蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用

别朝红　　王锡凡
（西安交通大学电力系　710049　西安）

摘　要　介绍蒙特卡洛法的基本原理及其在电力系统可靠性评估中的应用。通过蒙特卡洛法与解析法的分析比较，阐述了蒙特卡洛法的特点及其适用范围，然后从提高蒙特卡洛法收敛速度的方法、蒙特卡洛法与解析法的结合、蒙特卡洛法中负荷的处理等几个方面较为全面地介绍了蒙特卡洛法在电力系统可靠性评估中的应用现状，并指出了今后的研究方向。

关键词　电力系统　可靠性　蒙特卡洛法　规划

0　前言

随着生产力的飞速发展，现代社会对电力的依赖性日益增加，这对电力系统本身的发展也提出了更高的要求。电力系统的可靠性研究正是从电力系统规划、设计和运行等实践活动中提出来的课题。经济的发展，使人们对供电质量的要求越来越高，这就迫使电力部门寻求提高供电可靠性的途径，电力系统的可靠性也随之成为电力工程技术人员最关心的问题。

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。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系统的约束下，对发输电组合系统的可靠性进行定量评估。其目的是：为电力系统的规划及运行提供决策依据，使电力系统能够经济地、连续地和保证电能质量地供应电力[1]。通常，发输电组合系统的研究可分为充裕度和安全度的研究，充裕度的研究主要是分析稳态情况下系统满足用户电力需求的能力；安全度的研究主要是分析动态情况下系统的抗扰动能力[2,3]。本文主要是从充裕度角度讨论蒙特卡洛法在发输电组合系统可靠性评估中的应用。

下面一些问题的解决需要以发输电组合系统的可靠性定量评估为基础[4]：

（1）确定联络线的最佳传输功率；
（2）进行输电网络的长期规划；
（3）评价特定输电线路扩建方案；
（4）比较不同的输电规划方案；
（5）分析负荷管理（控制）对输电系统的影响；
（6）确定大型发电厂的安装地点；
（7）确定蓄能电站的安装地点；
（8）进行输电和发电的综合平衡。

所以，发输电组合系统的可靠性评估近年来受到了人们的普遍重视。此外，根据美国 EPRI 的研究[5,6]，在发电和输电系统分别发生故障时，发、输电解耦系统并没有出现负荷损失，而在同样的条件下，发输电组合系统则会导致负荷损失，并且其结果对整个电力系统的可靠性有重要的影响。这也从另一个侧面表明了研究发输电组合系统可靠性的重要性。

由于发输电组合系统可靠性评估中有以下特点，因此这一领域的研究同样有重要的理论价值：

（1）系统的规模大　对于发输电组合系统而言，系统通常由数百台机组和数百条母线组成，而且评估中需要进行潮流计算、状态分析和事故后的恢复补救等一系列工作，这就使得发输电组合系统的可靠性评估变得更加复杂和困难。

（2）建模困难　可靠性评估的数学模型应该正确地反映系统中各个元件之间的内在联系，准确描述系统的实际运行情况，这就要求在发输电组合系统的可靠性评估中，其模型不仅要考虑元件的故障模式、发电设备及输电线路的容量约束，还需要考虑元件间的相关性、负荷模型的选取等等。

（3）计算困难　发输电组合系统的规模大，模型所考虑的因素多，理论上，其可靠性评估是非线性、多约束、高维数，具有随机不确定性和模糊不确定性特征的数学求解问题，目前在数学上还没有现成的解法。因此，如何在精度与计算量之间进行适当的平衡，如何寻求快速有效的计算方法，都是需要人们去进一步探索的问题。

在发输电组合系统的可靠性评估中，两种最基本的分析方法是蒙特卡洛法和解析法。蒙特卡洛法在欧洲比较流行，而解析法在北美应用得较多[7]。但

1996－12－19收稿。

对大型系统而言，蒙特卡洛法更富有成效。因此，本文主要介绍蒙特卡洛法的基本原理及其在电力系统可靠性评估中的应用。通过蒙特卡洛法与解析法的分析比较，阐述了蒙特卡洛法的特点及其适用范围，然后从提高蒙特卡洛法收敛速度的方法、蒙特卡洛法与解析法的结合、蒙特卡洛法中负荷的处理等几个方面较为全面地介绍了蒙特卡洛法在电力系统可靠性评估中的应用现状，并指出了今后的研究方向。

1 蒙特卡洛法的基本原理及特点

1.1 蒙特卡洛法概述[8,9]

在电力系统的可靠性评估中，分析过程一般由3个步骤组成：(1)状态选择；(2)状态估计；(3)计算指标。对于蒙特卡洛法和解析法而言，状态估计过程在这两种方法中都是相同的，即对每一被检验的系统状态进行潮流计算，确定线路是否有过负荷出现，母线电压是否在允许的范围之内，判断系统是否出现故障以及采取补救措施后系统的故障状态是否得以缓解。蒙特卡洛法和解析法的差异在于第1步和第3步，即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。

