

基于马尔科夫链的电力系统运行可靠性快速评估

王勇¹, 韩学山¹, 丁颖², 绳洁³

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东省 济南市 250061;
2. 国网技术学院, 山东省 济南市 250002; 3. 聊城供电公司, 山东省 聊城市 252000)

Markov Chain-Based Rapid Assessment on Operational Reliability of Power Grid

WANG Yong¹, HAN Xueshan¹, DING Ying², SHEN Jie³

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control (Shandong University), Ministry of Education, Jinan 250061, Shandong Province, China; 2. State Grid of China Technology College, Jinan 250002, Shandong Province, China;
3. Shandong Liaocheng Power Supply Company, Liaocheng 252000, Shandong Province, China)

ABSTRACT: In view of the defects in power system reliability analysis that Monte Carlo simulation needs a lot of computational resources and it converges slowly, from the viewpoint of operation and based on Markov chain and under the premise that equipment failure rate complies with exponential distribution characteristics, a model, by which fast analytical analysis on power system operation reliability can be carried out, is proposed. The core of the proposed model lies in following aspects: firstly, a criterion to dividing power system operating conditions into three categories, which can be easily implemented in engineering practice, as well as corresponding state space transition expression are proposed; secondly, based on historical operation data or simulation data of power system, a Markov state transition probability matrix equivalent to power system operation is attained; thirdly, on this basis utilizing state transition probability matrix and current power system operating condition, such reliability indices for some time to come as operation state transition probability, steady state probability and mean time to first failure of power system can be rapidly analyzed to implement rapid assessment of power system operation reliability. Simulation results of RBTS-BUS6 system prove the Markov property of power system state transition and the effectiveness of this research.

KEY WORDS: Markov chain; power system; reliability assessment; reliability prediction

摘要: 针对电力系统可靠性分析中蒙特卡罗模拟法需要大量计算资源和收敛速度较慢的缺点,从运行角度出发,在设备具备故障率指数分布特性前提下,基于马尔科夫链,建立可快速对电力系统运行可靠性解析分析的模型。其核心体现在:首先,提出便于工程实现的电力系统运行状态划分为 3

类的准则,及其对应的状态空间转移表达;然后,基于电力系统运行历史数据样本(或模拟数据样本)得到电力系统运行等值的马尔科夫状态转移概率矩阵。在此基础上,利用状态转移概率矩阵和电力系统运行当前的状态,可快速解析未来一段时间内电力系统运行状态转移概率、平稳状态概率及首次故障平均时间等可靠性指标,实现电力系统运行可靠性的快速评估。RBTS 6 节点算例的分析,验证了电力系统状态转移的马尔科夫特性,表明了该研究的有效性。

关键词: 马尔科夫链;电力系统;可靠性评估;可靠性预测

0 引言

从概率角度,实施运行环境下电力系统运行可靠性水平的评估与预测,对电力系统运行调控策略的科学制定显得越来越重要^[1]。

由于电力系统规模大,元件数量多,当前电力系统可靠性评估多采用蒙特卡罗模拟法^[2-5]。但因模拟法需要的计算资源大,收敛速度慢等缺点,难以在运行环境下使用。为此,有文献采用模拟与解析混合的形式^[6],或试图直接采用解析的方法^[7-8],以快速获得可靠性指标。文献[6]将基于马尔可夫链的蒙特卡洛方法引入到电力系统运行可靠性评估研究中,但在元件状态取样时使用 Gibbs 抽样器来产生模拟所需要的马尔可夫链,虽然可以提高蒙特卡罗法的收敛速度,却并不能从根本上弥补模拟法的缺陷。文献[8]基于最小割集思想,提出发电组合电力系统概率密度分布的解析计算方法,但尚处于理论探讨阶段,难于用于工程实际中。

显然,目前电力系统可靠性研究多是以当前可靠性水平判定为焦点,其实质还是一种计算方法的研究,其研究结果不能满足运行条件下对计算时间

基金项目:国家自然科学基金项目(51077087, 51007047)。

Project Supported by National Natural Foundation of China (NSFC) (51077087, 51007047) .

