

大型电力系统可靠性评估中的 马尔可夫链蒙特卡洛方法

石文辉, 别朝红, 王锡凡

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Applications of Markov Chain Monte Carlo in Large-scale System Reliability Evaluation

SHI Wen-hui, BIE Zhao-hong, WANG Xi-fan

(College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: A new Monte Carlo simulation method for large-scale system reliability evaluation is presented, which is Markov chain Monte Carlo (MCMC). MCMC is a kind of dynamic Monte Carlo simulation method that introduces Markov chain in stochastic process to the Monte Carlo simulation. In this method, the Gibbs sampler utilizes a set of full conditional distributions associated with the target distribution of interest in order to define a Markov chain with an invariant distribution equal to the target distribution. The system states are sampled one by one from this Markov chain to evaluate reliability. Comparing with the classical Monte Carlo simulation method, the relativities between these states are considered, which can reflect the inherence of the system states. The results of the IEEE RTS 24-bus test system show that the proposed method is efficient in system evaluation. The proposed model improves the convergence, stability and computation speed of the reliability evaluation dramatically. Finally, the evaluation results of North-west 330kV power system also indicate the presented method is valid and has great advantage that it applies to large-scale system evaluation.

KEY WORDS: large-scale power system; reliability evaluation; Markov chain Monte Carlo; Gibbs sampler

摘要: 提出大型电力系统可靠性评估的一种新的蒙特卡洛模拟方法—马尔可夫链蒙特卡洛方法(Markov chain Monte Carlo, MCMC)。MCMC方法是一种特殊的蒙特卡洛方法, 它将随机过程中的马尔可夫过程引入到蒙特卡洛模拟中, 实现动态蒙特卡洛模拟。该方法通过重复抽样, 建立一个平稳

分布与系统概率分布相同的马尔可夫链, 从而得到系统的状态样本。由于MCMC方法考虑了系统各个状态间的相互影响, 相比于随机采样的蒙特卡洛方法所得到的独立样本序列, 更准确模拟了电力系统运行实际情况。IEEE-RTS 24节点算例表明, 该算法可快速收敛, 节省计算时间, 提高计算速度。同时, 由于每条马尔可夫链均收敛于同一个分布, 即所谓平稳分布, 所以算法具有良好的稳定性。对西北330 kV电网的可靠性评估再次表明了该方法的正确性和有效性以及该方法用于大型电力系统的可靠性评估的优越性和潜力。

关键词: 大型电力系统; 可靠性评估; 马尔可夫链蒙特卡洛方法; Gibbs抽样器

0 引言

马尔可夫链蒙特卡洛方法(Markov chain Monte Carlo, MCMC)产生于20世纪50年代。该方法广泛运用于对复杂、高维概率分布的试验函数评估中, 尤其是贝叶斯统计和统计物理中^[1]。在过去10多年里, 国内、外学者对MCMC方法在不同领域内的应用进行了大量的研究。如Evans和Swartz说明了在统计调整中MCMC应用于数值积分优于其他功能强大的方法^[2]。2002年2月, IEEE信号事务处理专委会主要讨论了如何将MCMC方法应用在信号处理和跟踪的实践中。目前MCMC方法已经广泛应用于理论物理、社会学^[3]、生物、医学^[4]、人工智能、金融统计^[5]、信号通信^[6]等领域, 但尚未看到将其应用于电力系统可靠性评估的报道。

在电力系统规划及实际运行中, 可靠性评估有重要的意义^[7-14]。近20年来, 大型发输电系统的可靠性评估越来越受到研究者的关注^[8-9]。解析法和蒙特卡洛模拟法(MC方法)^[10-11]是计算电力系统可靠性的两种最基本方法。MC方法是一种统计试验方

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677050); 国家重点基础研究发展规划基金项目(2004CB217905)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677050); The National Basic Research Program of China (2004CB217905).

法,在进行大型电力系统的可靠性评估时更具灵活性^[12]。但MC方法存在计算效率低^[13-14]、维数高、静态性的缺陷。MC方法采用的抽样方法产生独立随机序列,序列中各元素之间没有关系,而实际电力系统中发电机、输电线路是紧密联系在一起的,使用独立元素的抽样方法必然会存在一定的偏差,且传统MC方法难于从高维的概率分布函数中抽样。

针对这种情况,本文将基于马尔可夫链的蒙特卡洛模拟方法——MCMC方法引入到电力系统的可靠性评估中,提出了基于MCMC方法的电力系统可靠性评估的模型和算法。其基本思想是:通过重复抽样,建立一个平稳分布与系统先验概率分布相同的马尔可夫链,从而得到系统的状态样本,基于这些样本进行可靠性评估。

