

含风电电力系统随机生产模拟的改进算法

曲翀, 王秀丽, 谢绍宇, 别朝红

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统随机生产模拟忽略负荷的时序特性而难以考虑机组启停、备用、调峰等相关动态费用的问题, 将转移频率分析纳入随机生产模拟框架中, 形成了改进等效电量频率法. 该方法通过等效负荷频率曲线(ELFC)的卷积考虑机组启停, 将生产成本分析的范畴拓宽到动态费用的计算. 根据所提算法和含风电的 EPRI-36 算例, 比较了风电并网前后系统可靠性指标、燃料成本、环境成本和动态费用等的变化, 并研究了风电装机规模对动态费用率的影响. 结果表明, 相对于动态费用的增加, 风电对系统可靠性与经济性的改善是主要的, 但动态费用率随着风电规模的扩大而提高.

关键词: 风电; 随机生产模拟; 改进等效电量频率法; 动态费用

中图分类号: TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)06-0115-07

An Improved Algorithm for Probabilistic Production Simulation of Power Systems with Wind Power

QU Chong, WANG Xiuli, XIE Shaoyu, BIE Zhaohong

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The volatility and intermittency of wind power may increase dynamic cost concerned with unit startup, shutdown, reserve and peak regulation. The traditional probabilistic production simulation ignores chronological load characters, which cannot account for the dynamic cost. To solve this difficulty, the transition frequency analysis is brought into the probabilistic production simulation framework, and a modified equivalent energy and frequency function method is proposed. This method takes unit startup and shutdown into account by convoluting equivalent load frequency curves (ELFCs), and therefore includes the dynamic cost in the consideration of production costing. With the proposed algorithm and the wind power integrated EPRI-36 test system, the impact of the wind farms on reliability metric and more holistic cost information including fuel cost, environmental cost and dynamic cost is discussed, and the impact of the wind power scale on dynamic cost rate is also studied. It indicates that with the wind power integrated, despite more dynamic cost, the system reliability is improved and the total cost is reduced, and the dynamic cost rate increases with the wind power expansion.

Keywords: wind power; probabilistic production simulation; modified equivalent energy and frequency function method; dynamic cost

随着风电的大规模集中开发, 风电装机容量不断扩大, 风电出力的随机性、间歇性和反调峰特性给电力系统的规划和运行带来了巨大挑战.

文献[1-2]利用实测数据研究了酒泉风电基地出力特性, 并指出并网后长时间尺度下风电出力的明显相关性, 要求电力系统配套更多的常规电源用

于调峰.文献[3]指出,甘肃电网接入5 160 MW风电后,净负荷最大峰谷差近似为原始负荷平均峰谷差的3倍.甘肃电网2010年各月份平均峰谷差率已接近或超过火电机组日内不启停时的最大调峰能力.由此可见,在含风电的电力系统中,常规机组的启停配合、参与调峰变得更为频繁,也将耗费更高的成本,风电渗透率的提高使这一部分额外成本越来越突显.大量文献探讨风电场可靠性建模^[4-5]或调峰策略^[3,6],却鲜见文献在含风电的电源规划经济性评价中计及与常规机组的启停、备用、调峰等因素相关的动态费用.如何评估动态费用从而使电源规划具有一定运行层面的意义,对于全面分析生产成本、评价风电场效益和确定接纳风电的适当规模是至关重要的.

电力系统随机生产模拟是考虑了机组随机故障后计算各机组发电量、系统的发电成本及可靠性指标的有力工具^[7-8].然而,传统随机生产模拟的基础是将时序负荷曲线转化为持续负荷曲线,忽略了与时序相关的信息和约束,例如机组启停费用、最小开关机时间要求、火电机组的爬坡率约束等.因此,传统方法无法计及由负荷波动引起的常规机组的启停、热备用等动态特性及动态费用,得到的生产成本相对粗略.在优先接纳风电的原则下,大规模风电的接入可能使系统净负荷曲线的波动性增强,峰谷差增大,从而导致常规机组的启停次数增多,动态费用增加.传统的随机生产模拟算法在全面分析生产成本方面已难以满足电力系统的实际需求.