的要求, 只能离线使用。同时, 在运行环境下, 掌握目前运行可靠性水平是基础, 预测未来电力系统运行可靠性水平变化是关键, 也是电网运行控制的根本。

马尔科夫过程的“无记忆性”, 即过去(当期以前的历史状态)对于预测将来(当期以后的未来状态)是无关的, 使得可以在给定当前知识或信息的情况下, 预测将来的发展过程, 目前已应用于电力系统安全性评价与预测^[9]、设备检修决策^[10]、最优变压器备用方案确定^[11]、继电保护系统可靠性分析及冗余配置^[12-13]、负荷预测^[14]及光伏发电系统输出功率预测^[15]等领域。

由此, 基于马尔科夫链, 本文从整个电力系统运行的角度, 提出可靠性等值的模型和分析方法, 实现电力系统当前可靠性水平的评估, 以及快速预测电力系统可靠性的发展趋势。首先定义了便于工程实现的电力系统状态; 然后利用历史的数据样本(因缺乏历史数据, 本文中基于序贯蒙特卡罗方法)模拟电力系统在连续时间断面上的状态, 并统计每个时间断面的电力系统状态分布及相邻时间断面的电力系统状态转移, 得到马尔科夫状态转移矩阵, 利用电力系统状态转移矩阵和初始电力系统状态, 快速解析获得电力系统未来状态概率分布的变化及其平稳的状态概率。最后利用 RBTS 6 节点算例论证本文方法的有效性。

1 马尔科夫链

1.1 马尔科夫链的基本概念

取值在离散状态空间 $E=\{e_1, e_2, \dots\}$ 和离散时间参数上的随机过程 $\{X(t)|X(t) \in E, t \geq 0\}$, 对于任意时刻点 $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$, 其 t_n 时刻的概率可由条件概率定义, 如式(1)所示。

$$F_{X(t_n)|X(t_1) \cdots X(t_{n-1})} = P[X(t_n) = e_n | X(t_1) = e_1 \cdots X(t_{n-1}) = e_{n-1}] \quad (1)$$

若该随机过程满足式(2)要求, 即具备“无记忆性”的特性, 则该随机过程称为马尔科夫链(Markov Chain)。

$$F_{X(t_n)|X(t_{n-1})} = F_{X(t_n)|X(t_1) \cdots X(t_{n-1})} \quad (2)$$

1.2 状态转移概率矩阵

假设随机过程为齐次马尔科夫过程, 即满足式(3)要求。

$$\begin{aligned} P[X(t+\Delta t) = e_j | X(t) = e_i] = \\ P[X(\Delta t) = e_j | X(0) = e_i] = p_{ij}(\Delta t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $p_{ij}(\Delta t)$ 为时间间隔 Δt 内, 状态 e_i 与 e_j 间的转移概率函数。

对于由 n 个状态组成的状态空间, 转移概率可表示为矩阵形式, 记为

$$P(\Delta t) = \begin{bmatrix} p_{11}(\Delta t) & p_{12}(\Delta t) & \cdots & p_{1n}(\Delta t) \\ p_{21}(\Delta t) & p_{22}(\Delta t) & \cdots & p_{2n}(\Delta t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}(\Delta t) & p_{n2}(\Delta t) & \cdots & p_{nn}(\Delta t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

显然, 式(4)具有如下性质

$$\begin{cases} p_{ij}(\Delta t) \geq 0, i, j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n p_{ij}(\Delta t) = 1, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

若 t_1, t_2, \dots, t_n 时间间隔相同, 根据齐次性, 式(4)可简记为

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

可见, 当样本数量足够时, 可根据 t_i 及 t_{i+1} 时刻系统状态的变化, 统计获得满足误差要求的系统状态转移概率矩阵 P 。这样, 每增加一组样本, P 最多有一行的值会发生变化, 行数对应 t_i 时刻的系统状态。理想情况, 当样本数量 $\rightarrow \infty$ 时, P 的统计值将无限趋近于其真实值。

2 电力系统状态划分

根据不同的可靠性准则评价电力系统运行时, 可进行不同的状态划分, 当电力系统运行处于或趋近于不满足可靠准则要求的状态时, 电力系统运行人员将采取必要的措施, 促使电力系统运行可靠性重新恢复到可接受的水平。