1 MCMC方法基本原理及特点

1.1 MCMC方法的基本原理

MCMC是一种特殊的蒙特卡洛方法,它将随机过程中的马尔可夫链应用到蒙特卡洛模拟中,以实现动态模拟(即抽样分布随模拟的进行而改变)。

序列 $X_0, X_1, X_2, \dots, X_{k+1}$ 产生于 $\{X_{k+1}|X_k\}$ 的条件分布, X_0 代表一些初始条件。 $X_0, X_1, X_2, \dots, X_{k+1}$ 是一个马尔可夫链。

当 $k \rightarrow \infty$ 时 X_k 与初始值无关,其密度(分布)趋近于平稳分布,为 $p^*(\cdot)$ 。即当 k 增大时,马尔可夫链中随机向量将收敛于一个有共同密度 $p^*(\cdot)$ 的马尔可夫序列。此时称该马尔可夫链收敛,而在收敛出现以前的一段时间,如前 M 次采样中,各状态的密度分布还不是该平稳分布。因此在估计 $E[f(x)]$ 时应该把前 M 个采样值去掉,而用后 $n-M$ 个采样结果进行估计:

$$E[f(x)] = \frac{1}{n-M} \sum_{k=M+1}^n f(X_k) \quad (1)$$

式(1)就是随机过程中著名的遍历平均。 $E(f)$ 的估计值 $\hat{E}(f)$ 的方差为

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

$V(f)$ 的估计值为

$$\hat{V}(f) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [f(x_i) - \hat{E}(f)]^2 \quad (3)$$

从以上对MCMC理论的分析可知,MCMC的主要思想就是构造一个平稳分布为 $p(x)$ 的马尔可夫链。构造这样的马氏链是非常容易的^[1,15]。最常用的算法有Metropolis-Hastings(M-H)算法和Gibbs抽

样器。本文计算中使用Gibbs抽样器来产生MCMC模拟所需要的马尔可夫链。

1.2 电力系统可靠性评估中的Gibbs状态抽样器

在MCMC模拟法的Gibbs抽样中,系统的状态是从设备的概率分布函数中抽样确定的。本文仅考虑对可靠性指标LOLP、EENS影响最大的发电机、线路(包括变压器)两类元件随机故障。对于发电机和线路,采用两状态模型,其概率分布函数服从两点分布,按概率 p 发生故障,按概率 $(1-p)$ 工作, p 为发电机或线路的强迫停运率。考虑发电机、线路的随机故障,负荷为确定性负荷。所以只需对发电机和线路的状态进行抽样。

X 表示发电机和线路的状态变量,是 m 个单变量的集合, m 为要进行状态抽样的元件的个数,数值上等于发电机数与线路数的和,则Gibbs抽样器的第 k 个样本 X 是:

$$X_k = [X_{k1} \ X_{k2} \ \dots \ X_{km}]^T$$

式中 X_{ki} 表示第 k 次抽样时第 i 个元件的状态,

$$X_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{第}k\text{次抽样时元件}i\text{处于运行状态} \\ 0 & \text{第}k\text{次抽样时元件}i\text{处于故障状态} \end{cases}, \quad i=1, 2, \dots, m.$$

在给定所有元件的初始状态均为正常运行的情况下,与系统概率分布有关的相关概率初始值为 p_{one} ,获得第 i 个元件的第 $k+1$ 次抽样状态 $X_{k+1,i}$ 的方法是:

(1) 根据该元件此刻所处的状态(0或1),从满条件分布 $p\{X_{k+1,i}|X_{k\setminus i}\}$ 中得到此元件在系统当前状态下,下一时刻状态改变(1或0)的概率相关值 p_{one} 或 p_{zero} 。

满条件概率 $p\{X_{k+1,i}|X_{k\setminus i}\}$ 中,有

$$X_{k\setminus i} = \{X_{k+1,1}, X_{k+1,2}, \dots, X_{k+1,i-1}, X_{k,i+1}, \dots, X_{k,m}\}$$

$X_{k\setminus i}$ 的前 $(i-1)$ 个元素是第 $(k+1)$ 次采样的抽样点,剩下的 $(m-i)$ 个元素是第 k 次采样中的可利用的点。所以, p_{one} 或 p_{zero} 为

$$\ln \left[\prod_{j=1}^{i-1} p_j^{1-X_{k+1,j}} (1-p_j)^{X_{k+1,j}} \prod_{l=i+1}^m p_l^{1-X_{k,l}} (1-p_l)^{X_{k,l}} \right]$$

