

DOI: 10.7667/PSPC161513

# 电力系统随机生产模拟的稀疏卷积递推法

刘俊宏<sup>1</sup>, 李秋文<sup>2</sup>, 林洁<sup>2</sup>, 苗增强<sup>2</sup>, 郭瑞鹏<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 广西电网公司电力调度控制中心, 广西 南宁 530023)

**摘要:** 等效电量函数法是电力系统随机生产模拟的实用高效方法,但在计算失负荷概率(Loss Of Load Probability, LOLP)指标时可能存在精度不高的问题。利用实际电力系统中持续负荷曲线的台阶状特征,引入基准单位将拐点横坐标整数化,提出了用于电力系统随机生产模拟的稀疏卷积递推法。该方法采用变宽度矩形描述持续负荷曲线,充分利用了拐点横坐标在整数空间中分布的稀疏性,计算时间对基准单位的取值不敏感,比较适用于系统规模较大、对LOLP指标计算精度要求较高的场合。最后通过对IEEE-RTS79系统及其修正和扩大系统的仿真测试验证了所提方法的准确性及效率。

**关键词:** 电力系统; 随机生产模拟; 持续负荷曲线; 稀疏卷积递推法; 等效电量函数法; 可靠性

## A sparse recursive convolution method for power systems stochastic production simulation

LIU Junhong<sup>1</sup>, LI Qiuwen<sup>2</sup>, LIN Jie<sup>2</sup>, MIAO Zengqiang<sup>2</sup>, GUO Ruipeng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Guangxi Electric Power Dispatching and Control Center, Nanning 530023, China)

**Abstract:** Equivalent energy function method is practical and efficient in power system stochastic production simulation. However, it may result in low accuracy when applied to calculate the loss of load probability (LOLP) index. Using the step-shaping feature of the load duration curve for an actual power system, the abscissas of inflexion are rounded to integers by introducing reference unit. Furthermore, a sparse recursive convolution method is proposed for power systems stochastic production simulation. By describing the load duration curve with variable-width rectangles, it makes full use of the sparse feature of the inflexion point distribution in the integer space. The computational time required by the proposed method is insensitive to the values of reference unit. It is more applicable for a large scale power system that requires a higher accuracy of LOLP index. The accuracy and efficiency of the proposed method are verified by simulations on the IEEE-RTS79 system and its modified and expanded systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51377143).

**Key words:** power system; stochastic production simulation; load duration curve; sparse recursive convolution method; equivalent energy function method; reliability

## 0 引言

电力系统随机生产模拟是一种通过模拟各机组生产情况,同时考虑机组的随机故障特性及电力电量约束,以计算系统可靠性指标及系统生产成本的算法,在电源规划及发电系统可靠性评估中应用广泛<sup>[1]</sup>。

随机生产模拟最基本的算法是卷积递推法<sup>[2]</sup>。该算法概念清晰,核心就是概率学中对随机变量概率分布函数的卷积计算公式。在计算过程中,等效持续负荷曲线(Equivalent Load Duration Curve, ELDC)

采用离散点的坐标描述,每次卷积运算后离散点的数量可能大大增大,导致卷积递推法的计算量较大<sup>[3]</sup>。

为了简化算法的复杂性和提高计算效率,文献[4]用分段直线来描述持续负荷曲线(模拟精度与直线段数有关),但该方法在反复进行卷积和反卷积计算时会出现数值解不稳定的问题。文献[5]采用基于随机分布的数字特征的半不变量描述持续负荷曲线和发电机组的随机停运函数,但半不变量法只是一种近似方法,误差难以估计和控制,特别是可靠性指标的计算往往存在较大误差。文献[6]提出的等效电量函数法直接基于电量进行卷积和反卷积运算,使计算量显著下降,非常适合对含有多个水电厂的

