节资源参与的电网风险评估指标体系及方法 [J]. 广东电力，2024，37 (1)：27-38.

[8] 莫熙，王宜立，高道春，等. 基于改进蒙特卡洛法的智能电网实时运行风险评估[J]. 能源与环保，2022，44(11)：233-237.

[9] 李智珍，唐杰. 基于贝叶斯网络和蒙特卡洛的含高比例风电电网频率风险评估 [J]. 船电技术，2022，42(4)：24-27.

[10] 张振振. 基于改进蒙特卡洛和组合赋权法的城市电网风险评估[D]. 淮南：安徽理工大学，2020.

[11] 杨荣领，马东魁. 关于 IFS 的一个经典遍历定理的注记[J]. 华南师范大学学报(自然科学版)，2022，54(4)：109-112.

[12] 付志慧，周末. 基于三参数 Logistic 模型 Gibbs 抽样方法的敏感度分析[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版)，2022，40(1)：71-75.

[13] 王建，熊张忞，南东亮，等. 灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(9)：16-26.

[14] 宋晓镔. 基于模糊熵权法二次系统信息安全风险评估研究[J]. 电脑编程技巧与维护，2024 (2)：170-172.

[15] 陈俊全，陈锦龙，叶航超，等. 基于电网风险评估的事故控制措施分析[J]. 沈阳工业大学学报，2023，45 (2)：145-150.