在蒙特卡洛法中，首先要对系统内各个元件的状态抽样，其中系统元件包括各种系统设备(如发电机、线路、变压器等)以及不同的负荷水平。对每一状态 x，都存在与其状态相对应的事件概率 $P(x)$，假定 $F(x)$ 是状态 x 的一次试验，试验结果的期望值由(1)式表示：

$$E(F)=\sum_{x\in X}F(x)\cdot P(x) \tag{1}$$

试验函数 F 的期望值 $\hat{E}(F)$ 由(2)式估计：

$$\hat{E}(F)=\frac{1}{NS}\sum_{i=1}^{NS}F(x_i) \tag{2}$$

其中 $\hat{E}(F)$ 为试验函数 F 期望值的估计值；NS 为总的抽样次数；x_i 是第 i 次的状态抽样值；$F(x_i)$ 是对第 i 次抽样值 x_i 的试验结果。

从(2)式我们可以看出，$\hat{E}(F)$ 不是 $E(F)$ 的真值，只是其估计值。由于 x 和 $F(x)$ 是随机变量，所以 $\hat{E}(F)$ 也是随机变量($\hat{E}(F)$ 是 $F(x)$ 的 NS 次抽样结果的算术平均值)。$E(F)$ 的估计值 $\hat{E}(F)$ 的误差由其方差决定：

$$V(\hat{E}(F))=V(F)/NS \tag{3}$$

其中 $V(F)$ 为试验函数 F 的方差，其值由(4)式估计：

$$\hat{V}(F)=\frac{1}{NS}\sum_{i=1}^{NS}[F(x_i)-\hat{E}(F)]^2 \tag{4}$$

(3)式表明，估计误差与试验函数 F 的方差 $V(F)$ 成正比，而与抽样次数 NS 成反比。

蒙特卡洛法的收敛判据是基于 $E(F)$ 的估计值 $\hat{E}(F)$ 的误差。这个误差通常用方差系数表示：

$$\beta=\frac{\sqrt{V(\hat{E}(F))}}{\hat{E}(F)} \tag{5}$$

将(3)式代入(5)式，有：

$$\beta=\frac{\sqrt{V(F)/NS}}{\hat{E}(F)} \tag{6}$$

经整理有：

$$NS=\frac{V(F)}{(\beta\hat{E}(F))^2} \tag{7}$$

上式表明，蒙特卡洛法的计算量(抽样次数)几乎不受系统规模或复杂程度的影响，因此，该法非常适用于处理各种复杂因素，如相关负荷、共同模式故障以及各种运行控制策略等；而且，还可以看出，该方法的计算量与估计精度的平方成反比，也就是说，在一定的精度下，减少抽样次数的唯一途径就是减小方差，因此，研究各种减小方差的技巧是提高蒙特卡洛法收敛速度的关键。

1.2 蒙特卡洛法与解析法的比较

1.2.1 解析法

在解析法中，故障状态的选择是通过故障枚举法来实现的。即通过故障枚举法首先选择一个停运状态，对此停运状态进行评价(潮流计算)；然后用预先建立的事故准则判断该状态是否属于事故状态，如果属于事故状态就进行优化校正控制，采用相应的补救措施，再进行判断，若仍然属于事故状态，则估计该事故状态可能引起的后果；最后计算该状态对可靠性指标的影响。重复所有的故障状态，就能得到所求的可靠性指标。一般情况下，系统故障停运状态选择是按某种逻辑逐个地选择，例如可以首先检验所有单重偶发事故，继而是双重偶发事故，直至所有状态检验完毕。但是，由于系统状态的数目随着系统内元件数目的增加成指数增长，所以，当系统很大时，要检验所有的状态，计算量是很大的。因此，实用中可采取一些减少计算量的技术。

1.2.1.1 状态空间截断法[10,11]

减少被检验状态数的最明显的方法是忽略那些发生概率很小的状态，在实用中往往忽略那些故障重数超过一定数值的状态。这里隐含着如下假设：r 重故障比 $r-1$ 重故障出现的概率小得多。例如，典

型输电线路的故障率约为0.01，故一般取 $r=2$ 即能满足大多数情况下系统分析的需要，这在实践中已被广为接受。

1.2.1.2　根据故障严重程度对故障状态排序[1,12]

该方法按偶发事故对系统造成的故障的严重程度自动按顺序排列。故障状态选择从最严重的故障开始，逐渐找出严重程度较轻的故障状态，直至那些不会造成系统问题的故障状态为止。