电力系统进行随机生产模拟, 得到了广泛应用, 但对 LOLP 指标的计算可能存在误差。

文献[7]总结介绍了随机生产模拟的几种传统方法, 除了上述提到的方法, 还有分块法和正态混合近似法。随着近年来新能源的迅速发展, 随机生产模拟算法在处理新能源方面也进行了改进。文献[8]采用自回归移动平均(Auto-Regressive Moving Average, ARMA)模型模拟风速, 将风电场处理为两状态机组, 再与传统机组一起进行随机生产模拟。文献[9]采用类似的方法, 将光伏电厂等效成了多状态机组。文献[10]将分布式电源(Distributed Generator, DG)出力的概率分布函数离散化, 引入了 DG 的出力模型与负荷的持续曲线模型, 用随机生产模拟计算出含 DG 的失负荷概率 LOLP 与系统失负荷电量期望值(Expected Energy Not Supplied, EENS)。文献[11]结合风电场多状态模型和负荷修正模型的优点, 提出了时序多状态机组模型, 该模型同时考虑了风电场输出功率的波动性和时序性, 能够比较客观地反映风电场输出功率的实际情况。

本文根据等效持续负荷曲线的离散性, 通过引入基准单位, 将其拐点的横坐标整数化, 在此基础上根据等效持续负荷曲线的台阶状特征采用变宽度矩形精确描述, 进而利用等效持续负荷曲线拐点横坐标在连续整数空间分布中的稀疏性, 提出了稀疏卷积递推法。该方法对基准单位的大小不敏感, 在系统规模较大、对 LOLP 指标精度要求较高的场合较之等效电量函数法具有明显的优势。通过对 IEEE-RTS 系统及其修正和扩大系统的仿真测试验证了稀疏卷积递推法的准确性及计算效率。

## 1 卷积递推法的基本原理

卷积递推法将发电机组的随机停运和随机负荷模型结合起来, 把发电机组的随机故障影响当成等效负荷, 在原始持续负荷曲线的基础上不断修正, 形成等效持续负荷曲线, 进而完成随机生产模拟<sup>[3]</sup>。卷积递推法通过增大系统等效负荷模拟发电机组的随机故障, 其原理解释可参见图 1。

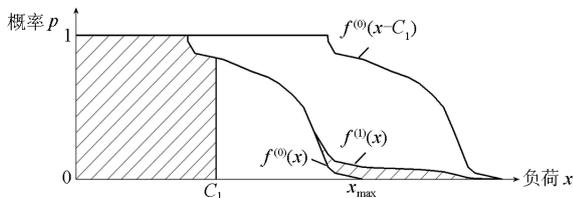


图 1 等效持续负荷曲线

Fig. 1 Equivalent load duration curve

图 1 中, 横坐标为负荷  $x$ , 纵坐标为概率  $p$  (表示负荷大于或等于  $x$  的概率, 即持续时间  $t$ /周期  $T$ ), 最大负荷为  $x_{\max}$ 。假设机组 1 首先带负荷, 其容量为  $C_1$ , 强迫停运率为  $q_1$ 。 $f^{(0)}(x)$  是原始持续负荷曲线, 表示系统中所有发电机组应承担的总负荷, 与第 1 台发电机组正常运行情况相同; 机组 1 故障停运时, 负荷应由除去发电机组 1 以外的其他发电机组承担, 系统相当于增加了  $C_1$  的等效负荷, 即  $f^{(0)}(x-C_1)$ 。

考虑随机停运影响后发电机组 1 的电量为

$$E_{G1} = T p_1 \int_0^{C_1} f^{(0)}(x) dx \quad (1)$$

式中:  $p_1 = 1 - q_1$ , 表示机组 1 正常运行的概率; 积分部分为图 1 中左边阴影部分的面积; 图 1 中右边阴影部分的面积为机组强迫停运引起的等效持续负荷增量的积分。

考虑发电机组 1 的随机停运影响后, 系统的持续负荷曲线为

$$f^{(1)}(x) = p_1 f^{(0)}(x) + q_1 f^{(0)}(x - C_1) \quad (2)$$

式(2)为发电机组 1 的随机停运与原始持续负荷曲线的卷积公式。

$f^{(1)}(x)$  比  $f^{(0)}(x)$  的总负荷电量增加了  $\Delta E$  (对应于图 1 中右边的阴影部分),  $\Delta E$  等于发电机组 1 由于随机停运而减少的发电量<sup>[3]</sup>。

对于第  $i$  台发电机组, 上述结论可推广为

$$E_{Gi} = T p_i \int_C^{C+C_i} f^{(i-1)}(x) dx, C = \sum_{j=1}^{i-1} C_j \quad (3)$$

$$f^{(i)}(x) = p_i f^{(i-1)}(x) + q_i f^{(i-1)}(x - C_i) \quad (4)$$

式中:  $C_i$  为发电机组  $i$  的容量;  $q_i$  为其强迫停运率;  $p_i = 1 - q_i$  表示正常运行概率;  $C$  为前  $i-1$  台发电机组的总发电容量。