这里取对数是为了使 p_{one} 或 p_{zero} 的值处于0~1之间,方便计算。

(2) 计算该元件下一个状态取1的概率:

$$\eta = 1 / [\exp(p_{\text{zero}} - p_{\text{one}}) + 1]$$

式中 \exp 对应于步骤1中所取的对数。

(3) 利用计算机产生一个服从均匀分布 $U(0,1)$

的随机数 u ，将此随机数与 η 比较，确定发电机和线路的状态(故障退出还是正常运行)。第 $k+1$ 次抽样时：

$$X_{k+1,i} = \begin{cases} 1, & u < \eta \text{ 元件}i\text{处于运行状态} \\ 0, & u \geq \eta \text{ 元件}i\text{处于故障状态} \end{cases}$$

(4) 如果该元件的状态发生改变，将从满条件分布中获得的 p_{one} 或 p_{zero} 值作为下一个元件保持此时刻状态的相关概率。

如此循环采样，可以得到一条平稳分布为系统概率分布的马尔可夫链，利用收敛后的马尔可夫链作为电力系统的状态样本，进行状态评估与调整，从而统计得到电力系统的可靠性指标。

1.3 MCMC 方法的收敛性及其误差

MCMC 方法具有强大的数据处理能力和较低的计算复杂度，考虑了元件状态之间的联系，即系统下一个状态只与当前状态有关。

遍历定理^[16]保证了式(1)中的标准和对任何一个固定的 M 在 $n \rightarrow \infty$ 时将会趋近于 $f(X)$ 的平均值，此平均值是在 $p^*(\cdot)$ 下的计算。目前有很多可以验证 MCMC 算法是否收敛方法^[17-19]。下面给出判断 MCMC 方法收敛性的定量方法。

将链 X_1, X_2, \dots, X_n 分割成为 k 部分，每部分有 m 个元素， $n = mk$ 。根据概率统计的原理可知：

$$\frac{\bar{f} - E[f(x)]}{\sqrt{\hat{V}(f)/n}} \sim t_{(k-1)} \quad (4)$$

式中： $\bar{f}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f(X_{(i-1)m+j})$, $i=1, 2, \dots, k$; $\bar{f} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{f}_i$ 。

对置信度 α ，有

$$|\bar{f} - E(f)| < t_{\alpha}^{k-1} \sqrt{\frac{\hat{V}(f)}{n}} \quad (5)$$

当 $k-1 \rightarrow \infty$ 时， t 分布趋近于标准正态分布。此时，方法收敛性主要取决于估计的方差。用方差系数 β 来表示估计的误差：

$$\beta = \frac{\sqrt{V[\hat{E}(f)]}}{\hat{E}(f)} \quad (6)$$

将式(2)代入式(6)，整理后得：

$$n = \frac{V(f)}{[\beta \hat{E}(f)]^2} \quad (7)$$

MCMC 方法的计算量(抽样次数)与传统的 MC 方法一样，几乎不受系统规模或复杂程度的影响，因此，该法也适用于处理各种复杂因素，如相关负荷及各种运行控制策略等，且 MCMC 方法与 MC

一样，在计算精度一定的情况下，提高计算速度的唯一方法就是减少方差。因此，MC 法中的各种减少方差的技巧同样适用于 MCMC 法中。

2 系统的状态评估模型和可靠性指标

2.1 系统的状态评估模型

本文电力系统网络模型采用直流潮流模型，发电再调度模型采用最小切负荷模型。当系统评估时由于元件故障使线路出现过负荷时，则进行发电机出力的优化调整，以消除由于发电机、线路故障引起的线路过负荷现象。对于一些严重的故障，当发电机有功优化调整尚不能达到目的时，则采用最小切负荷策略，通过切除最小量的负荷使系统能够安全可靠的运行。系统状态校正模型是最小切负荷模型为

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i=1}^N r_i \\ \text{s.t.} & \begin{cases} B\theta = P_g - P_d + r \\ P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \\ 0 \leq r \leq P_d \\ |P_l| \leq P_l^{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

式中： N 为负荷节点数； r 为节点的削负荷向量； P_g^{\min} 为发电机最小出力向量； P_g^{\max} 为发电机最大出力向量； P_l 为支路潮流向量； P_l^{\max} 为支路功率极限值向量。