按照过负荷的严重程度对单回线路故障进行排列的方法是采用特性指标 PI，其定义为

$$PI=\sum_i\left(\frac{P_i}{P_{li}}\right)^2 \tag{8}$$

式中　P_i 为线路 i 的潮流；P_{li} 是线路 i 的额定潮流。

排序是建立在求 PI 梯度变化最大的基础上，如果线路 k 被断开，PI 的变化是：

$$\Delta PI=\frac{\partial PI}{\partial B_k}\Delta B_k+\cdots \tag{9}$$

其中　B_k 为线路 k 的电纳。

如果忽略较高阶项，ΔPI 的计算非常快。这样，根据建立起的故障状态排序表，我们就可以首先考虑对系统影响大的严重故障状态而忽略那些对系统影响不大的故障状态，从而减少运算量。

1.2.1.3　上界和下界[4]

该方法是通过对某一可靠性指标，确定其上、下限，使其中间的间隔在被估计的状态越来越多时趋于减少，则故障状态的枚举过程可以得到重大加速。当上、下界靠得充分近并达到分析所要求的精度时，所得的结果就可作为可靠性指标的一个合理的估计值。由于在实际中允许可靠性指标有一定的误差，所以这种方法提供的精度是能满足要求的。

1.2.2　蒙特卡洛法与解析法的比较[13,14]

蒙特卡洛法和解析法是可靠性评估的两种方法，不存在谁优谁劣的问题，两者各有其优缺点和适用范围。

解析法的主要优点是：①物理概念清楚；②模型精度高。它的主要不足在于：①计算量随系统规模的增大而急剧增大，例如，系统有 N 个两状态的元件组成，那么系统的状态数为 2^N；② 不易处理相关事件；③ 只能考虑一个或有限个负荷水平；④ 不易模拟实际的校正控制策略。

蒙特卡洛法的优点是：①该方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；②可以发现一些人们难以预料的事故；③便于处理负荷的随机变化特性；④容易处理各种实际运行控制策略；⑤采样次数与系统的规模无关，在进行复杂系统的可靠性评估时更具有优越性；⑥该方法易于处理系统按时间顺序进行的操作，例如水库的容量、复杂相关的负荷模型等。它的主要不足在于计算时间与计算精度的紧密相关性，也就是说，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。

两种方法的不同特点决定了它们不同的适用范围。解析法在系统组合故障数目比较少时更加有效，也就是说，当元件故障比较稀少但有重大影响，且元件的数目不太多时，解析法可以充分发挥其物理概念清楚、模型准确的优点。比如说，在单纯输电系统可靠性评估时，输电线路的故障率相对较低，组合故障的数目很少，这时采用解析法就更有效。一般来说解析法适合于网络规模较小而网络结构较强的系统。相反，蒙特卡洛法更适于涉及到大量低可靠性的元件，且多重故障影响又不容忽视的系统。比如在发输电组合系统的可靠性评估中，系统包括的元件数目很多，而且发电机的强迫停运率比较高，多重严重故障出现的概率又比较大，所以蒙特卡洛法非常适合应用于发输电组合系统的可靠性评估。因此，一般当网络的规模比较大，且电网结构比较薄弱时，蒙特卡洛法更富有成效。此外，这两种方法可以得到相同的可靠性指标，如：LOLP、EPNS、F&D 等等。但是，应用蒙特卡洛法还可以得到我们感兴趣的一些变量的概率分布，这样，就可以为工程技术人员提供更多的信息，为他们的决策提供更准确的依据[15~18]。

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，但整个网络的运行水平还不是很高，电网的结构还比较薄弱，因此，蒙特卡洛法更适合我国电网的实际情况。此外，蒙特卡洛法更加灵活，更加适合模拟各种复杂的运行控制策略和随机变化的负荷特性。它的主要不足就在于计算时间与计算精度密切相关，计算精度与计算时间的平方成反比。如果能采取一定的方法与技巧，在不损失精度的前提下，有效地减少计算时间，那么蒙特卡洛法就更易被接受了。实际上，不少科研人员正致力于这方面的研究，并且已取得了不少进展。

2　提高蒙特卡洛法收敛速度的方法

如上所述，由于电力系统可靠性模型的复杂性，蒙特卡洛法比解析法更能反映电力系统的实际情况，所以近年来，人们对蒙特卡洛法的研究愈来愈重视[19,20]。其中，如何有效地解决计算精度与计算规模之间的矛盾，一直是各国学者关注的重点。目前，已有的应用蒙特卡洛法对电力系统可靠性进行评估的软件包，如：MEXICO[21]，CONFTRA[22]，TRELSS[23]及 CREAM[24,25]等，都无一例外地采用了不同的减少方差的技术来提高蒙特卡洛法的速度。通常，减少方差的方法有分层抽样法[21]、重要抽样法[22]、控制变量法[24~26]和对偶变数法[27]几种。