设系统中共有  $n$  台发电机组, 总容量为  $C_t$ , 全部机组卷积运算结束后, 等效持续负荷曲线为  $f^{(n)}(x)$ , 最大等效负荷为  $x_{\max} + C_t$ , 如图 2 所示。系统可靠性指标: 失负荷概率(LOLP)和失负荷电量期望值(EENS)及失负荷功率期望值(Expected Demand Not Supplied, EDNS)分别为

$$LOLP = f^{(n)}(C_t) \quad (5)$$

$$EENS = T \int_{C_t}^{C_t + x_{\max}} f^{(n)}(x) dx \quad (6)$$

$$EDNS = EENS / T \quad (7)$$

系统可靠性指标计算是在所有机组都进行了卷积运算之后, 由等效持续负荷曲线  $f^{(n)}(x)$  得到。即使机组参与卷积运算的顺序不同, 由于卷积运算

满足交换律<sup>[12]</sup>, 所以最终得到的  $f^{(n)}(x)$  是相同的。当随机生产模拟用于发电系统可靠性评估时, 系统可靠性指标与机组运行顺序及各机组发电量期望值无关。即机组带负荷顺序不同时, 系统可靠性指标相同。当随机生产模拟用于发电系统运行优化时, 需要按照经济优先顺序安排机组运行, 并计算发电量期望值。

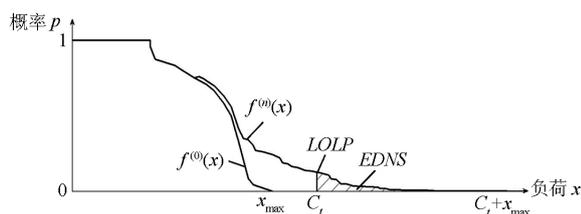


图2 等效持续负荷曲线与可靠性指标

Fig. 2 Equivalent load duration curve and reliability index

## 2 水电机组的随机生产模拟

当电力系统只有火电机组时, 可以按照其平均煤耗的大小确定其带负荷顺序<sup>[13]</sup>, 在缺乏煤耗数据时可根据机组容量确定其带负荷顺序, 随机生产模拟过程较为简单。实际应用中, 水电厂的发电量是给定的, 其大小由水文情况及水库调度决定<sup>[14-16]</sup>。当电力系统有多座水电厂时, 情况要复杂得多。

水电厂的最优运行条件是机组的容量和电量都得到充分利用<sup>[17]</sup>。如果峰荷条件下仍不能使机组的容量得到充分利用, 说明水电厂给定的电量不足, 出现了空闲容量, 该情况下必须降低水电机组的工作容量。水电厂的来水受季节的影响较大, 枯水期可能出现电量不足, 机组容量得不到充分利用的情况。

定义各水电厂的有效容量负载率如下:

$$r_{hi} = \frac{E_{hi}}{T \sum_{j \in S_{hi}} p_j C_j} \quad (8)$$

式中,  $r_{hi}$ 、 $E_{hi}$  及  $S_{hi}$  分别表示水电厂  $i$  的有效容量负载率、计划电量及水电机组集合。

各水电厂的相对带负荷顺序可以根据有效容量负载率确定, 但水火电厂之间则需通过试探确定各自的带负荷位置, 且水火电厂之间, 以及各水电厂之间的带负荷位置可能重叠。文献[1]对水电机组的模拟给出了详细的介绍, 这里不再重复。

## 3 稀疏卷积递推法

### 3.1 等效持续负荷曲线的离散化

随机生产模拟的基础是等效持续负荷曲线。实际应用中, 持续负荷曲线一般来源于负荷预测, 根

据预测的时序负荷曲线生成持续负荷曲线<sup>[18]</sup>。由于预测负荷事实上为离散值, 持续负荷曲线是由离散点组成的台阶状曲线。

表1以某地区典型日每小时预测负荷(单位为MW)为例<sup>[2]</sup>, 生成原始等效持续负荷曲线, 如图3所示。图3中的  $f^{(0)}(x)$  为台阶状曲线, 由分段水平线段组成; 等效持续负荷曲线第一个点均为(0, 1), 除此点外, 曲线可以采用13个拐点处的坐标表示, 每个拐点的纵坐标表示对应水平线段的函数值。