上述模型是一个标准的线性规划模型，采用 LINDO 线性规划软件进行优化计算，具体过程不再赘述。

2.2 系统可靠性评估指标

(1) 系统切负荷的概率(loss of load probability, LOLP)。LOLP 表示系统因种种原因需要削减负荷的概率。计算公式为

$$P_{\text{LOLP}} = \sum_{i \in S} p_i \quad (9)$$

式中： p_i 为系统在状态 i 的概率； S 为系统所有切负荷状态的集合。

(2) 停电功率期望值(expected demand not supplied, EDNS)。EDNS 为系统停电功率的期望值，单位是 MW，计算公式为

$$P_{\text{EDNS}} = \sum_{i \in S} C_i p_i \quad (10)$$

式中： C_i 为系统在状态 i 的切负荷量。

(3) 电量不足期望值(expected energy not supplied, EENS)。EENS 指在被研究的一段时间内系

统电量不足的期望值。如果计算的是全年系统的电量不足期望值, 计算公式如下所示:

$$P_{\text{EENS}} = \sum_{i \in S} D_i C_i p_i = \sum_{i \in S} 8760 C_i p_i \quad (11)$$

式中: C_i 为削减负荷量; p_i 为对应的概率。

由于 EENS 是能量指标, 对于进行可靠性经济评估、最优可靠性及系统规划均有重要意义, 因此 EENS 是系统整体可靠性评估中非常重要的指标。

(4) 平均每次停电功率(average of expected demand not supplied, AEDNS), 单位是 MW, 计算公式为

$$P_{\text{AEDNS}} = \frac{P_{\text{EDNS}}}{P_{\text{LOLP}}} \quad (12)$$

此外, 还采用系统最大停电功率指标, 以反映系统的最严重故障。

3 算例

3.1 IEEE-24 RTS 系统

3.1.1 指标计算

应用上述方法, 对 IEEE-RTS 24 节点可靠性试验系统^[20]进行计算。Gibbs 抽样器共进行 55000 次采样, 前 5000 次用于“退火”, 消除初始值的影响, 后 50000 次抽样结果作为样本值进行可靠性指标的评估。利用 MCMC 方法所得到可靠性指标如表 1 所示。从表 2 可以看出, 本文方法与其它几种计算方法结果非常相近, 说明了本文方法的有效性。由表 3 可知, 发电机故障造成系统失负荷的比例最大, 高达 97.2%, 此数据表明发电机故障是引起系统切负荷的主要因素, 即电网电源裕度偏小, 系统的输电资源裕度较大。

表 1 IEEE-RTS 24 节点系统的可靠性指标
Tab. 1 The reliability indices of IEEE-RTS 24-bus

系统的可靠性指标	数值
P_{LOLP}	0.084 64
$P_{\text{EENS}}/(10^4 \text{ kW} \cdot \text{h})$	12 785.973 36
$P_{\text{EDNS}}/\text{MW}$	14.595 86
$P_{\text{AEDNS}}/\text{MW}$	172.446 36

表 2 几种研究方法对 IEEE-RTS 24 节点系统计算结果比较

Tab. 2 Comparison of the results of several methods for IEEE-RTS 24-bus

可靠性指标	卷积法	状态枚举法	随机采样 MC 方法	本文方法
P_{LOLP}	0.084 578	0.084 575	0.084 420	0.084 640
$P_{\text{EENS}}/(10^4 \text{ kW} \cdot \text{h})$	12 871.662	12 869.53	12 978.186	12 785.97

表 3 可靠性评估中的切负荷信息

Tab. 3 Information of cutting load in reliability evaluation

故障信息	切负荷样本数	所占比例/%
发电机单独故障	4 113	97.2
输电线路故障	4	0.09
联合故障	115	2.71
总切负荷样本数	4 232	100

3.1.2 算法的收敛速度比较

图 1 和图 2 分别为 LOLP 和 EENS 两个指标的收敛曲线。从图 1 和图 2 中可以看出, 使用 MCMC 方法采样 10 000 次时可靠性指标就已收敛。MCMC 方法相对 MC 方法能加快计算速度, 减少采样次数。

图 3 为指标 LOLP 相对误差收敛速度示意图。从图 3 中可以计算出同样采样次数下 MCMC 方法 LOLP 指标的方差系数约是 MC 方法的 0.35 倍, 即在抽样次数相同的情况下, 使用 MCMC 方法时, LOLP 的收敛速度比使用 MC 方法提高了近 7 倍。