2.1 分层抽样法[21,28]

蒙特卡洛法对运行状态的抽样是随机的，然而，在通常情况下，随机抽取的运行状态中有90%都不出现限制负荷。为了更快地计算出我们所需要的可靠性指标，可以对有限制负荷的状态进行加权来计算可靠性指标，这就促使我们对运行状态进行分层，这就是分层抽样法的基本思想。例如，可以根据发出的发电总功率 $\sum P_i$ 来分层，对每一层次的概率有所估计后，就可以通过对每一层次上运行状态的抽样来计算所需的指标。更为一般地说，该方法就是希望从一个变量 W 得到的信息来改进对另一个变量 F 的估计。该方法的关键在于如何合理地分配每一层次上的抽样点数 n_k，使得估计的方差最小。研究表明[29]，n_k 由(10)式求出：

$$n_k = \frac{NS \cdot P_k \cdot \sqrt{V_k}}{\sum_k P_k \cdot \sqrt{V_k}} \tag{10}$$

其中 NS 为总的抽样次数；P_k 为第 k 层上的概率；V_k 为第 k 层上 W 的方差。

根据文献[21]和[28]报道，对于一个有200个节点、600条支路的超高压电力系统而言，这种方法可以使计算时间缩短大约50%左右。

2.2 重要抽样法[22]

重要抽样法的思想就是在保持原样本期望值不变的条件下，改变现有样本空间的概率分布，使其方差减少，以达到降低运算时间的目的。我们可以将(1)式的右侧，分子、分母同乘以一个新的分布函数 $P^*(x)$，得到：

$$E(F) = \sum_{x \in X} \frac{F(x)P(x)}{P^*(x)} P^*(x) \tag{11}$$

令 $F^*(x) = \dfrac{F(x)P(x)}{P^*(x)}$，则：

$$E(F) = \sum_{x \in X} F^*(x)P^*(x) = E(F^*) \tag{12}$$

也就是说，由于 $E(F)$ 与 $E(F^*)$ 相等，我们可以对新分布 $P^*(x)$ 进行抽样，计算新函数 F^*，从而估计 $E(F^*)$ 的值。如果我们选择的新分布能突出“重要事件”(引起系统切负荷的事件)，那么 F^* 的方差将小于 F 的方差。这种方法的关键在于构造最优的 $P^*(x)$，使得我们在对可靠性指标影响比较大的地方多采样，在影响较小的地方少采样，从而最大程度地减少方差。但是，如何构造最优的 $P^*(x)$，人们一直没有找到很好的解决办法，这也限制了该方法的进一步应用[30]。

2.3 对偶变数法[27]

对偶变数法的主要思想为：对于

$$F_\alpha = \frac{1}{2}(F' + F'') \tag{13}$$

如果 F' 与 F'' 具有相同的期望值，则 F_α 的期望值也与之相等。那么，

$$V(F_\alpha) = \frac{1}{4}[V(F') + V(F'') + 2COV(F', F'')] \tag{14}$$

如果变量 F' 与 F'' 负相关，即 $COV(F', F'') < 0$，那么 F_α 的方差就小于 F' 的方差，变量 F'' 就称为 F' 的对偶变数，该方法就称为对偶变数法。

对偶变数法的关键是如何确定与 F' 负相关的 F''。根据文献[27]报道，在一个具有两种负荷水平的系统中，可以对高负荷水平和低负荷水平时的系统交替采样，从而相应地得到两列负相关的变量，此时应用对偶变数法方差减少的效果较好。但在对比利时 SSE(Southern-Southeastern)系统的可靠性评估中，对偶变数法就几乎不起作用。可见，何时应用、如何应用对偶变数法依然是一个值得探讨的问题。

2.4 控制变量法[24~26]

控制变量法是近几年才开始研究的一种方法，该方法的主要思想为：通过控制变量 Z，且 Z 与 F 强正相关，那么定义新变量 Y：

$$Y = F - Z + E(Z) \tag{15}$$

则 $E(Y) = E(F) - E(Z) + E(E(Z)) = E(F)$

$$V(Y) = V(F) + V(Z) - 2COV(F, Z)$$

由于 Z 与 F 强正相关，所以 $V(Y) < V(F)$。从以上讨论，我们可以看出控制变量法的两个特点：第一，它是一个复式估计，即两个随机变量的线性组合；第二，这两个随机变量是强正相关的，并且其中一个随机变量的期望值要已知。该方法的难点在于如何有效地选取控制变量，上面的两个特点就是我们选取控制变量的依据。文献[26]给出了发输电组合系统可靠性评估中可以选取的两种控制变量：一是当负荷给定，由于发电容量不足而引起的切负荷量 UDG_i；二是由于纯输电线路故障而引起的切负荷量 UDT_i。这两个控制变量的数学期望值用解析法都很容易求得，不会增加太多的计算负担，因此选它们作为控制变量比较合适，计算结果也表明了该方法的有效性。

