

## 考虑风电序贯特性及综合效益的随机生产模拟

户秀琼<sup>1</sup>, 张楠<sup>2</sup>, 任洲洋<sup>3</sup>

(1. 攀枝花学院电气信息工程学院, 攀枝花 617000; 2. 河南省济源供电公司, 济源 459000;  
3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 提出一种考虑风电序贯特性及综合效益的随机生产模拟方法。该方法综合考虑风速的随机性和风力发电机组的强迫停运对风电场输出功率的影响, 保留完整的时间信息, 除了能得到常规的生产模拟结果外, 还可定量评估风电场对常规机组造成的开停机影响及相关的动态费用。在此基础上所提出的风电场综合效益指标, 可全面、准确反映风电场的经济、环境效益, 可为系统的运行规划等提供重要的参考信息。最后, 针对EPR 136机组系统, 进行仿真分析, 验证所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 电力系统; 风电; 随机生产模拟; 可靠性评估

**中图分类号:** TM614

**文献标识码:** A

### 0 引 言

随机生产模拟是研究现代电力系统运营的重要工具。传统模式下的随机生产模拟, 常常是仅在考虑发电机组随机故障和负荷随机变化的情况下, 计算出系统在最优运行方式下各电厂的发电量、生产成本以及相应的可靠性指标<sup>[1,2]</sup>。然而随着风电大规模接入电力系统, 对系统的运营以及可靠性产生了很大的影响, 这主要是由于风力发电机组的输出功率受风速及风力发电机组强迫停运的影响, 具有间歇性、波动性且具有反调峰特性, 体现出来主要是随时间变化的序贯特性, 从而导致常规机组启停次数增多以及相关动态费用受到影响等问题<sup>[3,4]</sup>。这些问题无疑会影响随机生产模拟的结果。因此迫切需要在随机生产模拟中考虑风电场的影响。

如今, 在含风电场的电力系统随机生产模拟方面已取得了一些研究成果<sup>[5-12]</sup>。文献[5,6]将风电场等效为多状态发电机组加入到随机生产模拟中。该算法的核心是将具有序贯特性的负荷曲线转化为持续负荷曲线来计算, 丢失了与时间相关的信息, 忽略了负荷的序贯特性。因此也无法计及风电的序贯特性。文献[7~11]针对传统随机生产模

拟忽略负荷的序贯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, 提出新的随机生产模拟方法。其中, 文献[7~9]均考虑负荷的序贯特性, 计及风力机组强迫停运的影响, 从一定程度上体现风电的序贯特性, 但未考虑风速对风电输出功率的影响, 因此无法完全体现风电输出功率的序贯特性以及对系统相关动态费用的影响。文献[10,11]在考虑负荷序贯特性的基础上计及风速对风电机组出力的影响, 但未考虑风电机组强迫停运对风电场输出功率的影响, 因此和文献[7~9]一样无法完全体现风电的序贯特性以及对随机生产模拟的影响。文献[12]提出考虑负荷及风电场输出功率序贯特性的随机生产模拟方法, 计及风速以及风电机组强迫停运对风电场输出功率的影响, 但遗憾的是未进一步考虑风电场接入对常规机组的启停以及相关动态费用的影响, 同时也未对风电场的综合效益进行全面评估。

鉴于此, 本文提出一种考虑负荷与风电输出功率的序贯特性以及风电综合效益的电力系统随机生产模拟方法。该方法不但能综合考虑风速的随机性以及风力发电机组的强迫停运对风电场输出功率的影响, 而且能较完整地保留时间信息, 并能够评估与常规机组启停等相关的动态费用。而提

收稿日期: 2016-07-18

基金项目: 四川省教育厅科研项目(15ZB0427); 攀枝花学院重点培育项目(2015BY13)

通信作者: 户秀琼(1980—), 女, 博士、讲师, 主要从事电力系统优化运行与控制、新能源发电等方面的研究。huxiuqiongdu@163.com

出的风电场综合效益指标则能够较全面、准确地评估风电场接入的综合效益。

## 1 考虑风电场序贯特性的综合负荷模型

### 1.1 风电场出力模型

风电机组的输出功率不仅受到风速间歇性和波动性的影响,而且受风力发电机组强迫停运的影响。为了综合考虑上述因素,故提出一种新的风电场输出功率模型:首先,基于卷积法,将风电场等效为一台强迫停运率为零的风力发电机组;接着,根据风速的预测曲线以及风电机组的输出功率特性,计算风电场输出功率的时序变化曲线,由此得到具有序贯特性的风电出力模型。