基于此背景,在等效持续负荷曲线(ELDC)和频率-持续时间法(FD)相结合方法^[9-11]的启发下,文献[12]提出了一种将等效电量函数法(EEF)^[13]与FD相结合的随机生产模拟算法——等效电量频率法.该算法在一定程度上恢复了传统随机生产模拟所忽略的负荷时序特性,保留了风电出力的波动性,可以评估风电场对常规机组启停造成的影响和相关动态费用.但是,该方法未明确给出转移频率表征机组启停的物理含义和计算方法,不能在统一时间尺度下进行等效负荷频率曲线的卷积运算.

在文献[12]的基础上,本文改进了等效电量频率法,更加明确地给出了转移频率的含义和计算方法,修正了卷积公式,使其两个分量的时间尺度统一,揭示了等效负荷频率曲线(ELFC)卷积运算的机理.同时,结合算例精细地分析了大规模风电接入后系统可靠性指标、燃料成本、环境成本和动态费用等的变化,研究了风电装机规模对系统动态费用率

的影响.

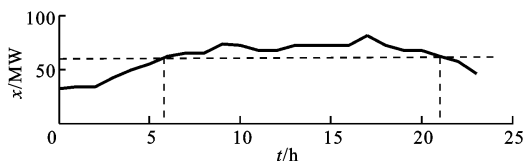
1 负荷频率曲线

1.1 负荷频率曲线的含义

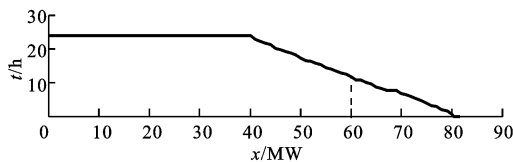
负荷转移频率或负荷频率曲线 $f_L(x)$ 是频率-持续时间法的重要概念.设在研究周期 T 内负荷水平 x 从向上方向穿过时序负荷曲线的平均次数为 σ ,则负荷转移频率为

$$f_L(x) = \sigma/T \quad (1)$$

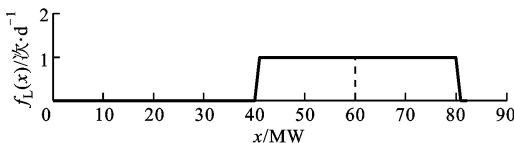
负荷频率曲线可以同持续负荷曲线一起较全面地反映时序负荷信息,且比时序负荷曲线更容易运算处理.图1利用一个实际算例说明 $f_L(x)$ 反映常规机组启停次数的原理.



(a) 时序负荷曲线



(b) 持续负荷曲线



(c) 负荷频率曲线

图1 负荷频率曲线的含义

当天6时前后,系统负荷上升至60 MW.假设,此时需要新开一台火电机组承担新增的腰荷,即安排在持续负荷曲线下60 MW所对应位置处带负荷.那么,在22时之前,由于系统负荷都大于60 MW,这台机将一直处于开机状态.直到22时之后,系统负荷降低,这台机停机或压出力保持热备用.可见,在1 d内,所研究的这台火电机组开、停机各1次,其对应的负荷转移频率为

$$f_L(60 \text{ MW}) = 1 \text{ 次/d}$$

由以上分析可见,负荷为 x 处的机组在研究周期内的开、停机次数与 $f_L(x)$ 是对应的.随着负荷 x 不断增大,需要按计划依次启动机组参与调峰,这些机组计1次开机;当负荷 x 逐步减小,需要这些机组按计划压出力运行或停机以保持产与用的实时平

衡,这些机组计 1 次停机.

此外,同持续负荷曲线一样,负荷频率曲线的横坐标也是系统负荷,这启示我们可以通过修正等效负荷来计及机组故障.

1.2 负荷频率曲线的建立

本文应用文献[7]中形成负荷频率表的算法,求取负荷转移频率 $f_L(x)$. 负荷可以看作负的发电机组容量,因此设定负荷由小功率向大功率转移为向下转移,反之为向上转移,同时假设系统的时序负荷曲线如图 2 所示,其负荷频率曲线建立的方法如下所述.