总之，以上各种方法的应用，使得蒙特卡洛法有了更为广阔的应用前景。

3 蒙特卡洛法与解析法的结合

从1.2节的讨论中，我们可以看出蒙特卡洛法与解析法各有所长，且其各自的优缺点互相补充。如果有一种方法，能将这两种方法有机地结合，充分地发挥各自的优点则是最理想的评估方法。混合法正是基于这样的考虑应运而生的，而且，近年来一直是可靠性评估研究中的热点[31]。混合法的主要思想是：由于解析法模型精确，物理概念清楚，在能用解析法

的地方充分利用解析法，在求解规模超过解析法的求解能力时，应用蒙特卡洛法。也就是说在蒙特卡洛法的模拟过程中，尽可能地利用解析法所能提供的信息，以降低模拟统计量的方差，从而显著地减少蒙特卡洛法所消耗的CPU时间。

混合法首先由Clancy D P应用于多区域电力系统的可靠性评估中[32]，其后被用于发输电组合系统的可靠性评估[33,34]。这时的混合法只是蒙特卡洛法和解析法的很直观的推广，也就是根据解析法比较适合用于输电系统的特点，在发输电组合系统的可靠性评估中，对于输电线路的故障采用解析法处理，然后在输电线路发生各种故障的条件下，对发电系统的故障进行采样，应用模拟法进行评估。这种方法的优点就是将系统中适于用解析法处理的部分（输电系统故障）用解析法处理，减少了蒙特卡洛法的采样，从而提高了运算速度。这种方法的不足在于在输电系统故障枚举的过程中，难以确定输电线路故障的严重程度。因为一些纯输电系统中的严重故障，在发输电组合系统中，并不见得是严重的故障。正如文献[35]指出的那样，在MRTS（modified IEEE reliability test system）系统中，发输电组合系统发生最严重的故障时，其中的输电线路并没有停运。

此后，不少学者对混合法进行了进一步的研究，提出了不少新的方法[24,25,36~38]。Li Wenyuan和Billinton R等人提出了随机模拟的方法，将可靠性评估建立在对系统状态及其转移过程的随机模拟基础上，方法的基本着眼点为系统的状态而不是元件。在模拟的过程中，以状态持续时间的期望值代替其抽样值，由此引起的对系统后续状态转移过程的影响，则通过一种递推条件分布来考虑。这样，模拟法与解析法有机地结合起来，在模拟中尽可能地利用解析法所能提供的信息以加快模拟的速度。由于该方法中，假设元件的故障率、修复率以及设备投运的安装时间等均服从已知参数的指数分布，而实际情况不尽如此[9]，这就使该方法的适用范围受到了一定的限制。文献[24,25]提出了另外一种方法，该方法主要通过解析法的模型来减小蒙特卡洛模拟过程中的方差。它将发输电组合系统的可靠性指标$F(x)$分解为三部分之和，即：

$$F(x)=G(x)+T(x)+C(x) \tag{16}$$

其中 $G(x)$为纯发电系统故障对整个系统可靠性指标的影响；$T(x)$为纯输电系统故障对整个系统可靠性指标的影响；$C(x)$为余项，其意义为发电系统和输电系统的组合故障对整个系统可靠性指标的影响。

$G(x)$和$T(x)$都可以利用现有的解析方法很快地求出，那么只需利用蒙特卡洛法对$C(x)$进行估计即可。由于$C(x)$的方差要比$F(x)$小，所以以对$C(x)$的估计代替对$F(x)$的估计，显然会降低运算量，提高运算速度。这种方法为发输电组合系统的可靠性评估提供了一种新思路。但是如何最快地估计出$C(x)$，或者说$F(x)$如何划分最能反映系统的实际情况，还是需要进一步研究的问题。

此外，文献[39]提出了一种伪顺序蒙特卡洛法。该方法分为两级模拟，首先对系统的状态进行随机采样，分析状态，评价系统。如果系统为正常状态，继续采样。如果系统为故障状态，则从这一状态开始进行顺序模拟，直至系统恢复正常状态为止。这种方法将随机模拟与顺序模拟有机地结合，既发挥了模拟法的优点，又避免了顺序模拟法收敛速度上的缺陷。文献[40]则将解析法与模拟法结合，在应用模拟法计算可靠性指标的同时，采用解析法对系统的运行状态进行评估，从而综合考虑了系统的安全性和充裕度，对混合法的应用进行了有益的尝试。