表1 某典型日预测负荷

Table 1 Forecasted load data of a typical day

时间/h	负荷/MW	时间/h	负荷/MW	时间/h	负荷/MW
1	32	9	65	17	72
2	34	10	74	18	82
3	34	11	72	19	72
4	42	12	68	20	68
5	50	13	68	21	68
6	55	14	72	22	62
7	62	15	72	23	58
8	65	16	72	24	46

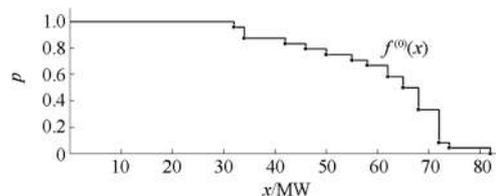


图3 阶梯状等效持续负荷曲线

Fig. 3 Stepped equivalent load duration curve

为提高计算效率, 并减少内存空间占用, 各拐点的横坐标均采用整数表示。以省级电网为例, 机组容量一般为 0.1 MW 的整数倍, 负荷预测结果一般也仅保留至小数点后 1 位, 取 0.1 MW 作为基本单位, 则机组容量及各负荷值均为整数。该方法保证了持续负荷曲线及机组容量在离散化过程中不损失精度。

### 3.2 等效持续负荷曲线的稀疏性

等效电量函数法采用固定的间隔对持续负荷曲线进行积分, 求出各间隔的等效电量, 进而对电量进行卷积运算。等效电量函数法的计算效率与所采用的间隔大小有着密切的关系, 实用一般取所有发电机容量的最大公因子作为计算间隔<sup>[3]</sup>。该例子中, 机组容量的最大公因子为 20 MW。如图4所示, 原始持续负荷曲线被分隔成 5 块阴影部分, 每块的面积正比于相应的电量(比例因子等于周期  $T$ )。等效电量函数法事实上可以认为采用等宽的矩形表示持续

负荷曲线,在此基础上采用卷积递推法。

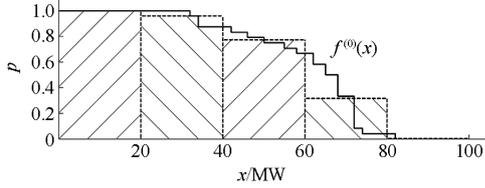


图4 等效电量函数法计算图示

Fig. 4 Equivalent electric quantity function method legend

从图4可以看出,等效电量函数事实上在卷积运算之前先对持续负荷曲线进行了等效,在计算机组电量、失负荷电量期望值或失负荷功率期望值时能够保持很高的精度,但由于修改了持续负荷曲线,会导致计算LOLP指标时存在较大误差<sup>[19-20]</sup>。等效电量函数法采用等宽度的矩形表示持续负荷曲线,取较小的间隔可以减小等效持续负荷曲线的精度损失,提高LOLP指标的计算精度。

等效持续负荷曲线为台阶状曲线,除了采用等宽度的矩形描述外,还可以采用变宽度的矩形精确描述,即采用各曲线拐点处的坐标精确描述。由式(4)的卷积公式可以看出,如果机组的分配容量为整数,且卷积前等效持续负荷曲线各拐点的横坐标也均为整数,则卷积后等效持续负荷曲线各拐点的横坐标也均为整数。递推可得,如果各机组的容量及原始持续负荷曲线各拐点的横坐标均为整数,则卷积后等效持续负荷曲线各拐点的横坐标也均为整数。进一步,如果各机组的容量及原始持续负荷曲线各拐点的横坐标存在最大公约数 $g$ ,则卷积后等效持续负荷曲线各拐点的横坐标也均为 $g$ 的整数倍。

对于水电机组,如果计划电量充足,其容量将会得到充分利用,但如果计划电量较小,可能存在空闲容量,由于空闲容量的大小无法预先知道,该情况下基本单位选得越小则计算精度越高。对于等效电量函数法,基本单位(即间隔)选得越小,矩形宽度越小,矩形数量越多,卷积运算的计算量将越大,而等效持续负荷曲线的拐点事实上没有变化。以图4的曲线为例,如果间隔取为0.1 MW,则需要用820个等宽矩形(可用1~820进行编号)表示,但实际拐点只有13个,拐点横坐标在连续整数空间(1~820)中的分布具有稀疏性。