由此, 需要定义相应的准则, 保证电力系统运行人员方便地对其可靠性水平进行评判。

基于概率的电力系统可靠性分析通常将其运行的状态分为 2 种: 即正常状态(Normal)和风险状态(At Risk)。20 世纪 90 年代, Billinton 教授进一步将正常状态又划分为健康状态(Healthy)和临界状态(Marginal)^[16]。临界状态意味无计划外切负荷, 但不满足 $N-1$ 原则。

一般看来, 依据概率准则, 电力系统运行时状态划分的越细致, 对安全控制的指导意义越明确, 不过为获得电力系统状态的划分所需计算资源的负担也越大。

可见,在运行环境下,究竟将电力系统运行状态划分到什么程度,是一个折中的决策问题。划分得越细致,往往为减少计算负担又在其中做了若干简化,最终也难以符合实际,如是否满足 $N-1$ 原则,的确是一个重要的指标,但在分析时,电力系统的冗余性,以及备用设备的配置,不仅使分析复杂,计算速度下降,而且有时也无法考虑完全,即使考虑往往也是保守的。

因此进行运行时的电力系统可靠性分析,电力系统运行状态的划分以适中为宜。对此,本文将电力系统运行的状态划分为如下 3 种。

状态 1(正常状态):在此状态下,电力系统中无元件故障,也无计划外切负荷,即此时电力系统在计划方式下运行,必满足 $N-1$ 要求。

状态 2(事故状态):在此状态下,电力系统中有元件故障,但系统投入备用元件或经再调整后,无需切负荷,此时,可能会因元件故障,有暂时性的停电,但能在较短的时间内恢复,短时停电造成的负荷缺失可忽略不计。

状态 3(风险状态):在此状态下,系统中某些约束无法得到满足,经再调整后,依然要切除部分负荷才能保证系统的安全、稳定运行,此状态需较长的恢复时间,对电力系统可靠性指标影响较大。

显然,本文定义的事故状态较之临界状态,范围有所扩大,但无需校验 $N-1$ 原则,无论用于工程实际数据的统计还是模拟分析,都比较简捷,可更好地满足运行条件下对计算时间的要求。

3 电力系统的马尔科夫链模型

3.1 电力系统 3 状态模型

电力系统运行的 3 状态模型的状态空间为 $E=\{1, 2, 3\}$, 其状态转移可描述成图 1 所示。

其状态转移概率矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 1-p_{12}-p_{13} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & 1-p_{21}-p_{23} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & 1-p_{31}-p_{32} \end{bmatrix} \quad (7)$$

3.2 电力系统 m 步状态转移

行向量 $\Pi(i)$ 为 t_i 时刻的电力系统状态分布,定义如下:

$$\Pi(i) = \begin{bmatrix} \pi_1(i) \\ \pi_2(i) \\ \pi_3(i) \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} P[X(t_i)=e_1] \\ P[X(t_i)=e_2] \\ P[X(t_i)=e_3] \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

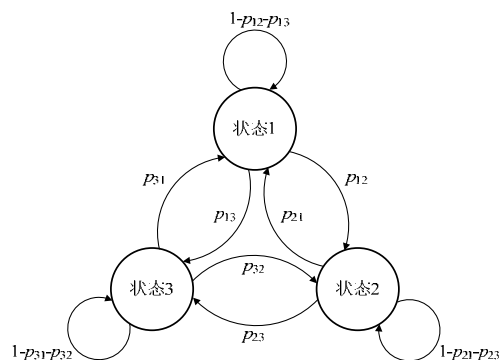


图 1 系统状态空间转移图

Fig. 1 Transitive graph of the system state space

假设电力系统初始状态为 $\Pi(0)$, 由电力系统状态转移概率矩阵 P 的定义, 经过 Δt 后, 下一个时刻的电力系统状态分布为

$$\Pi(1) = \Pi(0)P \quad (9)$$

显然, 再经过 Δt 后的电力系统状态转移为

$$\Pi(2) = \Pi(1)P = \Pi(0)P^2 \quad (10)$$

依此, 经过 m 个 Δt 后的电力系统状态转移为

$$\Pi(m) = \Pi(m-1)P = \Pi(0)P^m \quad (11)$$

在已知 $\Pi(0)$ 和 P 的前提下, 可快速解析获得未来每隔 Δt 时间间隔后电力系统状态分布的稳态值。

3.3 电力系统平稳状态概率

当时间间隔的数量 $n \rightarrow \infty$ 时, 电力系统的状态也趋近于某一稳定值, 此值称之为电力系统的平稳状态概率或长期状态概率。

$$\Pi(\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Pi(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \Pi(0)P^n \quad (12)$$