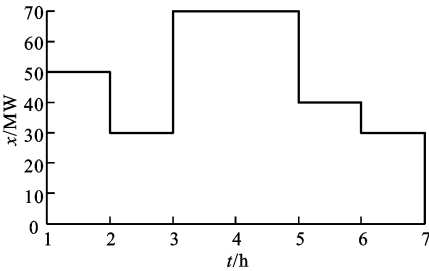


图 2 时序负荷曲线

首先,取步长 Δx ,将负荷功率离散化. 当取 $\Delta x = 10$ MW 时,图 2 所示负荷曲线共有 8 个水平分级. 设负荷功率 $x_i = i\Delta x$ 在某一分级(i 为分级序号)出现的时间为 t_{ij} (j 为负荷变化的时刻),可以计算下一时刻负荷升高时,向上转移率 $\lambda'_{ij} = 0$,向下转移率 $\lambda''_{ij} = 1/t_{ij}$,负荷处于该分级的概率 $p_{ij} = t_{ij}/T$. 根据由状态图求增量频率的计算公式[7],点 $(j, i\Delta x)$ 处的增量频率为

$$f_{ij} = p_{ij}(\lambda'_{ij} - \lambda''_{ij}) = -1/T \tag{2}$$

同理,当下一时刻负荷降低时,该点的增量频率为

$$f_{ij} = 1/T \tag{3}$$

可以看出,负荷在任何一个分级的增量频率的绝对值恒等于 $1/T$,而与其持续时间 t_{ij} 无关. 接着,可以求得负荷 x_i 的总增量频率

$$f_i = \sum_j f_{ij} \tag{4}$$

最后,可以得到负荷 x_i 的累积频率

$$f_i^* = \sum_{k \geq i} f_k \tag{5}$$

负荷曲线的研究周期 $T = 6$ h,这样负荷在任何一个分级的增量频率只能取 $-1/6$ 和 $1/6$ 两个值,前者对应于负荷增大的情况,后者对应于负荷减小的情况. 从负荷曲线起始时刻向后逐点扫描,建立累积频率表如表 1 所示.

表 1 负荷频率表及负荷频率曲线

$f_L(x)$ 的形成过程						次 $\cdot h^{-1}$		
序号	各时刻的增量频率						f_i	f_i^*
	1	2	3	4	5	6		
0							0	0
1							0	0
2							0	0
3	-1/6		-1/6				-2/6	0
4	-1/6	1/6	-1/6			1/6	0	2/6
5		1/6	-1/6		1/6		1/6	2/6
6			-1/6		1/6		0	1/6
7					1/6		1/6	1/6

根据 1.1 节对负荷转移频率的定义,写出各负荷分级对应的 $f_L(x_i)$,发现总有

$$f_L(x_i) = f_i^* \tag{6}$$

从表 1 可以看出,如果负荷增大时不记录表中的一 $1/6$,只在负荷减小时记录 $1/6$,则由扫描过程中的数字横向相加即可直接得到 $f_L(x_i)$. 这就是建立负荷频率曲线的基本方法.

2 等效负荷频率曲线的卷积过程

与 ELDC 类似,ELFC 也可由卷积的方法得到. 假设 1.2 节所建立的负荷频率曲线为 $f_{EL}^{(0)}(x)$,安排完第 $i - 1$ 台机组后的等效负荷频率曲线为 $f_{EL}^{(i-1)}(x)$,则安排完第 i 台机组后的等效负荷频率曲线为

$$f_{EL}^{(i)}(x) = f_1^{(i)}(x) + f_2^{(i)}(x) \tag{7}$$

定义 $f_1^{(i)}(x)$ 为移位分量, $f_2^{(i)}(x)$ 为循环分量,并且

$$f_1^{(i)}(x) = p_i f_{EL}^{(i-1)}(x) + q_i f_{EL}^{(i-1)}(x - C_i) \tag{8}$$

$$f_2^{(i)}(x) = \frac{F^{(i-1)}(x - C_i) - F^{(i-1)}(x)}{T\tau_i} \tag{9}$$

式中: C_i 是第 i 台机组的额定容量; p_i 和 q_i 分别是第 i 台机组的可用率和强迫停运率, $p_i = 1 - q_i$; τ_i 是第 i 台机组的平均循环周期,也即平均故障间隔时间(MTBF); $F^{(i-1)}(x)$ 是安排完第 $i - 1$ 台机组后 ELDC 表示的持续时间.