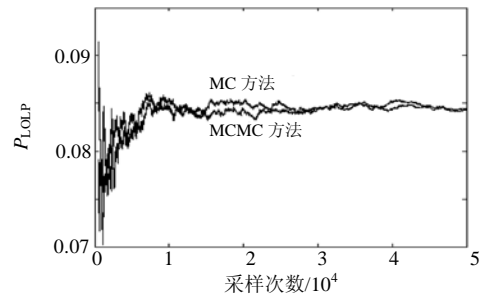


图 1 两种方法的 LOLP 收敛曲线
Fig. 1 Convergence curve of LOLP to two methods

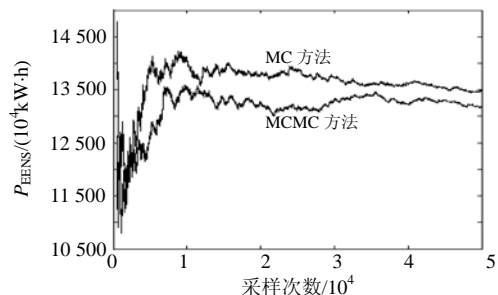


图 2 两种方法的 EENS 收敛曲线
Fig. 2 Convergence curve of EENS to two methods

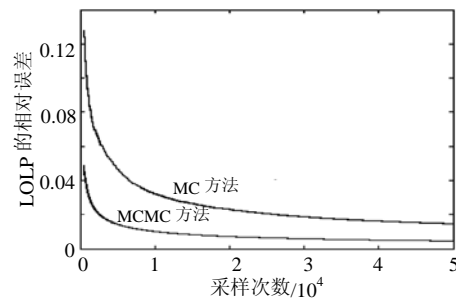


图 3 两种方法的 LOLP 相对误差收敛曲线
Fig. 3 Convergence curve of β for LOLP to two methods

同时从图 3 还可以看出, MCMC 方法采样 10 000 次时, LOLP 指标的方差系数已达到 0.01。即使用 MCMC 方法时, 只需要进行 10 000 次的采样就可以获得较精确的计算结果, 减少了采样时间, 加快了评估速度。

3.1.3 算法的稳定性比较

为了检验算法的稳定性, 两种方法各计算 10 次, 计算结果如图 4~7 所示。比较图 4 与图 5、图 6 与图 7 可知, MCMC 方法的稳定性比 MC 方法高。MCMC 方法计算 10 次的结果基本一致, LOLP 指标的方差为 MC 方法的 1.89%, EENS 指标的方差为 MC 方法的 2.65%。这是因为使用 MCMC 方法时, 马尔可夫链中的元素有先后次序及相互关联, 并且与初始值无关, 所以每条马尔可夫链都将收敛于同一目标分布, 得到的可靠性指标十分稳定。从图 4 和图 6 可以看出, 每条马尔可夫链在采样 10 000

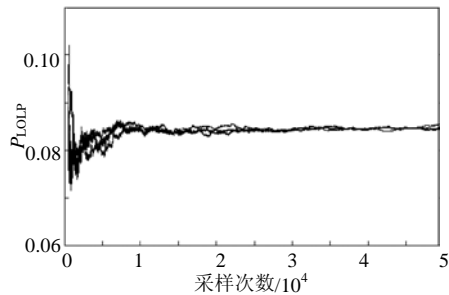


图 4 MCMC 方法计算 10 次的 LOLP 指标
Fig. 4 The distribution of LOLP to MCMC in ten calculations

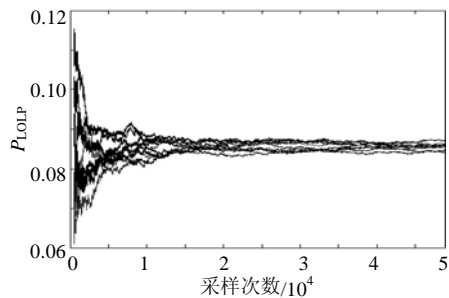


图 5 MC 方法计算 10 次的 LOLP 指标
Fig. 5 The distribution of LOLP to MC in ten calculations

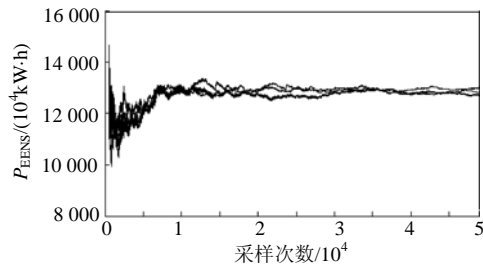


图 6 MCMC 方法计算 10 次的 EENS 指标
Fig. 6 The distribution of EENS to MCMC in ten calculations