平稳状态概率表示无论电力系统初始状态是什么, 经过足够长的时间后, 处于状态 i 的概率都将接近于 $\pi_i(\infty)$ 。

当电力系统平稳状态概率存在时

$$\Pi(\infty)P = \Pi(\infty) \quad (13)$$

式(13)有如下等效变换

$$\Pi(\infty)(P - I) = 0 \quad (14)$$

由于式(14)的 n 个方程中只有 $n-1$ 个独立, 因此, 需要与式(15)联立求解, 可得到系统的平稳状态概率

$$\sum_{i=1}^n \pi_i(\infty) = 1 \quad (15)$$

3.4 电力系统可用度

将电力系统状态空间 E 分成 2 类, 可接受状态 W 和不可接受状态 U , 分别记为 $W=\{e_1, e_2\}$, $U=\{e_3\}$ 。

电力系统可用度 $A(i)$ 定义为 t_i 时刻电力系统处

于可接受状态的概率，有

$$A(i) = \sum_{j \in W} \pi_j(i) = \pi_1(i) + \pi_2(i) = 1 - \pi_3(i) \tag{16}$$

相应地，式(7)也可以写为分块矩阵的形式

$$P = \begin{bmatrix} B & C \\ D & E \end{bmatrix} \tag{17}$$

式中： B 为2阶方阵，表示电力系统在可接受状态间转移的概率； C 为电力系统从可接受状态向不可接受状态转移的概率； D 为电力系统从不可接受状态向可接受状态转移的概率； E 为电力系统在不可接受状态间转移的概率。

3.5 电力系统首次故障前平均时间

将电力系统的不可接受状态置为吸收状态，即令式(17)中的 $D=0, E=I$ ，得到一个新的马尔科夫模型，则电力系统的首次故障前平均时间为

$$T_{av} = \int_0^{\infty} A(i)dt = \Delta t \sum_{i=0}^{\infty} (1 - \pi_3(i)) \tag{18}$$

4 算例分析

因缺乏实际运行数据的积累，为测试本文方法的有效性，本文以RBTS 6节点电网作为测试系统。图2为RBTS 6节点等值电网接线图，图中包括拓扑结构和发电机组、负荷基本数据，该系统详细数据见文献[17]。

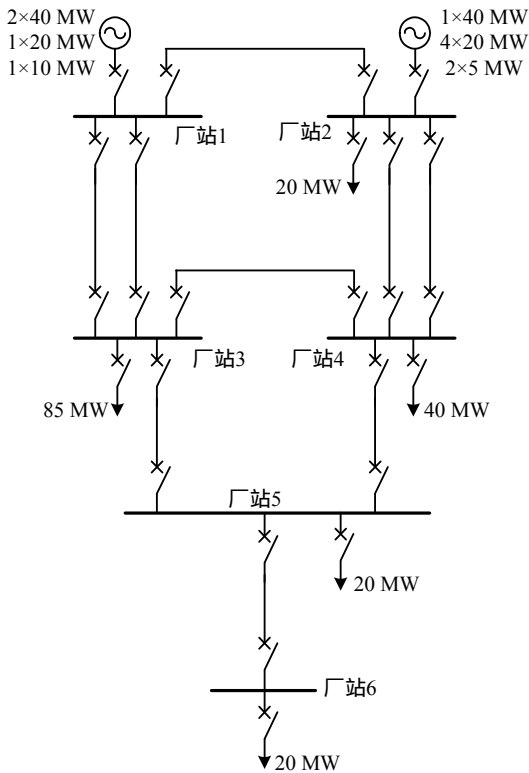


图2 RBTS 6节点等值电网接线
Fig. 2 Equivalent network of RBTS-Bus6 system

本算例只为验证电力系统运行的马尔科夫特性，因此仅考虑断路器的随机故障，设 Δt 时间间隔内的故障概率为 0.000 5，修复概率为 0.014，其他元件故障概率均设为 0。