移位分量 $f_1^{(i)}(x)$ 反映了初始负荷频率曲线 $f_{EL}^{(0)}(x)$ 随着等效负荷的增大不断向右平移的过程,不直接反映机组故障的影响. 由于系统原负荷的转移频率取决于时序负荷曲线的固有形状,并不因某台机组停运而发生本质变化,随着机组按顺序加载,潜在的随机停运导致系统的等效负荷增加. 负荷频

率曲线的横坐标是等效负荷,为了保证转移频率与负荷之间不失去对应,负荷频率曲线必须随着等效负荷的增加而右移,正如随着等效负荷的增加传统随机生产模拟对 ELDC 所做的右移修正。 $f_{\text{EL}}^{(i)}(x)$ 的两部分 $p_i f_{\text{EL}}^{(i-1)}(x)$ 和 $q_i f_{\text{EL}}^{(i-1)}(x - C_i)$ 分别提取了第 i 台机组正常运行和故障发生情况下的形状分量,从而刻画了由潜在故障导致的负荷频率曲线的形状变化。

循环分量 $f_2^{(i)}(x)$ 反映了第 i 台机组在按计划运行过程中,随时可能发生停运而引起计划外的启停。例如,一台机组在某负荷水平下带负荷的过程中可能以概率 q_i 发生故障,这时就需要备用机组替代运行;修复后,再启动该机组,这就使该机组多了一次开机。该分量将第 i 台机组总的运行时间除以循环周期 τ_i ,即为周期 T 内由于机组状态循环引起的启停次数的额外增加,直接反映了机组故障的影响。为了保证与 $f_1^{(i)}(x)$ 具有同样的量纲,需将持续时间除以 T 标准化为概率分布,以便在相同的时间尺度下进行卷积。

将式(7)~式(9)离散化,可得

$$f_{\text{EL}}^{(i)}(J) = p_i f_{\text{EL}}^{(i-1)}(J) + q_i f_{\text{EL}}^{(i-1)}(J - K_i) + \frac{F^{(i-1)}(J - K_i) - F^{(i-1)}(J)}{T\tau_i} \quad (10)$$

其中: $J = \langle x/\Delta x \rangle + 1$, 其中 $\langle x/\Delta x \rangle$ 表示不超过 $x/\Delta x$ 的最大整数; $K_i = C_i/\Delta x$, 步长 Δx 取所有机组容量的最大公约数,因而 K_i 是整数。

将等效电量函数的定义^[13-14]代入式(10),得

$$f_{\text{EL}}^{(i)}(J) = p_i f_{\text{EL}}^{(i-1)}(J) + q_i f_{\text{EL}}^{(i-1)}(J - K_i) + \frac{E^{(i-1)}(J - K_i) - E^{(i-1)}(J)}{T\tau_i \Delta x} \quad (11)$$

式中: $E^{(i-1)}(J)$ 是安排完第 $i-1$ 台机组后从 x 到 $x + \Delta x$ 这段负荷对应的电量。

考虑机组在两种情况下启动:①按照事先制定的机组加载顺序,当负荷增长到机组的加载点时,按计划增开机组;②机组正在运行,突然发生故障,待故障修复后再投入运行。这两种情况分别对应于移位分量和循环分量,所以第 i 台机组在研究周期 T 内启动次数的期望值为

$$F_{\text{Si}} = T f_{\text{EL}}^{(i-1)}(J_{i-1}) \quad (12)$$

其中第 i 台机组的加载位置

$$J_{i-1} = x_{i-1}/\Delta x \quad (13)$$

式中: x_{i-1} 是已加载的前 $i-1$ 台机组的总容量。

3 计及动态费用的生产成本分析

对于逐台加载到系统中的 n 台常规机组,按式

(12)逐台计算周期 T 内启动次数的期望值 F_{Si} ,进而可以计算每台机组的动态费用。

3.1 动态费用计算

常规机组的动态费用 C_d 可按下式计算

$$C_d = C_{\text{tsu}} + C_{\text{bsu}} + C_{\text{sd}} \quad (14)$$

式中: C_{tsu} 是汽轮机启动费用; C_{bsu} 是锅炉启动费用; C_{sd} 是停机费用。

汽轮机启动过程就是把系统的压力提升到额定压力的过程。在机组作为冷、热备用等不同的启动条件下, C_{tsu} 相对固定,仅取决于某台机组在研究周期内启动次数的期望值。系统中 n 台汽轮机组的启动费用为

$$C_{\text{tsu}} = \sum_{i=1}^n p_i F_{\text{Si}} C_{\text{tsu},i} C_i \quad (15)$$

