

# 计及风电并网的电力系统随机生产模拟改进方法

孙 亮,郝国屹

(东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012)

**摘 要:**考虑风电并网的影响,在传统随机生产模拟方法的基础上,综合运用等效持续负荷曲线以及等效频负荷率曲线,以保留风电负荷的时序性,进而提高随机生产模拟过程中动态成本分析的准确性;优化风电场建模思路,进而简化随机生产模拟过程。以 IEEE-RTS1979 系统为例验证了该改进方法在随机生产模拟过程中的准确性和实用性。

**关 键 词:**随机生产模拟;等效电量函数;风电场建模;经济效益

**中图分类号:** TM715

**文献标识码:** A

风电作为可再生的清洁能源正在飞速发展,风电并网给常规电力系统带来了诸多影响<sup>[1]</sup>,同时,也给随机生产模拟提出了诸多挑战。

随机生产模拟发展至今,基于负荷曲线的卷积算法是发展时间最长、研究最为深入的主流算法。标准卷积法是利用卷积公式对发电机组的随机故障进行考虑<sup>[2]</sup>,后经发展形成了半不变量法和傅里叶级数法。二者作为常规卷积方法都存在一定问题,前者较为灵活,但计算误差难以控制,在电量不足期望值(EENS)和电力不足概率(LOLP)等可靠性指标的计算中误差尤为明显<sup>[3]</sup>;后者在反复卷积和反卷积过程中则会出现数值解不稳定的情形<sup>[4]</sup>。国外学者提出的这两种算法对水电机组考虑不足,不适用于我国电力系统,为此国内学者提出了等效电量函数法,其原理是直接对电量函数进行卷积,运算效率提升明显,适合含有水电厂的电力系统的随机生产模拟<sup>[5]</sup>,而对于风电负荷的时序特性考虑不足。区别于卷积法,文献[6]提出序列运算理论,将生产模拟看作供应与需求的匹配,基于负荷曲线或期望值理论进行模拟计算;文献[7]提出通用生成函数法,以多项式组合运算的形式替代模拟过程中离散随机变量的运算。以上两种解析算法都能减小计算量,提高计算效率,但都无法充分计及风电负荷的波动特性。

针对以上问题,本文从运算方法和风电模型两方面入手,以传统等效电量函数法为依托,综合运用等效持续负荷曲线以及等效负荷频率曲线,使随机生产模拟过程得以保留风电负荷的时序性信息;改进了风电场模型,以突出风电负荷的波动性。在模拟计算发电量和可靠性指标的同时,对于风电场经济效益的评估提供了更为准确的依据。

## 1 等效电量函数法

### 1.1 时序负荷曲线

等效电量函数法的基础是把时序负荷曲线等效成持续负荷曲线,图1表示一条时序负荷曲线。

### 1.2 等效持续负荷曲线

等效持续负荷曲线(ELDC)是随机生产模拟中的重要概念<sup>[8]</sup>。图2表示一条持续负荷曲线,其纵

坐标表征持续时间,横坐标表征系统负荷, $T$ 为研究周期。曲线上任何一点 $(x, t)$ 表示系统负荷大于或等于 $x$ 的持续时间为 $t$ ,即 $t = F(x)$ 。用周期 $T$ 除上式两端,可得

$$P = f(x) = F(x) / T. \quad (1)$$

把发电机的随机停运等效为额外负荷,对原始时序负荷曲线进行修正即可得到等效持续负荷曲线。发电机故障时则会引起系统等效负荷的增大。

### 1.3 等效电量函数法原理

文献[9]介绍了等效电量函数法的原理,本文作简要陈述,其原理如下:

将图2横轴 $x$ 按 $\Delta x$ 分段,定义一个离散的电量函数

$$E(h) = \int_x^{x+\Delta x} F(x) dx, \quad (2)$$

其中 $h = \langle x/\Delta x \rangle + 1$ ,  $\langle x/\Delta x \rangle$ 表示不大于 $x/\Delta x$ 的整数; $E(h)$ 为从 $x$ 到 $x + \Delta x$ 之间负荷曲线对应的负荷电量。