### 3.3 稀疏卷积递推法

采用拐点坐标描述等效持续负荷曲线,进而对其进行卷积及积分运算,可充分利用其稀疏性提高算法的执行效率,以此为基础的卷积递推法称为稀疏卷积递推法。对于存在空闲容量的水电机组,由于其空闲容量无法事先确定,其卷积运算可能破坏

等效持续负荷曲线的稀疏性,但该类机组必然在所有火电机组及不存在空闲容量的水电机组之后分配,对计算量的影响较小。

显然,采用拐点表示时需要的点数最少,最能充分利用等效持续负荷曲线的稀疏性。考虑了前 $i$ 台机组随机停运的等效持续负荷曲线,离散化用拐点表示,记作

$$G^{(i)}(x) = \{(x_{i,j}, P_{i,j}) | j \leq N_i \leq T \times 2^i\} \quad (9)$$

式中:  $(x_{i,j}, P_{i,j})$  为曲线上第 $j$ 个拐点处的坐标;  $T$  为预测负荷周期; 代表曲线的离散点按横坐标大小顺序升序排列;  $N_i$  为对应拐点个数,即曲线的离散点个数;  $G^{(0)}(x)$  表示原始持续负荷曲线。

当机组 $i+1$ 故障停运时,  $G^{(i)}(x)$  的拐点向右平移 $C_{i+1}$ ,即横坐标增加 $C_i$ 而纵坐标不变,可记作

$$G^{(i)}(x - C_{i+1}) = \{(x_{i,j} + C_{i+1}, P_{i,j}) | j \leq N_i \leq T \times 2^i\} \quad (10)$$

等效持续负荷曲线离散化表示后,卷积运算也需要离散化。参照式(4),考虑机组 $i+1$ 随机停运的等效持续负荷曲线 $G^{(i+1)}(x)$ 的拐点 $(x_{i+1,j}, P_{i+1,j})$ 可由 $G^{(i)}(x)$ 上拐点 $(x_{i,j}, P_{i,j})$ 经过离散化的卷积运算得到

$$x_{i+1,j} = \begin{cases} x_{i,k}, & x_{i,j} + C_i = x_{i,k} \\ x_{i,j} + C_i, & x_{i,j} + C_i \in (x_{i,l-1}, x_{i,l}) \end{cases} \quad (11)$$

$$P_{i+1,j} = \begin{cases} p_i P_{i,k} + q_i P_{i,j}, & x_{i,j} + C_i = x_{i,k} \\ p_i P_{i,l} + q_i P_{i,j}, & x_{i,j} + C_i \in (x_{i,l-1}, x_{i,l}) \end{cases}$$

由式(10)可知,  $G^{(i)}(x)$  的拐点向右平移 $C_{i+1}$ 得到 $G^{(i)}(x - C_{i+1})$ 的拐点,平移后的拐点横坐标存在两种情况,对应 $G^{(i+1)}(x)$ 的两种计算情况,如式(11)所示:当平移后的拐点横坐标与平移前的拐点相等时,即 $x_{i,j} + C_i = x_{i,k}$ ,此时只需更新该点的纵坐标;当平移后的拐点横坐标与平移前的拐点都不相等时,即 $x_{i,j} + C_i \in (x_{i,l-1}, x_{i,l})$ ,此时新产生一个拐点。

参照式(3),离散化后的考虑随机停运后的发电机组 $i+1$ 的发电量 $E_{Gi+1}$ 可由 $G^{(i)}(x)$ 计算得到

$$E_{Gi+1} = T p_{i+1} \left( (x_{i,m} - C) P_{i,m} + \sum_{j=m+1}^{n-1} (x_{i,j} - x_{i,j-1}) P_{i,j} + (C_{i+1} - x_{i,n-1}) P_{i,n} \right),$$

$$C \in [x_{i,m-1}, x_{i,m}], C + C_{i+1} \in [x_{i,n-1}, x_{i,n}] \quad (12)$$

前 $i$ 台发电机组的累积发电容量 $C$ 可能位于

$G^{(i-1)}(x)$  的两个拐点横坐标之间, 也可能等于拐点横坐标, 式(12)采用闭区间将两种情况做统一描述, 即  $C \in [x_{i,m-1}, x_{i,m}]$ 。同理, 对前  $i+1$  台发电机组累积发电容量  $C + C_{i+1}$  进行相同处理。