式中: $C_{\text{tsu},i}$ 为第 i 台机组的单位额定容量每次的汽轮机启动费用。在研究周期 T 内停机次数总是等于启动次数,从而停机费用 C_{sd} 也相对固定,可以合并在第 i 台机组的参数 $C_{\text{tsu},i}$ 中考虑。对于含核电机组的系统,为保证其安全及经济性,在较短的周期内核电机组一般不启停,将其启停费用置 0 处理。

锅炉启动过程就是把炉内温度提升到工作温度的过程。 C_{bsu} 取决于启动时炉内的温度,具体数值随着启动时炉内温度的升高而减小。启动时炉内的温度取决于该机组的平均离线时间

$$T_i^{\text{off}} = \frac{1 - F^{(i)}(x_i) T^{-1}}{f_{\text{EL}}^{(i)}(x_i)} = \frac{T - F^{(i)}(x_i)}{T f_{\text{EL}}^{(i)}(x_i)} \quad (16)$$

将式(16)离散化后,可得

$$T_i^{\text{off}} = \frac{1 - E^{(i)}(J_i)(T\Delta x)^{-1}}{f_{\text{EL}}^{(i)}(J_i)} \quad (17)$$

如果机组停运后锅炉没有持续加热而逐渐冷却下来,炉内温度将按照时间常数 τ_i^{B} 近似以指数规律下降。平均离线时间越长,炉内温度越低,启动费用越高。因此,锅炉启动总费用为

$$C_{\text{bsu}} = \sum_{i=1}^n p_i F_{\text{Si}} C_{\text{bsu},i} C_i (1 - e^{(-T_i^{\text{off}}/\tau_i^{\text{B}})}) \quad (18)$$

式中: $C_{\text{bsu},i}$ 为第 i 台机组单位额定容量每次的锅炉启动费用。

在一台发电机组随机停运后,可以根据负荷变化的趋势选择使锅炉处于热或冷备用状态。前者使锅炉保持一定的温度,后者使锅炉彻底冷却、待机组修复后再重新启动,如何选择,需要权衡比较两者所产生的燃料和折旧费用。所以,考虑增加一个冷备用状态会使锅炉启动费用的评估更加准确^[10];可以确定一个标准,比如当平均离线时间 T_i^{off} 小于时间常

数 τ_i^B 的25%时,锅炉应维持热备用;否则,维持冷备用。鉴于影响不大,本文忽略冷备用状态。

3.2 生产成本计算

全面计及燃料费用、环境成本、停电损失和动态费用的系统总生产成本为

$$C_{\Sigma} = C_{\Sigma 0} + C_d \tag{19}$$

其中,由传统随机生产模拟方法即可得到的系统生产成本

$$C_{\Sigma 0} = C_{\text{fuel}} + C_{\text{envi}} + C_{\text{voll}} \tag{20}$$

式中: C_{fuel} 为燃料费用; C_{envi} 为环境成本; C_{voll} 为停电损失。

进而风电的可避免费用^[4]为

$$\Delta C = C_0 - C_1 \tag{21}$$

式中: C_0 是不含风电系统的总生产成本; C_1 是风电接入后系统的总生产成本。

为了使不同规模的系统的动态费用具有可比性,以发电厂直接承担的 C_{fuel} 和 C_d 之和为基准,定义动态费用率指标

$$\gamma = C_d / (C_{\text{fuel}} + C_d) \tag{22}$$

4 算例分析

4.1 修改后的 EPRI-36 机系统

本文采用 EPRI-36 机系统作为算例,该系统的总装机容量为 8 800 MW,各发电机组参数同文献[12],年最大负荷为 8 502 MW,负荷采用 IEEE-RTS 1979^[15]一月份前 30 d 的数据(标么值),模拟时间共计 720 h,单位失负荷价值取为 1 000 美元/(MW·h)。