总之，混合法的研究关键是如何使模拟法与解析法有机地结合，使其各自发挥优点，加快计算速度。由于混合法的研究刚起步不久，在这一领域还有许多亟需解决的问题。所以，继续对混合法的研究，探索更为实用的评估方法，必然会推动电力系统可靠性研究的发展。

4 蒙特卡洛法中负荷的处理

系统的可靠性是由发电系统、输电网和负荷三部分共同决定的。前面着重从发输电系统方面进行了讨论，其实，在电力系统可靠性的评估中，负荷的处理同样重要。由于解析法的局限，在应用解析法进行可靠性评估时，不容易模拟负荷的随机变化特性，而蒙特卡洛法则没有这种限制，它可以对负荷进行精确的模拟，使评估的结果更加客观。

蒙特卡洛法中负荷的处理不外乎是确定性和随机性两种模型。确定性的模型，是早期可靠性评估所采用的模型，这种模型显然是不符合实际情况的，因为影响负荷大小的因素非常多，而且有些又是很难预测的，所以很难确切地预测负荷的准确值。负荷的随机模型通常有累计负荷概率分布模型[41]、正态分布负荷[9]、负荷的多级表示法[41]及制表法[42]等。这些随机模型考虑了影响负荷变化的随机因素，为分析不确定环境下的系统可靠性提供了有效的手段。

然而，近年来人们越来越深刻地认识到，随机性只是不确定性的一个方面，它所反映和要处理的只是事件发生的不确定性。而另一种不确定性，即模糊性也是不容忽视的，模糊性所反映和要处理的是事物类属间以及数量上的不清晰性[43]。实际上，在可

靠性评估的过程中，也同样存在着大量的不确定性因素，既有无法确定其是否发生及发生时刻或持续时间的随机因素，又存在着因信息不足无法精确预测其数值的模糊因素，这两种不确定因素对可靠性评估的结果都起着显著的影响。模糊集理论的出现为我们在可靠性评估中考虑负荷的模糊不确定性提供了数学上的工具[44,45]，文献[46]总结了模糊逻辑在可靠性工程中的应用，文献[47]则回顾了模糊集理论在电力系统的应用。由此可见，模糊集理论已被广大的工程技术人员所接受并已应用于电力系统的运行、控制、优化以及故障诊断等各个领域，但是，它在电力系统可靠性评估方面的应用还不多[47,48]。可以说，对这一领域的研究还是电力系统可靠性评估中的一个前沿问题。

文献[49]提出了一种基于概率测度的模糊算法，用以对大容量电力系统的可靠性评估。该方法首先利用概率潮流方法对系统进行分析，然后应用模糊事件的概率评估系统的可靠性。这种方法利用模糊概率这一数学工具，在可靠性评估中同时考虑了随机性和模糊性两种不确定性，使得可靠性评估的结果更加准确、客观。但是由于概率潮流计算复杂，速度较慢，影响了整个评估方法的速度。文献[50]克服了这方面的不足。该方法以模糊数描述负荷，应用蒙特卡洛法对发输电组合系统的可靠性进行评估。在状态估计中，采用最优模糊潮流对系统状态进行分析。模糊最优潮流不仅能提供线路潮流、节点电压等变量的可能性分布情况，而且运算简单有效[51~53]。该方法应用模糊最优潮流较好地处理了可靠性评估中的随机因素和模糊因素，而且模糊最优潮流的计算量与原有的最优潮流的计算量是一个数量级的[50]，这是此算法的优点。它们的不足之处在于：①负荷模糊性的处理上。对各个负荷点采用统一的模糊度，而实际情况中，由于各个负荷点的负荷大小、重要程度不同，人们对它们的认识程度也不完全一样，所以这种处理方法与实际情况还有一定的偏差。②模糊可靠性指标的定义上。将模糊引入可靠性评估中之后，沿用原有的可靠性指标的定义已经不能满足新评估方法的需要。

尽管如此，我们仍可认为该方法是一个很有前途的算法，相信在此基础上能发展出更先进的算法。

5 结论

随着电力系统的迅速发展，系统规模的不断扩大，蒙特卡洛法在电力系统可靠性评估中的应用显示了很大的潜力，其收敛速度与系统规模无关的特点特别适合大型电力系统可靠性的评估。蒙特卡洛法的主要不足就是计算精度与收敛速度之间的矛盾，但是我们可以通过各种方差减小技术来提高蒙特卡洛法的速度。所以，蒙特卡洛法是一种很有前途的可靠性评估方法。这一方法今后的研究方向为：

(1) 对现有的各种提高蒙特卡洛法收敛速度的方法进行研究，提出收敛性好和效率更高的方法，解决模型精度与收敛速度之间的矛盾。

(2) 利用发输电组合系统的特点，研究能够充分利用蒙特卡洛法和解析法优点的混合评估方法，使两者的结合更加合理、完善。

(3) 在可靠性评估中，进一步完善负荷模型，充分考虑负荷的不确定性。

6 参考文献

1 王锡凡，主编. 电力系统优化规划. 北京：水利电力出版社，1991

2 Allan R N, Billinton R. Concepts of Power System Reliability Evaluation. Electrical Power & Energy Systems, 1988, 10(3): 139～141