本文首先利用序贯蒙特卡罗方法对 RBTS 6 节点系统进行了 8 000 次模拟分析，每次模拟 300 个时间间隔。

统计系统状态在这些间隔内的分布及相邻时间间隔系统状态的变化情况，结果见表 1。

由统计结果可知，RBTS 6 节点系统在假设条件下主要处于状态 1 和状态 2，只有极少数时间间隔内存在非计划切负荷。

表 1 RBTS 6 节点系统状态转移数据
Tab. 1 Data on system station switch for RBTS 6

初始状态 e_i	转移状态 e_j			合计
	e_1	e_2	e_3	
e_1	1 142 465	15 314	38	1 157 817
e_2	10 468	1 188 382	5 652	1 204 502
e_3	30	5 514	24 137	29 681
合计	1 152 963	1 209 210	29 827	2 392 000

由表 1 数据可获得系统状态转移概率矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0.986\ 741 & 0.013\ 227 & 0.000\ 033 \\ 0.008\ 691 & 0.986\ 617 & 0.004\ 692 \\ 0.001\ 011 & 0.185\ 775 & 0.813\ 214 \end{bmatrix} \tag{19}$$

系统状态转移概率矩阵 P 的物理意义为：假设系统状态在上一个时间间隔处于状态 1，则在下一个时间间隔有 0.986 741 的概率保持在状态 1；有 0.013 227 的概率转移到状态 2，有 0.000 033 的概率转移到状态 3。

每次模拟都假设 $t=0$ 时无故障，也就是说，每次模拟都从状态 1 开始，即

$$\Pi(0) = [1\ 0\ 0] \tag{20}$$

将式(19)(20)代入式(9)(11)，经过 300 次矩阵乘法运算，可快速解析获得 $\Pi(1)-\Pi(300)$ 的值，所需时间为 0.188 s，相比蒙特卡罗模拟，计算时间可忽略不计。相应的，分别统计每次模拟第 1 个时间间隔到第 300 个时间间隔系统处于各个状态的次数，可以得到 $\Pi(1)-\Pi(300)$ 对应的统计值 $\Pi'(1)-\Pi'(300)$ 。 $\Pi(1)-\Pi(300)$ 与 $\Pi'(1)-\Pi'(300)$ 对应元素的对比如图 3 所示。可以看到统计值与解析值的走势基本一致。

利用式(21)可获得每个时间断面解析值与统计值的误差百分数。

$$\delta_i(j) = \frac{\pi_i(j) - \pi'_i(j)}{\pi_i(j)} \times 100\% \tag{21}$$

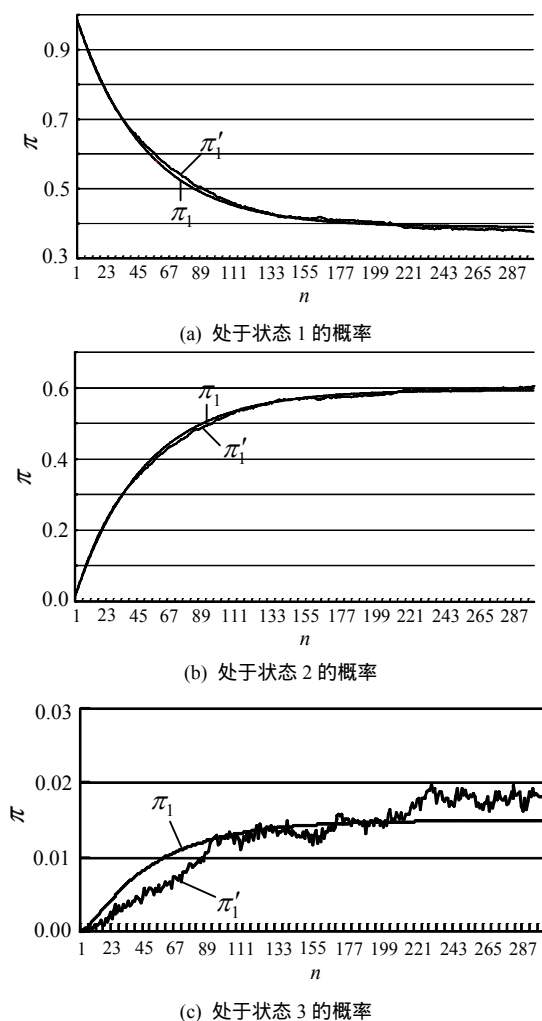


图 3 300 时间间隔内系统状态解析值与统计值对比
Fig. 3 Contrast between analysis and statistical value of system state through 300 interval