参照式(5)、式(6), 全部机组离散卷积运算结束后, 系统可靠性指标的离散化计算方法为

$$LOLP = P_{n,m}, C_t \in [x_{n,m-1}, x_{n,m}] \quad (13)$$

$$EENS = T \left( (x_{n,m} - C_t) P_{n,m} + \sum_{j=m+1}^{N_n} (x_{n,j} - x_{n,j-1}) P_{n,j} \right),$$

$$C_t \in [x_{n,m-1}, x_{n,m}], x_{n,N_n} = C_t + x_{\max} \quad (14)$$

式中:  $P_{n,m}$  为横坐标  $x_{n,m}$  对应拐点的纵坐标;  $n$  台发电机组的总发电容量  $C_t$  可能位于  $G^{(n)}(x)$  的两个拐点横坐标之间, 也可能等于拐点横坐标, 与式(12)相同, 同样采用闭区间将两种情况做统一描述, 即  $C_t \in [x_{n,m-1}, x_{n,m}]$ 。

虽然等效电量函数法是对电量(即矩形面积)进行卷积, 稀疏卷积递推法是对电力(即矩形高度)进行卷积, 对于等宽度的矩形, 面积和高度成正比, 故两者在本质上是等价的, 其根本区别在于等效持续负荷曲线描述的差异。等效电量函数法采用等宽度矩形描述, 各矩形的宽度事先确定, 而稀疏卷积递推法采用变宽度矩形表示, 宽度由台阶状曲线相邻拐点的横坐标之差确定。

可以认为稀疏卷积递推法是对等效电量函数法采用小间隔以提高 LOLP 计算精度时的改进, 将等宽度间隔改进为变宽度间隔, 提高计算效率。

#### 4 算例分析

为了说明本文提出的稀疏卷积递推法的计算精度和速度, 采用 C++ 编写了仿真测试程序, 对 IEEE-RTS 系统及其修正系统进行了仿真测试。仿真环境为 Microsoft Visual Studio 2010, 计算机配置为 2.5 GHz CPU, 8GB 内存。

IEEE-RTS 系统相关电气参数和可靠性参数参见文献[21], 该系统共有 32 台发电机, 装机容量 3405 MW, 总负荷为 2850 MW。文献[22]采用枚举法给出了 IEEE-RTS79 系统的发电系统可靠性指标的解析值, 表 2 给出了稀疏卷积递推法及枚举法的计算结果。

从表 2 可以看出, 两种方法的计算结果完全一致(微小的差异仅在于保留的小数点后位数不同), 这验证了稀疏卷积递推法计算结果的准确性。

表 2 IEEE-RTS79 系统的发电系统可靠性指标计算结果

Table 2 Calculation results of generation system reliability

index of IEEE-RTS79 system		
算法	EDNS/MW	LOLP/%
稀疏卷积递推法	14.693 68	8.4578
枚举法	14.6937	8.46

将 IEEE-RTS 系统中节点 18、21、22、23 假定为水电厂, 并假定各水电厂的日电量计划如表 3 所示。

表 3 各水电厂日电量计划

Table 3 Day generation energy schedules of hydropower plants

水电厂所在节点	日计划电量/MWh	有效容量负载率/%
18	422.4	5
21	8363.52	99
22	7056.72	99
23	14 721.696	99

对修正后的含水电厂的 IEEE-RTS79 系统进行随机生产模拟, 表 4 给出了两种方法在选择各种基准单位时的测试结果。实际生产中, 发电机组容量和负荷数据是实数, 通过选取基准单位可以将机组容量和负荷整数化; 同时, 基准单位决定了间隔的选取, 因为基准单位越小, 间隔就越小, 计算精度越高, 故基准单位可以反映精度要求。

表 4 含水电厂的 IEEE-RTS79 修正系统随机生产模拟结果

Table 4 Stochastic production simulation results of modified IEEE-RTS79 system with hydropower plants