3 Task Force on Bulk Power System Reliability of the IEEE-PES Application of Probability Methods Subcommittee. Bulk Power System Reliability Concepts and Applications. IEEE Trans on PWRS, 1988, 3(2): 109～117

4 Pereira M V F, Balu N J. Composite Generation/Transmission Reliability Evaluation. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(4): 470～491

5 EPRI. Composite System Reliability Evaluation Methods. Report EL-5178, 1987.7

6 EPRI. Development of Composite System Reliability Evaluation Program—— The CREAM Model. Report EL-6926, 1990.8

7 IEEE. Reliability Assessment of Composite Generation and Transmission Systems. IEEE Tutoririal Course 90EH0311-1-PWR, 1990.2

8 Rubinstein R Y. Simulation and the Monte Carlo Method. New York: John Wiley and Sons, 1981

9 Kalos M H. Monte Carlo Methods. New York: John Wiley and Sons, 1986

10 Billinton R, Allan R N. Reliability Assessment of Large Electric Power Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988

11 Billinton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Power Systems. London: Pitman Advanced Publishing Program, 1984

12 Mikolinnas T A, Wollenberg B F. An Advanced Contingency Selection Algorithm. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(2): 608～617

13 Salvaderi L, Billinton R. A Comparison Between Two Fundamentally Different Approaches to Composite System Reliability Evaluation. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(12): 3486～3492

14 Endrenyi J, Albrencht P F, Billinton R *et al*. Bulk Power Systems Reliability Assessment—— Why and How? IEEE Trans on PAS, 1982, 101(9): 3439～3456