式中： $i=1,2,3$ ； $j=1,2,\dots,300$ 。则 20 个时间断面的平均误差为

$$\delta_i = \frac{1}{20} \sum_{j=1}^{20} |\delta_i(j)| \times 100\% \quad , \quad i=1,2,3 \quad (22)$$

利用式(21)(22)可求得 300 个时间断面系统状态处于状态 1、状态 2 和状态 3 的解析值与统计值的平均误差分别为：1.56%、1.36%、19.63%。

系统状态处于状态 3 时，误差较大的原因主要在于：模拟过程中处于状态 3 的样本数量较少，造成 $\pi'_3(j)$ 的基数较小，从而导致模拟的误差较大。

利用式(14)(15)，可以求得本算例的系统平稳状态概率 $\Pi(\infty)=[0.3907 \ 0.5943 \ 0.015]$ 。

由图 3 可以看到，解析值在 200 个时间断面后已经基本收敛于 $\Pi(\infty)$ 。统计 8 000 次模拟中，第 201 时间断面到第 300 时间断面处于状态 1、状态 2 和状态 3 的次数分别为：309 975、476 956、13 069，得到 $\Pi(\infty)$ 的统计值 $\Pi'(\infty)=[0.3875 \ 0.5962 \ 0.0163]$ 。

$\Pi(\infty)$ 与 $\Pi'(\infty)$ 中各元素的误差分别为：0.83%、0.32%、8.17%。误差与处于每个状态的次数成反比，显然主要是由蒙特卡罗模拟的计算误差引起的。

统计 $\Pi(201)-\Pi(300)$ 中处于 3 个状态概率的理论误差分别为：0.45%、0.26%、1.91%。显然，由于系统状态转移概率矩阵 P 的统计误差对结果的累积影响也不容忽视，对于转移次数较少的参数，需要进一步增加统计次数或模拟次数。

由于本算例中各个元件的故障概率值较小，使得 8 000 次模拟结果中只有 3 030 次系统进入状态 2，无法精确统计出故障前平均时间。因此，将 Δt 时间间隔内断路器的故障概率调整为 0.113 1，修复概率调整为 0.285 4，重新进行模拟，统计得

$$P = \begin{bmatrix} 0.022\ 727 & 0.886\ 364 & 0.090\ 909 \\ 0.000\ 008 & 0.848\ 090 & 0.151\ 902 \\ 0 & 0.590\ 930 & 0.409\ 070 \end{bmatrix} \quad (23)$$

则将系统的不可接受状态置为吸收状态后，新的系统状态转移概率矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 0.022\ 727 & 0.886\ 364 & 0.090\ 909 \\ 0.000\ 008 & 0.848\ 090 & 0.151\ 902 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

由式(18)可求得故障前平均时间为 6.994 1，由统计结果获得故障前平均时间为 7.614。

由以上分析可知，由状态转移概率矩阵 P 和当前系统状态直接获得的电力系统状态转移概率的解析值与由蒙特卡罗模拟结果获得的统计基本一致，其误差在蒙特卡罗模拟误差范围内，说明电力系统状态的随机过程具有马尔科夫性。

5 结语

本文对电力系统的运行状态进行了划分，得到了 3 状态模型，较传统模型，更为简单、实用。论证了电力系统状态空间转移的马尔科夫性，在足够多样本数量的支持下，可以统计出系统状态转移概率矩阵 P ，由 P 和当前系统状态，可快速解析获得未来一段时间处于各系统状态的概率变化、系统平稳状态概率及首次故障前平均时间等可靠性指标，根据 Δt 取值的不同，可分别应用于电力系统的运行、检修及规划。

当然，随着电力系统数字化建设水平的不断提升，用电力运行中的实际样本来代替上述模拟，在具备一定积累条件下，可预先统计获得各运行方式下的系统马尔科夫模型，有望据此实现电力系统可