风电场采用单机容量为 1 500 kW 的机组,其切入风速、额定风速、切出风速分别是 3、10.3、22 m/s。计算中的风速采用达坂城风电场某月每 10 min 的实测风速,风电场每小时的等效出力取该小时内 6 个风速点对应的风电场出力的平均值。

本文将首先对以下两个场景进行生产模拟。

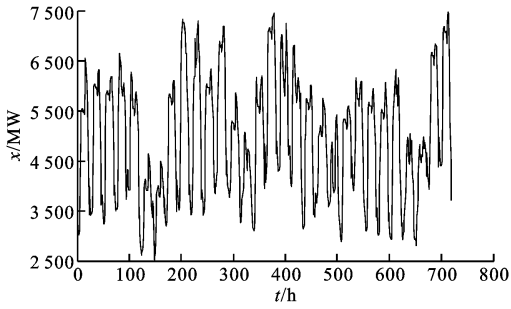
场景 0:不含风电的原系统。

场景 1:在场景 0 的基础上,接入装机容量为 1 000 MW 的风电场。

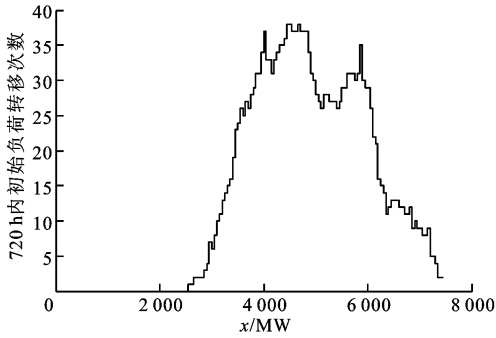
4.2 生产模拟结果

4.2.1 转移频率分析 根据优先接纳风电的原则,把预测风电出力作为负的负荷加到系统原始负荷上,得到净负荷曲线。根据 1.2 节所述方法,选取 50 MW 的步长,从净负荷曲线的起始时刻向后逐点扫描,即可建立初始负荷频率曲线。图 3 给出了 1 000 MW 风电场接入后系统的净负荷曲线及其对应的

初始负荷频率曲线。



(a)原始负荷曲线减 1 000 MW 风电场出力后的净负荷曲线



(b)净负荷曲线对应的初始负荷频率曲线

图 3 场景 1 的净负荷曲线及其初始负荷频率曲线

从图 3 可以看出,在 720 h 的研究周期内,5 000 MW 负荷对应的初始负荷转移次数为 28 次。总的来看,4 000~5 000 MW 的净负荷区间对应着最大的初始负荷转移频率,预计在该段带负荷的燃煤机组面临最频繁的启停或调节出力要求。在 0~3 000 MW 的基荷段和 7 000~7 500 MW 的尖峰负荷段,运行的机组对应较小的负荷转移频率,启停相对较少。

逐台加载机组,两种场景下 ELFC 的卷积过程分别如图 4 和图 5 所示。比较初始 ELFC 曲线,场景 1 的初始负荷转移频率的平均值为 0.007 2,大于场景 0 的相应平均值 0.006 5;比较最终 ELFC 曲线,对于等效负荷转移频率的最大值和平均值,场景 1 均大于场景 0。这印证了风电并网后净负荷曲线的波动程度增强。

4.2.2 生产成本分析 表 2 给出了应用改进等效电量频率法进行随机生产模拟的结果。从表 2 可以得出以下结论。

(1)1 000 MW 风电场的接入使系统的电量不足期望值 E_{EENS} 减少了 56%,电力不足概率 P_{LOLP} 降低了 54%,说明风电对改善系统的可靠性仍有相当的贡献。1 000 MW 风电场接入后,燃料费用可望节

省 23%，环境成本可望减小 13%，停电损失期望值减小了 56%。

(2)常规机组的单位容量启停频率指标 I_{FGSUC} 增大了 14%，说明风电接入后需要常规机组启停配合的频繁程度增加了 14%，所以启停费用增加：汽轮机启停费用增加了约 6%，占总成本的比重由 1.5% 上升至 2.3%；锅炉启停费用增加了约 3%，占总成本的比重由 0.8% 上升至 1.1%。