15 Billinton R, Gan L. Use of Monte Carlo Simulation in Teaching Generation Capacity Adequacy Assessment.

IEEE Trans on PWRS,1991,6(4):1571～1577
16 Melo F C G, Pereira M V F, Silva A M L D. Frequency and Duration Calculations in Composite Generation and Transmission Reliability Evaluation. IEEE Trans on PWRS, 1992,7(2):469～476
17 Singh C, Chander T P, Jun Feng. Convergence Characteristics of Two Monte Carlo Models for Reliability Evaluation of Interconnected Power Systems. Electric Power Systems Research, 1993,28(1):1～9
18 Sankarakrishnan A, Billinton R. Sequential Monte Carlo Simulation for Composite Power System Reliability Analysis with Time Varying Loads. IEEE Trans on PWRS, 1995,10(3):1540～1545
19 Schilling M T, Billinton R, Silva A M L D *et al*. Bibliography on Composite System Reliability (1964～1988). IEEE Trans on PWRS, 1989,4(3):1122～1132
20 Allan R N, Billinton R, Breiphl A M *et al*. Bibliography on the Application of Probability Methods in Power System Reliability Evaluation (1987～1991). IEEE Trans on PWRS, 1994,9(1):41～49
21 Dodu J C, Merlin A. An Application of Linear Programming to the Planning of Large Scale Power Systems: The MEXICO Model. Cambridge, In Proc. 5th PSCC, 1975.9
22 Cunha S H F, Pereira M V F, Oliverira G C, *et al*. Composite Generation and Transmission Reliability Evaluation Large Scale Hydroelectric Power Systems. IEEE Trans on PAS, 1985,104(10):2657～2663
23 Bhavaraju M P, Balu N J, Lauby M G. Transmission System Reliability Evaluation of Large Scale Systems. Montreal: CIGRE Symposium, 1991, 1A/11
24 Pereira M V F, Pinto L M V G. A New Computational Tool for Composite Reliability Evaluation. IEEE Trans on PWRS, 1992,7(1):258～264
25 Pereira M V F, Macetra M E P, Oliverira G C *et al*. Combining Analytical Methods and Monte Carlo Techniques in Probabilistic Power System Analysis. IEEE Trans on PWRS, 1992,7(1):265～272
26 Oliverira G C, Pereira M V F, Cunha S H F. A Technique for Reduced Computational Effort in Monte Carlo Based Composite Reliability Evaluation. IEEE Trans on PWRS, 1989,4(4):1309～1315
27 Anders G J, Endrenyi J, Pereira M V F *et al*. Fast Monte Carlo Simulation Techniques for Power System Reliability Studies. Paris: CIGRE Symposium, 1990: 38～205
28 Pouget J 著.电网.李文沅译.重庆:重庆大学出版社,1988
29 Aug A H, Tang W H. Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume Ⅱ: Decision, Risk and Reliability. New York: John Wiley and Sons, 1984
30 EPRI. Comparison of Algorithms for Computing Generation System Reliability Indices. Report EL-2874, 1983.3
31 Schilling M T, Filho M B D C, Silva A M L D *et al*. An Integrated Approach to Power System Reliability Assessment. Electrical Power & Energy Systems, 1995,17(6):381～390
32 Clancy D P, Gross G, Wu F F. Probabilistic Flows for Reliability Evaluation of Multi-Area Power System Interconnection. Electrical Power & Energy Systems, 1983,5(2):101～114
33 EPRI. Composite System Reliability Evaluation: Phase Ⅰ:Scoping Studies. Report EL-5290,1987.12
34 EPRI. Composite System Reliability Evaluation Methods. Peport EL-5178,1987.6
35 Filho R F, Pereira M V F. Development of a Composite Reliability Program for Brazilian System——Proposal and Status of Ongoing Research. San Francisco: In Proc of 2nd Int Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, 1988.9
36 Billinton R, Li W. Hybrid Approach for Reliability Evaluation of Composite Generation and Transmission Systems Using Monte Carlo Simulation and Enumeration Technique. IEE Proc-C, 1991, 138(3): 233～241
37 Billinton R, Li W. A System State Transmission Sampling Method for Composite System Reliability Evaluation. IEEE Trans on PWRS, 1993,8(3):761～767
38 Kumamoto H, Tanaka K, Inoue K *el al*. State-Transition Monte Carlo for Evaluating Large Repairable Systems. IEEE Trans on Reliability, 1980, 29(12)
39 Mello J C O, Pereira M V F, Silva A M L D. Evaluation of Reliability Worth in Composite Systems Based on Peseudo-Sequential Monte Carlo Simulation. IEEE Trans on PWRS, 1994,9(3):1318～1326
40 Khan M E, Billinton R. A Hybrid Model for Quantifying Different Operating States of Composite Power Systems. IEEE Trans on PWRS, 1992,7(1): 187～193
41 Endrenyii J. Reliability Model in Electric Power Systems. New York: John Wiley and Sons, 1978
42 Li W, Billinton R. Effect of Bus Load Uncertainty and Correlation in Composite System Adequacy Evaluation. IEEE Trans on PWRS, 1991,6(4):1522～1529
43 刘锡荟,王海燕.网络模糊随机分析——原理、方法与程序.北京:电子工业出版社,1991
44 Zadeh L A. Fuzzy Sets. Information and Control, 1965,8(3):338～353
45 Zimmermann H J. Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991
46 Boles J B, Pelaez C E. Application of Fuzzy Logic to Reliability Engineering. Proc of the IEEE, 1995, 83(3):435～449
47 Mmoh J A, Ma X W, Tomsovic K. Overview and Literature Survey of Fuzzy Sets Theory in Power Systems. IEEE Trans on PWRS, 1995,10(3):1676～1690
48 Haubrich H J, Seitz T H, Bovy A. Fuzzy Sets in Reliability Analysis of Power Systems. Melbourne: 1993 Export System Application to Power Systems, 1993.1:212～217
49 Ling J M,Lin C E,Huang C L. Probability Measure of Adequacy Assessment Using a Fuzzy Approach. Electric Power System Research, 1995,33(1):7～15

50 Saraiva J T, Miranda V, Pinto L M V G. Generation/Transmission Power System Reliability Evaluation by Monte Carlo Simulation Assuming a Fuzzy Load Description. IEEE Trans on PWRS, 1996,11(2):690～695

51 Miranda V, Matos M. Distribution System Planning with Fuzzy Models and Techniques. Brighton: Proc of CIRED 1989, 1989.8: 472～476

52 Miranda V, Matos M, Saraiva J T. Fuzzy Load Flow-New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and load Representation. Graz: Proc of the 10th PSCC, 1990.2

53 Miranda V, saraiva J T. Fuzzy Modeling of Power System Optimal Load Flow. IEEE Trans on PWRS, 1992,7(2):843～849

别朝红,女,1970年生,在读博士研究生,从事电力系统规划及可靠性方面的研究工作。

王锡凡,男,1936年生,教授,长期从事电力系统分析与规划方面的科研与教学工作。

THE APPLICATION OF MONTE CARLO METHOD TO RELIABILITY EVALUATION OF POWER SYSTEMS

Bie Zhaohong, Wang Xifan (Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, China)

Abstract The paper surveys basic principles of Monte Carlo method and its application to reliability evaluation of power systems. By comparison with the enumeration approach, its features and application scope are presented. Furthermore, the approach for improving the convergent speed, the combination of Monte Carlo method and the enumeration approach and load models used in evaluation are summarized in detail. At last, some valuable ideas and future works are proposed.

Keywords power system reliability Monte Carlo method planning