设第 $i$ 台发电机组的装机容量为 $C_i$ ,强迫停运率为 $q_i$ ,则安排第 $i$ 台发电机组运行后的等效电量函数为:

$$\begin{aligned} E^{(i)}(h) &= p_i E^{(i-1)}(h) + q_i E^{(i-1)}(h - k_i), \\ \{p_i &= 1 - q_i, \\ \{k_i &= C_i / \Delta x, \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $k_i$ 是将 $\Delta x$ 取为所有机组容量的最大公约数时的值,因而 $k_i$ 为整数。第 $i$ 台发电机组的发电量 $E_{Gi}$ 应根据等效电量函数 $E^{(i-1)}(h)$ 来计算:

$$E_{Gi} = p_i \sum_{h_{i-1}+1}^{h_i} E^{(i-1)}(h), \quad (4)$$

若发电机组全部安排完毕,则结束随机生产模拟过程,统计系统总运行成本,计算可靠性指标,包括系统电量不足期望值 $E_{EENS}$ 以及电力不足概率为 $P_{LOLP}$ 。

$$E_{EENS} = \sum_{k > k_n} E^{(n)}(h), \quad (5)$$

$$P_{LOLP} \cong \frac{E^{(n)}(h_n) + E^{(n)}(h_n + 1)}{2T\Delta x}. \quad (6)$$

## 2 改进等效电量函数法

风电作为清洁型可再生能源,可节约其他石化燃料,减少污染物的排放。然而,由于风电的随机性和反调峰性,风电大规模并网可能会造成其他机组额外的启停过程,增加其他机组的生产成本<sup>[10]</sup>。我们进行成本计算时不仅要考虑燃料成本而且要考虑环境成本,不仅要考虑风电场节约的成本,而且要考虑风电场增加的成本。常规等效电量函数法的本质是时序负荷曲线向持续负荷曲线的等效转化,忽略了与负荷的时序性相关的信息和约束,例如机组启停费用、最小开关机时间要求以及火电机组的爬坡率约束<sup>[11]</sup>等。因此,传统方法无法计及由风电负荷波动引起的常规机组动态特性的影响,将给动态成本分析带来了一定程度的误差。

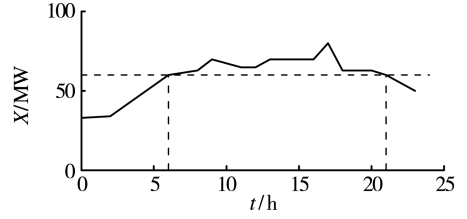


图1 时序负荷曲线

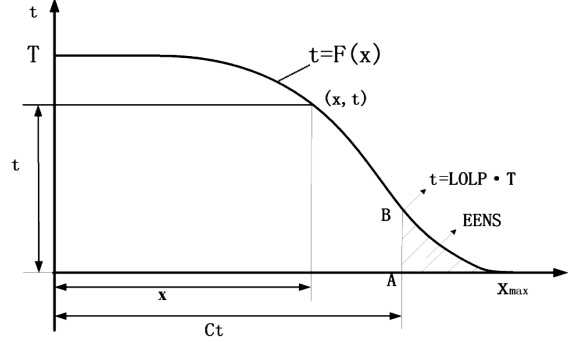


图2 等效持续负荷曲线

为此引入负荷频率曲线<sup>[12]</sup>,表征负荷在向上方向上超越某一负荷  $x$  的平均频率。设  $T$  为研究周期,在时间间隔  $t_j$  内的负荷为  $l_{ij}$ 。在  $t_j$  结束时,如负荷向上移动,则此时负荷向上转移的频率为  $f(l_{ij}) = 1/T$ ,负荷水平  $l_i$  向上移动的频率为  $f(l_i) = \sum f_{ij}$ 。