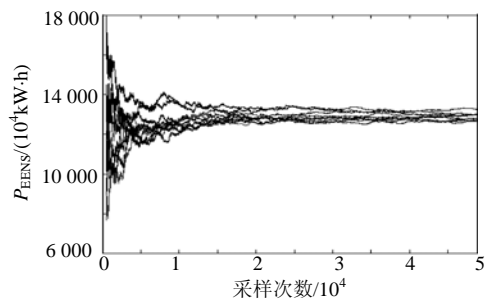


图 7 MC 方法计算 10 次的 EENS 指标
Fig. 7 The distribution of EENS to MC in ten calculations

次之后, 其可靠性指标都可收敛到一个稳定的值。而由于随机采样 MC 方法系统元件状态之间没有关系, 每次采样所产生的独立随机序列也各不相同, 所以每次采样所得到的结果相差比较大, 结果不够稳定。要想得到稳定的计算结果就必须增加采样次数。

3.2 2006 年西北 330 kV 电网可靠性评估

3.2.1 指标计算

2006 年西北 330 kV 电网含宁夏、青海、甘肃和陕西 4 个区域, 94 个节点, 179 条输电线路, 分夏大、夏小、冬大、冬小 4 种运行方式。表 4 为抽样 50 000 次各个运行方式下系统的可靠性指标。

表 4 4 种运行方式下系统的可靠性指标 Tab. 4 Reliability indices of the system in four modes				
运行方式	夏大	夏小	冬大	冬小
负荷水平/MW	23 218.25	17 605.83	24 501.69	19 536.53
P_{LOLP}	0.079 78	0.041 34	0.157 76	0.062 02
$P_{EENS}/(10^4 \text{ kW}\cdot\text{h})$	27 218.89	12 440.42	46 081.28	18 787.84
P_{EDNS}/MW	31.071 8	14.201 4	52.604 2	21.447 3
P_{AEDNS}/MW	389.468 5	343.526 9	333.444 5	345.812 6

3.2.2 电网可靠性分析

从表 4 中可以看出, 在 4 种不同运行方式下可靠性指标以冬大方式最差, 这主要是因为冬大方式负荷是全网高峰情况, 电网的 330 kV 电源点变压器输出功率和电厂出力已经基本饱和, 系统运行的裕度较低, 并且运行机组多为火电机组, 故障率较水电机组大, 因此可靠性指标最差。冬大运行方式下由于系统元件故障所造成的切负荷信息如表 5 所示。

表 5 冬大方式下切负荷信息 Tab. 5 Information of cutting load in winter heavy load mode		
故障信息	切负荷样本数	所占比例/%
发电机单独故障	2 335	29.6
输电线路故障	258	3.3
联合故障	5 295	67.1
系统切负荷总样数	7 888	100

在冬大方式下,主网潮流西电东送 600 MW,西电东送指甘肃、宁夏、青海电网经 330 kV 天雍线、秦雍线、雍眉线和西桃线向陕西供电。从表 5 中可以看出,发电机单独故障造成的切负荷次数占整个系统切负荷次数的 29.6%,由发电机组和输电线路联合故障引起的系统切负荷次数占整个系统切负荷次数的 67.1%,可见发电机故障对系统的可靠性指标影响较大,而发电机组和输电线路联合故障对系统的影响最大,即发电机组故障是引起系统切负荷的主要原因。表 6 为计算中出现的线路过负荷情况。

表 6 主要的过负荷线路信息

Tab. 6 Information for major overflow lines

过负荷线路	过负荷次数	所占总数比例/%
雍城变—眉岷变	2 866	27.3
平凉变—眉岷变	2 111	20.1
桃曲变—金锁变	1 714	16.3
金锁变—黄陵变	976	9.3
宝二变—马营变	823	7.84
西峰变—桃曲变	526	5

由表 6 可知,雍城变到眉岷变是最主要的过负荷线路,平凉变到眉岷变次之,桃曲变到金锁变和金锁变到黄陵变及宝二变到马营变都是较容易出现过负荷的输电线路。雍城变到眉岷变是西电东送的主要线路,是整个系统输电的瓶颈,也是输电功率变化最大的输电线路,只要有发电机组故障或发电机组和线路联合故障都可能导致系统切负荷。其中,秦二、宝二、渭河、韩二等东部地区大机组故障是引起雍城变到眉岷变输电线路过负荷的主要原因。其他输电线路均是由于输电任务相对其额定输电容量而言较重而出现过的负荷,如宝二是装机为 1 200 MW 的大电厂,宝二变到雍城变线路只担负较少的输电任务,其他发电功率都是经由宝二变到马营变线路输送出去的,所以易出现过负荷。由以上分析可知,提高主要输电线路的输送容量也是减少线路过负荷提高系统稳定性的一个重要方法。