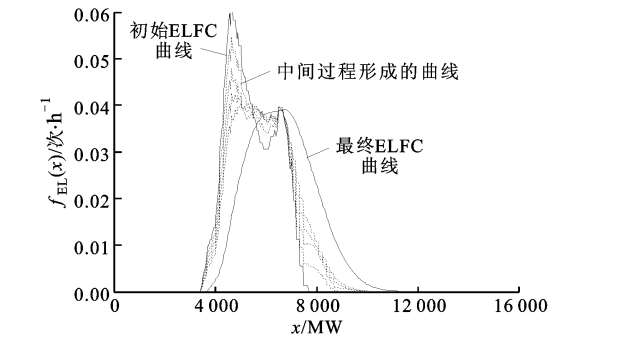


图 4 场景 0 的等效负荷频率曲线的卷积过程

(3)风电场的月度可避免费用为 28 306 780 美元，风电并网后较并网前的总生产成本节省了 26%。

可见，风电接入后，改善系统可靠性、节省燃料费用和减少环境成本是主要的，造成机组启停等动态费用的增加是次要的，在精细化的发电成本评估中不宜忽略。

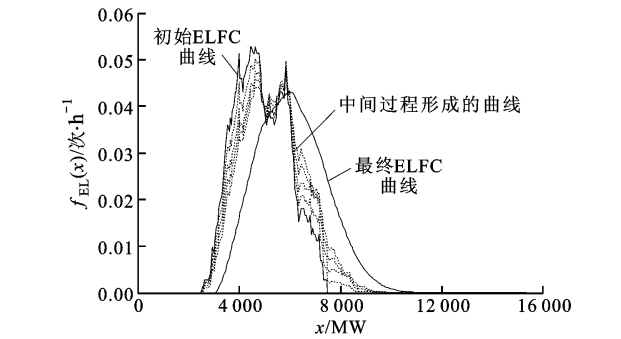


图 5 场景 1 的等效负荷频率曲线的卷积过程

表 2 基于改进等效电量频率法的随机生产模拟结果

场景	$E_{\text{EENS}}/\text{MW} \cdot \text{h}$	P_{LOLP}	I_{FGSUC}	燃料费用 /美元	汽轮机启停 费用/美元	锅炉启停 费用/美元	环境成本 /美元	停电损失 /美元
0	31 401	0.073 6	11.459 1	62 824 000	1 869 960	896 734	25 950 300	31 401 000
1	13 796	0.034 1	13.081 6	48 267 000	1 976 000	921 514	22 632 500	13 796 000

4.3 风电接入规模对动态费用率的影响

令算例中风电场的装机容量从 0 按一定步长增加到 3 000 MW，可以得到动态费用率随着风电装机容量变化的趋势，如图 6 所示。可以看出：当未接入风电时，系统动态费用率为 4.2%；当风电场装机达到 1 500 MW 时，动态费用率上升为 7.0%；风电场装机增至 3 000 MW 时，动态费用率达到 10.4%。可见，随着风电装机规模的增大，动态费用在发电厂直接生产成本中所占的比重升高，在进行风电场规划时，根据预期的系统动态费用率限值，可以确定适当的风电接入规模。

5 结 语

本文引入的建立负荷频率曲线的算法经算例验证是有效的，可较好地应用于负荷动态特性和调峰需求信息的提取。与先前文献相比，本文提出了移位分量和循环分量的概念，使等效负荷频率曲线卷积公式的物理意义更明确，并修正了该卷积公式，使其

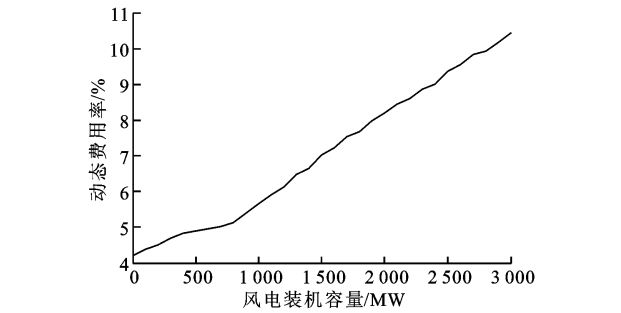


图 6 动态费用率随风电装机规模变化的曲线

两个分量的时间尺度统一。从算例结果来看，改进等效电量频率法对负荷时序特性的刻画更为准确，所得动态费用指标更贴近系统实际情况。

本文充分挖掘了随机生产模拟工具体现时序特性的潜力，在大规模风电并网的电力系统中应用性较好。但是，改进等效电量频率法尚未考虑机组组合对启停的影响，下一步将研究能量受限的水电机组和机组组合在该算法中的实现。