与等效持续负荷曲线类似,可以通过卷积方法考虑发电机的随机停运,得到等效负荷频率曲线(ELFC)。设第  $i-1$  台发电机组安排完毕后得到的等效负荷频率曲线为  $f_e^{(i-1)}(x)$ ,第  $i$  台机组安排完毕后得到的等效负荷频率曲线为  $f_e^i(x)$ ,则有:

$$f_e^i(x) = p_i f_e^{(i-1)}(x) + q_i f_e^{(i-1)}(x - C_i) + [f^{(i-1)}(x - C_i) - f^i(x)]/\tau_i, \quad (7)$$

式中:  $p_i$  为第  $i$  台发电机的可用率;  $C_i$  为第  $i$  台发电机的容量;  $\tau_i$  为第  $i$  台发电机的平均故障时间。

由公式(7)可见,等效负荷频率  $f_e^i(x)$  由两部分组成,前一部分由负荷波动引起,与等效负荷曲线形成类似;后一部分由机组状态变化引起,机组故障也会造成机组启停次数的增加。

将等效负荷频率曲线离散化得到:

$$f_e^i(h) = p_i f_e^{(i-1)}(h) + q_i f_e^{(i-1)}(h - k_i) + [f^{(i-1)}(h - k_i) - f^{(i-1)}(h)]/\tau_i. \quad (8)$$

综合考虑等效电量函数法,可以得到:

$$f_e^i(h) = p_i f_e^{(i-1)}(h) + q_i f_e^{(i-1)}(h - k_i) + [E^{(i-1)}(h - k_i) - E^{(i-1)}(h)]/(T\tau_i\Delta x). \quad (9)$$

利用公式(9),对发电机组进行逐一卷积,即可得到最终的等效频率负荷曲线  $f_e^{(n)}(h)$ 。图 3 表示对应于图 1 的等效频率负荷曲线。

由以上分析得到第  $i$  台机组的期望开机次数如式(10)所示。

$$F_{si} = p_i T [f_e^{(i)}(h - k_i) + \frac{E^{(i)}(h - k_i)}{T\tau_i\Delta x}]. \quad (10)$$

为此评价风电场并网对于系统常规机组启停造成的影响,可采用机组单位容量启停频率(FGSUC)和系统启停总次数(SFGS)两项指标。

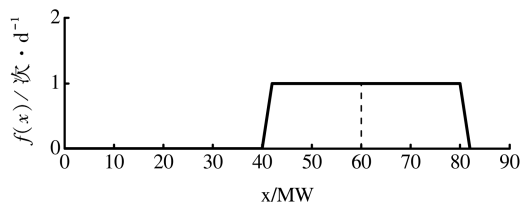


图 3 等效频率负荷曲线

$$\text{FGSUC} = \sum_{i=1}^n F_{si} C_i / \sum_{i=1}^n C_i, \quad (11)$$

$$\text{SFGS} = \sum_{i=1}^n F_{si}. \quad (12)$$

### 3 优化风电场模型

风电场建模一般分为负荷修正模型和等效多状态机组模型,考虑到风速的随机性、波动性,通常将风机等效为多状态机组。在过去研究中常通过统计数据对风电场风速分布进行估计,得到风速的分布函数(通常是 Weibull 分布),利用分布函数对风速分段,计算风速落在某一区间的概率<sup>[13]</sup>。结合风机特性曲线,得到风电场功率落在某一区间的概率,从而确定风电场的等效多状态模型。

这种基于风速分段的多状态模型,本质上讲是风机的多状态模型,对风速到功率和风机功率到风电场功率的转化过程考虑粗糙。同时,由于过分强调风速分布长期统计性而忽略了风电场功率的波动性。