以上的分析说明,主要发电机组故障和送电通道故障是系统失负荷的主要因素。本文中的计算结果与系统的实际情况相符合。

3.2.3 算法分析

对此算例分别采用 MCMC 方法和 MC 方法进行可靠性指标 LOLP 的计算,以 LOLP 指标的方差系数 β_{LOLP} 为抽样终止判据(仅以冬大方式为例)。

从表 7 中可以看出(CPU 主频 Pentium 4 1.80 GHz),在同样的 LOLP 收敛判据 β_{LOLP} 为 0.01 的情况下,MCMC 方法的抽样次数比 MC 方法减少

了 81.4%,MCMC 方法的计算时间比 MC 方法节省了 36%。由于 MCMC 方法中系统元件状态抽样考虑了元件之间的相互影响,所以每抽样一次所需要的时间比独立抽样元件状态的 MC 方法有所增加,但是由于抽样的加速使 MCMC 方法的总体计算效率仍大为提高。表 7 说明了将本文方法应用在大型电力系统可靠性评估中能有效提高可靠性指标的收敛速度。两种方法分别计算 10 次的结果比较如表 8 所示。

由表 8 可知,利用 MCMC 方法计算 10 次所得到的可靠性指标的方差分别约为 MC 方法的 13.9% 和 1.73%。再次验证了 MCMC 方法应用在大型电力系统可靠性指标的计算中具有很好的稳定性。

表 7 冬大方式下 MC 方法和 MCMC 方法计算 LOLP 的收敛速度比较

Tab. 7 Comparison of convergence of LOLP calculated by MC and MCMC method in winter heavy load mode

方法	β_{LOLP}	抽样次数	所用时间/s
MCMC 方法	0.01	10 001	976
MC 方法	0.01	53 853	1 533

表 8 两种方法的稳定性比较

Tab. 8 Comparison of stability to two methods

方法	P_{LOLP}		$P_{EENS}/(10^4 \text{ kW} \cdot \text{h})$	
MCMC 方法	0.157 76	0.157 00	46 081.284 61	45 799.199 69
	0.157 84	0.157 66	46 090.987 52	46 048.500 61
	0.157 68	0.157 44	46 052.563 25	46 060.576 23
	0.157 78	0.157 69	46 062.817 02	46 191.780 36
	0.156 12	0.156 56	46 205.561 88	46 093.845 15
方差	3.53468×10^{-7}		12 063	
MC 方法	0.156 10	0.155 52	45 746.425 81	46 218.482 18
	0.154 28	0.157 20	45 356.284 11	45 996.247 70
	0.155 02	0.153 86	45 209.709 79	44 317.807 99
	0.155 34	0.152 62	45 689.176 01	44 465.072 80
	0.157 42	0.157 32	47 162.173 52	45 971.401 79
方差	$2.551 93 \times 10^{-6}$		698 810	

4 结论

将基于马尔可夫链的蒙特卡洛模拟方法——MCMC 方法引入到电力系统的可靠性评估,对该方法在大型电力系统可靠性评估中的应用进行了研究,主要研究结论如下:

(1) MCMC 方法是一种特殊的 MC 方法,它将随机过程中的马尔可夫链应用到 MC 模拟中,突破了传统蒙特卡洛法静态模拟的局限,实现了蒙特卡洛法的动态模拟。MCMC 方法继承了传统的蒙特卡洛法的优点,其计算量随系统规模的增长近似呈线性关系。

(2)可靠性评估中使用的样本是极限分布为系统概率分布的元素之间有关联的马尔可夫链,与初始值无关,所以运行多次MCMC方法所得到的结果十分稳定,而MC方法的几次运行结果相差比较大,要想得到稳定的指标就必须增加抽样次数。因此,MCMC方法比MC方法稳定。

(3)应用MCMC方法时,只需要进行较小次数的采样就可以获得较精确的计算结果,减少了采样时间,加快了评估速度。与MC方法相比,MCMC方法收敛速度快,能节省计算时间,显著提高了计算速度。

(4)将MCMC方法应用于24节点可靠性评估系统中进行可靠性指标的计算,验证了本文所提方法计算结果的正确性与有效性。

(5)利用MCMC方法对西北网330 kV可靠性指标进行了计算,简要分析了影响可靠性指标的主要因素,算例再次表明了本文方法应用在大型电力系统可靠性评估中的正确性和优越性。