参考文献:

- [1] 肖创英,汪宁渤,丁坤,等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):1-7.
XIAO Chuangying, WANG Ningbo, DING Kun, et al. System power regulation scheme for Jiuquan wind power base [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10):1-7.
- [2] 肖创英,汪宁渤,陟晶,等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):64-67.
XIAO Chuangying, WANG Ningbo, ZHI Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 64-67.
- [3] 张宁,周天睿,段长刚,等. 大规模风电场接入对电力系统调峰的影响[J]. 电网技术,2010,34(1):152-158.
ZHANG Ning, ZHOU Tianrui, DUAN Changgang, et al. Impact of large-scale wind farm connecting with power grid on peak load regulation demand[J]. Power System Technology, 2010, 34(1):152-158.
- [4] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电力,2000,33(3):30-31.
CHEN Shuyong, DAI Huizhu, BAI Xiaomin, et al. Power system probabilistic production simulation including wind power plants[J]. Electric Power, 2000, 33(3):30-31.
- [5] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等. 风电场的发电可靠性模型及其应用[J]. 中国电机工程学报,2000,20(3):26-29.
CHEN Shuyong, DAI Huizhu, BAI Xiaomin, et al. Reliability model of wind power plants and its application [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3):26-29.
- [6] 张宏宇,印永华,申洪,等. 大规模风电接入后的系统调峰充裕性评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(22):26-31.
ZHANG Hongyu, YIN Yonghua, SHEN Hong, et al. Peak-load regulating adequacy evaluation associated with large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22):26-31.
- [7] 王锡凡. 电力系统规划基础[M]. 北京:中国电力出版社,1994:64-66,45-50.
- [8] 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):10-15,31.
WANG Xifan, WANG Xiuli. Probabilistic production simulation method and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8):10-15,31.
- [9] MALIK A S. Simulating limited energy units within the framework of ELDC and FD methods[J]. Electrical Power & Energy Systems, 2004, 26:645-653.
- [10] MALIK A S. An application of frequency and duration approach in generation planning[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(3):1076-1084.
- [11] MICHAEL G. The inclusion of dynamic factors in statistical power system cost models: Part I Assessment of start-up and banking costs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2):419-425.
- [12] 张节潭,程浩忠,胡泽春,等. 含风电场的电力系统随机生产模拟[J]. 中国电机工程学报,2009,29(28):34-39.
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, HU Zechun, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28):34-39.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

[本刊相关文献链接]

- 岳涵,赵登福,夏道止,等. 求解大型电力系统机电振荡模态的逆幂方法. 2010,44(10):93-98.
- 谷永刚,肖凯,夏经德,等. 利用增量二次规划和启发式方法的电力系统动态无功优化. 2010,44(8):106-111.
- 汪成根,张保会,李鹏,等. 基于自适应解列的电力系统解列面快速搜索. 2009,43(2):90-95.
- 别朝红,刘辉,李甘,等. 含风电场电力系统电压波动的随机潮流计算与分析. 2008,42(12):1500-1505.
- 别朝红,周婷,王锡凡. 电力系统多时段无功优化研究. 2008,42(6):698-702.
- 徐林,王秀丽,王锡凡,等. 电力系统充裕度分析中的快速组合事件概率算法. 2008,42(6):713-717.
- 李静耘,杜正春,楚国莉,等. 基于聚类的多运行方式下电力系统稳定器设计. 2008,42(2):204-208.
- 王云,张伏生,陈建斌,等. 电力系统多目标无功优化研究. 2008,42(2):213-217.
- 丁晓莺,王锡凡,王建学. 一种考虑可靠性指标的最优潮流模型. 2007,41(10):1219-1223.

(编辑 杜秀杰)