#### 1.1.1 风电场的等效模型

假设风电场共有  $n$  台风力发电机组,第  $i$  台机组的额定容量为  $P_{wi}$ ,强迫停运率为  $q_{wi}$  ( $i=1,2,\dots,n$ ),可用率为  $P_{wi}$ ,选取  $\Delta P_w$  为各风力发电机组额定容量的最大公因数,令:

$$\begin{cases} K_{wi} = P_{wi} / \Delta P_w, & i = 1, 2, \dots, n \\ J_{wi} = (\sum_{j=1}^i P_{wj}) / \Delta P_w, & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $K_{wi}$  ——第  $i$  台机组额定容量对应的离散值;  $J_{wi}$  ——第 1 到第  $i$  台机组额定容量之和对应的离散值。

则有:

$$J_{wi} = J_{w(i-1)} + K_{wi}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

则风电场正常运行的额定容量状态,即风电场的可用容量状态共有  $J_{wn} + 1$  个,分别为:  $0, \Delta P_w, 2\Delta P_w, \dots, J_{wi}\Delta P_w, \dots, J_{wn}\Delta P_w$ 。风电场的可用容量概率密度分布  $f_{wn}$  可由  $n$  台风力发电机组的可用容量概率密度分布  $f_{wi}$  卷积而成。若已形成  $i-1$  台风力发电机组可用容量的概率  $F_{w(i-1)}$ ,则增加第  $i$  台机组(考虑强迫停运率为  $q_{wi}$ ,可用率为  $p_{wi}$ )后,  $F_{wi}$  可由式(3)所示的卷积计算公式求得。

$$F_{wi}(k) = q_{wi} F_{w(i-1)}(k) + p_{wi} F_{w(i-1)}(k - K_{wi}), \quad k = 0, 1, 2, \dots, J_{wn} \quad (3)$$

且有:

$$\sum_{k=1}^{J_{wn}} F_{wi}(k) = 1 \quad (4)$$

根据式(3)可求出  $F_{wn}$ ,进而可求出风电场可用

输出功率的期望值  $P_{we}$ 。因此,可将风电场等效为一台额定输出功率为  $P_{we}$ ,强迫停运率为零的风力发电机组。

#### 1.1.2 风电机组的输出特性

风力发电机组的输出功率与风速之间的函数关系可由式(5)所示的分段函数近似表达<sup>[9]</sup>。

$$P_{wg} = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_{ci} \\ g(v), & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_{we}, & v_r < v \leq v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $v_{ci}$ 、 $v_{co}$  ——切入、切出风速;  $v_r$  ——额定风速;  $P_{we}$  ——风力发电机组的额定输出功率,可由 1.1.1 节得到。

当风速  $v$  介于  $v_{ci}$  和  $v_r$  之间时,风力发电机组的输出功率  $P_{wg}$  可近似表示为风速  $v$  的函数  $g(v)$ ,即:

$$g(v) = P_{we}(v - v_{ci}) / (v_r - v_{ci}) \quad (6)$$

## 1.2 综合负荷模型

为完整保留负荷及风电场输出功率的序贯特性,并遵守风能优先调度的原则,故采用综合负荷模型,其形成步骤为:

1) 计算风电场可用容量的期望值;

2) 根据风速预测曲线及风力发电机组的输出功率特性求取风电场输出功率的时序变化曲线,得到具有序贯特性的风电出力模型;

3) 将对应时刻的负荷值与风电场输出功率值相减,即可得到具有序贯特性的综合负荷模型。

## 2 考虑序贯特性的含风电场随机生产模拟方法

### 2.1 火电机组可用容量的概率分布

假设系统中共有  $m$  台火电机组,第  $i$  台机组的额定容量为  $P_{gi}$ ,强迫停运率为  $q_{gi}$ ,可用率为  $p_{gi}$ ,选  $\Delta P_g$  为各火力发电机组额定容量的最大公因数。令  $K_{gi}$  为第  $i$  台机组额定容量以  $\Delta P_g$  为公因子的离散值;  $J_{gi}$  为第 1 到第  $i$  台机组容量之和以  $\Delta P_g$  为公因子的离散值。由此可得到火电机组各可用容量状态的概率  $F_{gi}$ ,计算公式如式(7)所示<sup>[13]</sup>。

$$F_{gi}(k) = q_{gi} F_{g(i-1)}(k) + p_{gi} F_{g(i-1)}(k - K_{gi}), \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad k = 0, 1, 2, \dots, J_{gm} \quad (7)$$