针对以上问题,对建模方法进行优化,引入风电功率序列。设所研究的周期共  $T$  个阶段,第  $i$  个阶段区域内风电功率序列为  $\{p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{iN_i}\}$ ,其中  $i = 1, 2, 3, \dots, T$ ,  $N_i$  为序列项数,即  $i$  阶段所记录的随时间变化的区域风电功率的数量。将序列从小到大排序即可得到新的序列  $\{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{iN_i}\}$ ,序列中各项值为风电场在  $i$  阶段内输出功率各状态值,则每一项出现的概率为  $1/N_i$ 。本方法中的分段数与时间序列的项数保持一致,通过公式(14)和公式(15)可以得到  $m$  分段机组的功率序列  $\{P_{ik}\}$  和对应的概率值序

列  $\{Q_{ik}\}$ 。

$$P_{ik} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m C_{i[m(k-1)+j]} \quad k = 1, 2, \dots, \frac{N_i}{m},$$

(14)

$$Q_{ik} = \frac{1}{m}.$$

(15)

与传统合并取值相同项的方法不同,本方法处理过程更为简单,不同时段的分段数一致,便于编程计算,同时也可以根据需要的调整机组分段数,尤其适合较长周期的随机生产模拟。

4 算例分析

本文采用 IEEE-RTS1979<sup>[14]</sup> 系统算例系统。其发电系统含 9 座常规电站 32 台机组,装机容量 3 405 MW,具体情况参见表 1。

表 1 IEEE-RTS1979 系统发电机组数据

机组容量 (MW)	机组台数	强迫停运率 (FOR)	平均运行周期 (τ/h)	机组类型	燃料费用 (\$/MWh)
12	5	0.02	3 000	燃油	27.6
20	4	0.10	500	燃油	43.5
50	6	0.01	2 000	水电	0
76	4	0.02	2 000	燃煤	14.4
100	3	0.04	1 250	燃油	23
155	4	0.04	1 000	燃煤	11.64
197	3	0.05	1 000	燃油	22.08
350	1	0.08	1 250	燃煤	11.4
400	2	0.12	1 250	核电	6

为验证本文算法的有效性,在 IEEE-RTS1979 引入以我国西北部地区某地的风电场的负荷数据,装机容量为 200 MW,约占系统总装机的 5.87%。该风电场某时段的风速、风电功率统计数据已知。以风电场实测功率序列(以小时为时间间隔)作为原始数据,运用优化的等效多状态模型进行风电场建模;针对不加入风电场、加入风电场、加入 200 MW 理想机组等 3 种情形(依次为情形 1、2、3)运用改进后的等效电量函数法分别进行随机生产模拟计算,得到如表 2 所示的结果。

对比三种情形,由于风电场的加入,使得系统中常规机组的发电量较情形 1 有所减少,而系统 EENS、LOLP 等可靠性指标都较情形 1 有所提升,系统可靠性指标的提升量小于增加 200 MW 理想机组的情形 3。表明风电场对于提高系统可靠性能够起到一定作用。同时,受风电出力随机波动的影响,情形 2 中的火电机组的启停次数指标 FGSUC 较不考虑风电的情形 1 有所增加,说明风电场的加入会导致常规机组增加额外的启停次数。表 3 则反映了风电场的加入对于发电成本的影响。

由表 3 可知,风电场接入后,总的生产成本下降了 292.83 万美元,说明风电并网使得总体发电成本下降明显,能够为经济效益的提升带来裨益。通过计算发现,对生产成本起关键性作用的是环境成本的变化,其占总可避免费用的比例达到了 63.6%,风电场巨大的环境价值可见一斑。尽管风电场的装机容量较小,仅占系统总装机的 5.87%,其并网对

表 2 含风电场的随机生产模拟结果(52 周)

模拟指标	情形 1	情形 2	情形 3
总发电量(GWh)	14 385.18	14 385.05	14 385.09
常规机组电量(GWh)	14 385.18	14 099.79	14 385.09
风电电量(GWh)	—	285.26	—
EENS(GWh)	1.332 685	1.146 327	1.039 845
LOLP	0.001 256	0.001 083	0.001 015
FGSUC(/MW·次)	14.536	16.862	15.862