参考文献

- [1] James C Spall. Estimation via markov chain monte carlo[J]. IEEE Control System Magazine, 2003, 23(2): 35-45.
- [2] Evans M, Swartz T. Method for approximating integrals in statistics with special emphasis on Bayesian integration problems[J]. Statist. Sci, 1995, 10(2): 254-272.
- [3] 曹阳. 居民健康调查资料中的缺失数据的多重估算[J]. 中国卫生统计, 2002, 19(5): 280-282.
Cao Yang. Multiple imputation for missing data on household health survey data[J]. Sanitation Stat. of China, 2002, 19(5): 280-282(in Chinese).
- [4] 马跃渊. 医学数据统计分析中MCMC算法的实现与应用[D]. 西安: 第四军医大学, 2004.
- [5] 王春峰, 万海辉, 李刚. 基于MCMC的金融市场风险Var的估计[J]. 管理科学学报, 2000, 3(2): 54-61.
Wang Chunfeng, Wan Haihui, Li Gang. Estimation of value-at-risk using MCMC[J]. Journal of Science and Management, 2000, 3(2): 54-61(in Chinese).
- [6] 白伟, 何晨, 褚鸿文. MCMC方法及其在移动通信中的应用[J]. 通信技术, 2002, (8): 6-8.
Bai Wei, He chen, Zhu Hongwen. Method and application of MCMC in mobile communications[J]. Communications Technology, 2002, (8): 6-8(in Chinese).
- [7] 张焰. 电网规划中的模糊可靠性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(11): 77-80.
Zhang Yan. The evaluation method of fuzzy reliability in electric power net work planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(11): 77-80(in Chinese).
- [8] 赵渊, 周家启. 大电力系统可靠性评估的解析计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 19-25.
Zhao Yuan, Zhou Jiaqi. An analytical approach for Bulk power systems reliability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 19-25(in Chinese).
- [9] 史进渊, 杨宇. 大型火电机组可靠性的增长模型和现场验证[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 39-41.
Shi Jinyuan, Yang Yu. A reliability growth model for large capacity fossil-fired verification with field data[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 39-41(in Chinese).
- [10] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [11] 万国成, 任震. 混合法在复杂配电网可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 92-99.
Wan Guocheng, Ren Zheng. Hybrid method for the reliability evaluation of the complex distributions system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 92-99(in Chinese).
- [12] 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 Zhaohong, Wang Xifan. Application of Monte Carlo simulation in power system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 68-75(in Chinese).
- [13] 别朝红, 王建华, 王锡凡. 一种减小蒙特卡洛模拟方差的新方法[J]. 中国电力, 1999, 32(12): 41-44.
Bie Zhaohong, Wang Jianhua, Wang Xifan. A new variance reduction technique of Monte Carlo simulation[J]. Electric Power, 1999, 32(12): 41-44(in Chinese).
- [14] 别朝红, 王秀丽, 王锡凡. 电力系统可靠性评估的混合法研究[J]. 中国电力, 2001, 34(3): 25-28.
Bie Zhaohong, Wang Xiuli, Wang Xifan. Studies on hybrid method in composite system reliability evaluation[J]. Electric Power, 2001, 34(3): 25-28(in Chinese).
- [15] 堇光鲁, 钱敏平. 应用随机过程教程及其在算法与智能计算中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [16] Parzen E. Stochastic Processes[M]. New York: Holden-Day, 1962.
- [17] 马跃渊, 徐勇勇, 郭秀娥. MCMC收敛性诊断的方差比法及其应用[J]. 中国卫生统计, 2004, 21(3): 154-156.
Ma Yueyuan, Xu Yongyong, Guo Xiu'e. Variance ratio method and its application for MCMC convergence diagnostics[J]. Sanitation Stat. of China, 2004, 21(3): 154-156(in Chinese).
- [18] Chen R, Liu J S, Wang Xiaodong. Convergence analyses and comparisons of Markov chain Monte Carlo algorithms in digital communications[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2002, 50(2): 255-270.
- [19] Wolff R C, Nur D, Mengersen Kl. Assessment of MCMC convergence: a time series and dynamical systems approach[J]. Proceedings of the 11th IEEE Signal Processing Workshop, 2001, 6(8): 46-49.
- [20] Reliability Test System Task Force. IEEE reliability test system[J]. IEEE Trans. on PWRs, 1999, 14(3): 1010-1020.

收稿日期: 2007-01-15。

作者简介:

石文辉(1981—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统可靠性分析, whshi1981@stu.xjtu.edu.cn;

别朝红(1970—), 女, 博士, 副教授, 从事电力市场规划与可靠性、电力市场方面的研究工作;

王锡凡(1936—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析计算、规划与可靠性, 电力市场等方向的科研工作。

(编辑 王剑乔)