## 2.2 可靠性指标的计算

系统中  $m$  台火电机组可用容量的概率分布函数  $f_{gm}(k)$  和日时序负荷曲线如图 1 所示,其中,各可用容量状态的概率采用图左侧的箭头表示。由图 1 可知,对第  $k+1$  个状态而言,可用容量为  $k\Delta P_g$ ,该状态对应的期望缺电量为  $E_k$ ,则整个系统的期望缺供电量  $EENS_m$  即为各可用容量状态下的  $E_k$  概率加权之和,即:

$$EENS_m = \sum_{k=0}^{J_{gm}} E_k F_{gm}(k) \quad (8)$$

各机组的期望发电量  $E_{gi}$  可由式(9)求得:

$$\begin{aligned} E_{gi} &= EENS_{i-1} - EENS_i \\ &= p_{gi} \sum_{k=0}^{J_{gi(i-1)}} (E_k - E_{k+K_{gi}}) F_{gi(i-1)}(k) \end{aligned} \quad (9)$$

系统的电力不足概率  $LOLP$  为:

$$LOLP = \sum_{t=1}^T (\sum_{k=0}^{k_t} F_{gm}(k)) \quad (10)$$

式中,  $T$  ——研究周期;  $k_t$  ——不大于  $L_t$  的整数,其中  $L_t$  为  $t$  时刻的负荷值。

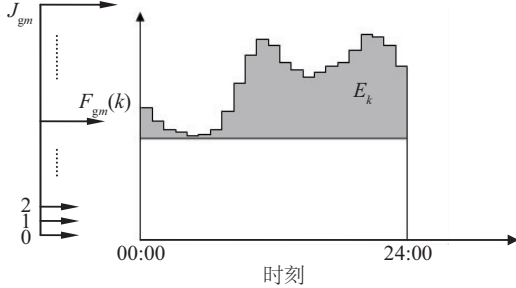


图1 时序负荷曲线

Fig. 1 Chronological load curve

## 2.3 计算流程

综上所述,考虑时序性的含风电场电力系统随机生产模拟方法的计算流程如图 2 所示。

## 3 风电场综合效益指标

为进一步说明风电场的接入对常规机组的开停机影响、相关动态费用的影响以及整个电力系统生产运营的影响,本文提出风电场的经济效益指标和环境效益指标以及相应的综合效益指标。

### 3.1 经济效益指标

#### 1) 资源节约效益 $C_{res}$

风电场接入系统后,将会对系统的燃料成本产

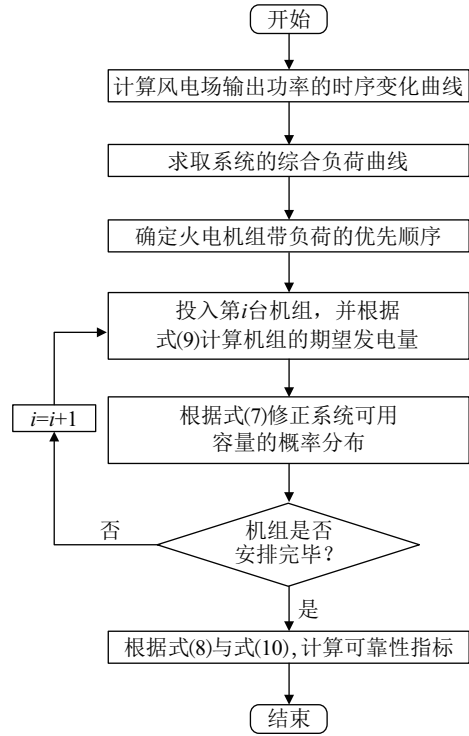


图2 本文所提随机生产模拟方法的流程

Fig. 2 General flow chart of the proposed probabilistic production simulation method