表 3 风电场 A 接入前后的费用对比(104 美元)

情形	情形 1	情形 2	节省费用
燃料成本	3 365.97	3 248.20	117.77
环境成本	1 833.01	1 646.66	186.35
停电成本	13.32	11.05	2.27
启停成本	199.18	212.74	-13.56
合计	5 411.48	5 118.65	292.83

系统的停电成本和机组启停成本的影响仍不容小视,其中启停成本的增加量占总可避免费用的4.63%,随着风电装机容量的不断提升,可以预见其对于启停费用的影响将更加明显。

## 5 结 论

本文在传统等效电量函数法的基础上综合运用了等效持续负荷曲线和等效频率负荷曲线,考虑了风电负荷的时序性以及风电并网对原有电力系统造成的额外启停机影响,在进行随机生产模拟过程中采用优化的风电场模型模拟得到以下结论:

- (1) 风电场的接入可以从一定程度上提高原有电力系统的可靠性;
- (2) 风电并网会使等效负荷波动更加剧烈,导致常规机组启停次数增加,产生额外的生产成本。在随机生产模拟的成本计算中不仅要考虑风力发电所节约的资源成本和环境成本,同时还要考虑风电并网所带来的额外成本,这样才能更加准确的评估风电场的经济效益;
- (3) 采用优化的等效多状态风电场模型进行建模可以体现风电负荷的波动特性,同时可以简化模拟过程,便于计算。

## 参 考 文 献

- [1] 华泽嘉,张啸,迪路. 风电场布机优化分析[J]. 东北电力大学学报,2015,35(5):56-62.
- [2] Borkowska B. Probabilistic load flow[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems,1974,93(3):752-759.
- [3] Rau N S,Toy P,Schenk K F. Expected Energy Production Costs by the Method of Moments[J]. IEEE Trans on Power Apparatus & Systems,1980,99(5):1908-1917.
- [4] Caramanis M,Fleck W,Stremel J. Probabilistic Production Costing: An Investigation of Alternative Algorithms[J]. Electrical Power & Energy Systems,1983,5(2):75-86.
- [5] 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.
- [6] 康重庆,白利超,夏清,等. 基于序列运算理论的随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报,2002,22(9):6-11.
- [7] Levitin G. The universal generating function in reliability analysis and optimization[M]. New York:Springer,2005:6-11.
- [8] 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):150-153.
- [9] 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.
- [10] 周双喜,王海超,陈寿孙. 风力发电运行价值分析[J]. 电网技术,2006,30(14):98-102.
- [11] 张步涵. 计及机组爬坡速率约束的发电报价策略[J]. 水电能源科学,2006,24(3):58-62.
- [12] Arif S. Malik,Brian J. Cory. An Application of Frequency and Duration Approach in Generation Planning[J]. IEEE Trans. on Power Systems,1997,12(3):1076-1084.
- [13] 葛延峰,李焕奇,李鸿博,等. 一种处理风电场静态功率等值分散性的等效风速法[J]. 东北电力大学学报,2014,34(5):48-53.
- [14] The Reliability Test System Task Force. IEEE Reliability Test System[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems,1979,98(6):2047-2054.

## An Improved Method Of Probabilistic Production Simulation Considering Wind Power Integration

SUN Liang,HAO Guo-yi

(School of Electrical Engineering,Northeast Dianli University,Jilin Jilin 132012)

**Abstract:** Consider the impact of wind power, on the basis of traditional methods of probabilistic production simulation, the equivalent load duration curve and the equivalent frequency load curve was integrated used to retain the timing of wind load, thereby increasing the accuracy of the stochastic simulation of dynamic production cost analysis. The wind farm modeling ideas was optimized to simplify the process of probabilistic production simulation. IEEE-RTS1979 system as an example to verify the accuracy and usefulness of the improved methods in probabilistic production simulation process.

**Key words:** Probabilistic production simulation; Equivalent power function; Wind farm modeling; Economic benefits