可靠性的实时分析。因此，本文的研究不仅有理论意义，对适应未来电网有重要的现实价值。

参考文献

- [1] 李文沅. 电力系统风险评估—模型、方法和应用[M]. 周国启, 卢继平, 胡小正等译. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] Billinton R, Wangdee W. Predicting bulk electricity system reliability performance indices using sequential Monte Carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 909-917.
- [3] 张硕, 李庚银, 周明. 含风电场的发输电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 8-14.
Zhang Shuo, Li Gengyin, Zhou Ming. Reliability assessment of generation and transmission systems integrated with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 8-14(in Chinese).
- [4] 刘洋, 谢开贵, 周国启, 等. 大电力系统可靠性评估高性能计算平台设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(18): 89-93.
Liu Yang, Xie Kaigui, Zhou Jiaqi, et al. Design and implementation of HPC platform for bulk power system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 89-93(in Chinese).
- [5] 宋晓通, 谭震宇. 基于最优抽样与选择性解析的电力系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 9-14.
Song Xiaotong, Tan Zhenyu. Power system reliability evaluation based on optimal sampling and selective analysis algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 9-14(in Chinese).
- [6] 石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔科夫链蒙特卡洛方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 9-15.
Shi Wenhui, Bie Zhaozhong, Wang Xifan. Applications of Markov chain Monte Carlo in large-scale system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 9-15(in Chinese).
- [7] 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 Zhijian, Zhou Niancheng, 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(in Chinese).
- [8] 赵渊, 谢开贵. 电网可靠性指标概率密度分布的解析计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4): 31-38.
Zhao Yuan, Xie Kaigui. An analytical approach to compute the probability density distributions of reliability indices for bulk power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(4): 31-38(in Chinese).
- [9] Suad S H, Gubina F, Gubina A F. Prediction of power system security levels[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 368-377.
- [10] 廖瑞国, 肖中男, 巩晶, 等. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 322-328.
Liao Ruijin, Xiao Zhongnan, Gong Jing, et al. Markov model for reliability assessment of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 322-328(in Chinese).
- [11] 谢开贵, 马怀冬, 胡博, 等. 基于马尔科夫状态空间图法的换流变系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 71-77.
Xie Kaigui, Ma Huaidong, Hu Bo, et al. Reliability evaluation of converter transformer system in HVDC transmission system based on Markov state space graph algorithm[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 71-77(in Chinese).
- [12] 张雪松, 王超, 程晓东. 基于马尔科夫状态空间法的超高压电网继电保护系统可靠性分析模型[J]. 电网技术, 2008, 32(13): 94-99.
Zhang Xuesong, Wang Chao, Cheng Xiaodong. Reliability analysis model for protective relaying system of UHV power network based on Markov state-space method[J]. Power System Technology, 2008, 32(13): 94-99(in Chinese).
- [13] 刘耀, 王明新, 曾南超. 高压直流输电保护装置冗余配置可靠性的接续分析[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 93-99.
Liu Yao, Wang Mingxin, Zeng Nanchao. Sequential reliability analysis on redundant configuration of protective devices for HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 93-99(in Chinese).
- [14] 刘文茂, 杨昆, 刘达, 等. 基于隐马尔科夫误差校正的日前电价预测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 34-37.
Liu Wenmao, Yang Kun, Liu Da, et al. Day-ahead electricity price forecasting with error calibration by hidden Markov model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 34-37(in Chinese).
- [15] 丁明, 徐宁舟. 基于马尔科夫链的光伏发电系统输出功率短期预测方法[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 152-157.
Ding Ming, Xu Ningzhou. A method to forecast short-term output power of photovoltaic generation system based on Markov Chain[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 152-157(in Chinese).
- [16] Billinton R, Fotuhi-Firuzabad M. A basic framework for generating system operating health analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1610-1617.
- [17] Billinton R, Kumar S, et al. A reliability test system for education purposes: basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(8): 67-68.

收稿日期: 2012-04-20.

作者简介:

王勇(1975), 男, 副教授, 博士, 主要从事电力系统可靠性方向的教学和研究工作, E-mail: yonwong@sdu.edu.cn;

韩学山(1959), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制领域的教学和研究工作;

丁颖(1973), 女, 副教授, 主要从事电力系统



王勇

运行与控制领域的研究和教学工作;

绳洁(1981), 女, 工程师, 主要从事需求侧管理和营销稽查等工作。

(责任编辑 王晔)