基准单位/MW	等效电量函数法		稀疏卷积递推法	
	EDNS/MW	LOLP/%	EDNS/MW	LOLP/%
1	61.966 569	29.835 144	61.966 569	29.835 144
0.1	61.966 569	29.835 565	61.966 569	29.835 565
0.01	61.966 569	29.835 565	61.966 569	29.835 565

由表 4 可以看出, 在相同基准单位下, 稀疏卷积递推法与等效电量函数法的计算结果完全一致, 这说明了稀疏卷积递推法的正确性。比较表 4 第 4 列的第 3~5 行可以看出, 采用表中的各种不同基准单位, EDNS 的计算结果完全一致, 其值均为 61.966 569 MW。这是由于该系统中机组容量及负荷功率的“最大公因子”为 1 MW, 是表中各基准单位的整数倍, 两种方法都可以确保 EDNS 指标的精确。比较表 4 第 5 列的第 3~5 行可以看出, 基准单位取 1 MW 时求得 LOLP 指标与其他两种情况存在差异, 采用较小的基准单位能够获得较高的计算精度。

为了验证稀疏卷积递推法的性能,将上述含水电厂的 IEEE-RTS 系统扩大  $N$  倍(即  $N$  个完全相同的系统通过足够强的联络线连在一起),并进行计算效率测试。表 5 给出了  $N=10$  时不同基准单位下两种方法所需的 CPU 时间。表 6 给出了基准单位取 0.1 MW 时不同计算规模下两种方法所需的 CPU 时间。

表 5 不同基准单位的随机生产模拟效率测试结果

Table 5 Efficiency test results of stochastic production simulation with different intervals

基准单位/MW	CPU 时间/s	
	等效电量函数法	稀疏卷积递推法
1	0.90	1.51
0.1	9.18	1.64
0.01	124.68	1.85

表 6 不同规模系统的随机生产模拟效率测试结果

Table 6 Efficiency test results of stochastic production simulation with different system scale

扩大倍数	CPU 时间/s	
	等效电量函数法	稀疏卷积递推法
5	0.82	0.15
10	9.18	1.64
15	54.33	8.67
20	164.42	25.46

从表 5 可以看出,随着基准单位的缩小,两种方法所花费的 CPU 时间均随之增大,其中等效电量函数法的增幅很大,对基准单位的取值很敏感,而稀疏卷积递推法的增幅则要小得多,对基准单位的取值并不敏感。

从表 6 可以看出,随着计算规模的增大,两种方法所花费的 CPU 时间均随之明显增大。计算规模相同时稀疏卷积递推法所需的 CPU 时间均明显小于等效电量函数法(约为等效电量函数法的 1/6),具有更高的执行效率。

对于大规模电力系统的随机生产模拟,为了保证足够高的指标精度,需要采用较小的基准单位,等效电量函数法的计算时间可能很长。稀疏卷积递推法对基准单位的取值不敏感,取较小的基准单位仍具有较高的计算效率。在系统规模较大、对 LOLP 指标精度要求较高的场合,采用稀疏卷积递推法具有明显的优势。

## 5 结论

等效电量函数法是电力系统随机生产模拟的高效算法,但在采用较大间隔进行计算时存在 LOLP 指标精度较低的问题,而在采用较小间隔进行计算

时存在计算量大的问题。本文根据离散等效持续负荷曲线的稀疏性,采用曲线拐点描述等效持续负荷曲线,提出了适用于电力系统随机生产模拟的稀疏卷积递推法。对 IEEE-RTS 系统及其修正和扩大系统的仿真结果表明,稀疏卷积递推法的计算精度高,对基准单位的取值不敏感,在系统规模较大、对 LOLP 指标精度要求较高的场合,较之等效电量函数法具有明显的速度优势,能够较好地满足电力系统随机生产模拟的应用要求。

## 参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [2] 丘文千. 电力系统优化规划模型及方法[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2012.
- [3] 王锡凡, 王秀丽. 随机生产模拟及其应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 10-15.  
WANG Xifan, WANG Xiuli. Probabilistic production simulation method and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 10-15.
- [4] BOOTH R R. Power system simulation model based on probability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1972, 91(1): 62-69.
- [5] RAU N S, TOY P, SCHENK K F. Expected energy production costs by the method of moments[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1980, 99(5): 1908-1917.
- [6] WANG Xifan. Equivalent energy function approach to power system probabilistic modeling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 823-829.
- [7] 于若英, 高山. 随机生产模拟在电力系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 149-155.  
YU Ruoying, GAO Shan. Applications of probabilistic production simulation in power system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 149-155.
- [8] 邹斌, 李冬. 基于有效容量分布的含风电场电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 23-31.  
ZOU Bin, LI Dong. Power system probabilistic production simulation with wind generation based on available capacity distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 23-31.
- [9] 郭旭阳, 谢开贵, 胡博, 等. 计入光伏发电的电力系统分时段随机生产模拟[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1499-1505.  
GUO Xuyang, XIE Kaigui, HU Bo, et al. A time-interval based probabilistic production simulation of power system with grid-connected photovoltaic

- generation[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1499-1505.
- [10] 姜淼, 高赐威, 苏卫华. 基于等效电量函数法的含DG配电网接线方式可靠性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2201-2206.  
JIANG Miao, GAO Ciwei, SU Weihua. Equivalent energy function based reliability consideration of connection modes of distributed networks containing distributed generations[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2201-2206.
- [11] 聂永辉, 李天云, 关晓辉, 等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 102-107.  
NIE Yonghui, LI Tianyun, GUAN Xiaohui, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 102-107.
- [12] 林让起, 徐瑞标. 卷积性质的代数证明[J]. 湖州师范学院学报, 2010, 32(1): 116-118.  
LIN Rangqi, XU Ruibiao. The algebra proof of the properties of the convolution[J]. Journal of Huzhou Teachers College, 2010, 32(1): 116-118.
- [13] 黄蕾, 李丰伟, 秦俊宁. 基于效益分析的抽水蓄能电站运行工况优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 94-98.  
HUANG Lei, LI Fengwei, QIN Junning. Optimal dispatching of pump-storage power station based on benefits analysis[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 94-98.
- [14] 贺建波, 胡志坚, 刘宇凯. 大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 1-7.  
HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yukai. Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 1-7.
- [15] 韩柳, 庄博, 吴耀武, 等. 风光水火联合运行电网的电源出力特性及相关性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 91-98.  
HAN Liu, ZHUANG Bo, WU Yaowu, et al. Power source's output characteristics and relevance in wind-solar-hydro-thermal power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 91-98.
- [16] 侯贺军, 罗春辉, 隗霖捷, 等. 基于微分进化算法的水火电短期优化调度的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 63-70.  
HOU Maojun, LUO Chunhui, WEI Linjie, et al. Study on short-term hydrothermal scheduling based on differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 63-70.
- [17] 王锡凡. 包含多个水电机组的电力系统随机生产模拟[J]. 西安交通大学学报, 1985, 19(4): 69-82.  
WANG Xifan. Probabilistic simulation of multiple assigned-energy hydroelectric units[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1985, 19(4): 69-82.
- [18] 马洲俊, 程浩忠, 丁昊, 等. 含不确定性电源的电力系统柔性生产模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 63-70.  
MA Zhoujun, CHENG Haozhong, DING Hao, et al. Flexible production simulation for power system with uncertain energy[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 63-70.
- [19] 王锡凡. 电力系统随机生产模拟的等效电量函数法[J]. 西安交通大学学报, 1984, 18(6): 13-26.  
WANG Xifan. EEF approach to power system probabilistic modeling[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(6): 13-26.
- [20] 周景宏, 胡兆光, 田建伟, 等. 含能效电厂的电力系统生产模拟[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 27-31.  
ZHOU Jinghong, HU Zhaoguang, TIAN Jianwei, et al. Power system probabilistic production simulation including efficiency power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 27-31.
- [21] A report prepared by the reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee, IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.
- [22] 侯雨伸, 王秀丽, 刘杰, 等. 基于拟蒙特卡罗方法的电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 744-750.  
HOU Yushen, WANG Xiuli, LIU Jie, et al. A quasi-Monte Carlo method based power system reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 744-750.

收稿日期: 2016-09-12; 修回日期: 2016-12-19

作者简介:

刘俊宏(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划; E-mail: 15267033610@163.com

李秋文(1985—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电网运行策划工作; E-mail: li\_qw.dd@gx.csg.cn

林洁(1978—), 女, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事电网运行策划工作。E-mail: lin\_j.dd@gx.csg.cn

(编辑 张爱琴)