生影响。可采用资源节约效益  $C_{res}$  为来评估这种影响,其可由风电场接入前后系统燃料费用的变化值得得。

#### 2) 供电效益 $C_{uec}$

虽然风电场输出功率具有一定的间歇性和波动性,但其仍有一定的容量可信度,可替代一定容量的常规机组,因此,其会带来缺电成本的降低,降低值即为供电效益  $C_{uec}$ 。

#### 3) 机组经济效益 $C_{sys}$

火电机组的运行维护费用  $C_{om}$ 、启动费用  $C_s$ 、停机费用  $C_{sd}$  将不同程度的受到风电场接入的影响。因此可采用机组经济效益  $C_{sys}$  来综合评估这种影响:

$$C_{sys} = \Delta C_{om} + \Delta C_s + \Delta C_{sd} \quad (11)$$

式中,  $\Delta C_{om}$  ——风电场接入前后机组的运行维护费用变化值;  $\Delta C_s$  ——风电场接入前后机组的启动费用变化值;  $\Delta C_{sd}$  ——风电场接入前后机组的停机费用变化值。

### 3.2 环境效益指标

对于污染物完全排放的电厂,可利用污染物的环境价值指标和污染物的排放量直接求出环境成本;对于采用技术和设备减少污染物排放的电厂,

其环境成本应包括减排污染物所增加的费用。风电场的环境效益  $C_{env}$  可通过计算风电场接入前后,系统环境成本的变化值得到。

综上所述,风电场的综合效益  $C_{total}$  为资源节约效益  $C_{res}$ 、供电效益  $C_{uec}$ 、系统运行成本效益  $C_{sys}$ 、环境效益  $C_{env}$  之和:

$$C_{total} = C_{res} + C_{uec} + C_{sys} + C_{env} \quad (12)$$

## 4 算例分析

本文所采用的算例为 EPRI36 机组系统,装机

容量为 8800 MW。发电机组的参数和带负荷顺序如表 1 所示。负荷数据采用 IEEE RTS 中 1 月份前 30 天的数据<sup>[14]</sup>。共有风电场 2 个,假设二者相距较远,相互影响可忽略不计。2 个风电场所装风电机组数量均为 400 台,风电机组额定容量为 1500 kW,强迫停运率为 0.05,切入、额定、切出风速分别为 3、10.3、22 m/s<sup>[9]</sup>。机组的可靠性数据和运行维护费用见文献[15];机组启动、停机费用见文献[14];环境成本数据见文献[16]。

表 1 EPRI 36 机组系统发电机组数据  
Table 1 Generator units data for EPRI-36 unit system

编号	容量/MW	数量	强迫停运率	启停费用/ 美元·(兆瓦·次) <sup>-1</sup>	运行维护费用/ \$·(MW·h) <sup>-1</sup>	环境成本/ \$·(MW·h) <sup>-1</sup>	燃料费用/ \$·(MW·h) <sup>-1</sup>
1	1200	2	0.132	10	0.2	0.4	6.0
2	600	2	0.153	10	0.6	12	11.4
3	400	3	0.119	10	0.7	12	11.64
4	200	4	0.082	10	0.8	13	14.4
5	800	2	0.171	10	0.6	5.0	22.08
6	200	3	0.082	10	0.7	5.5	23.0
7	50	50	0.120	3.0	4.0	2.4	27.6

针对方案 1(风电场未接入)和方案 2(风电场接入)分别进行仿真分析。所得结果如表 2 所示。可知,风电场接入系统后,可靠性指标:期望缺供电量  $EENS$  及电力不足概率  $LOLP$  均大幅降低,分别降低 55.6%、55.06%。说明风电场输出功率虽然具有一定的间歇性和波动性,但对系统可靠性仍有一定的贡献,可代替一定额定容量的常规机组。在系统的生产成本方面,除机组的启停费用增加了 41.7%外,其他各项生产费用均有所下降。其中,系统的燃料费用下降 22.3%、机组的运行维护费用下降 24.4%、环境成本下降 20.2%。可见,风电场接入的确能给系统带来燃

料费用和环境成本等的下降,但是由于其本身的反调峰特性,会导致机组频繁启停,从而造成机组启停费用的增加。

表 3 为风电场的各个效益指标。对照表 3 与表 2 可知,风电场产生的综合效益占原系统生产成本的 19.3%,说明在该渗透率下,风电场具有较好的经济、环保综合效益。风电场的环境效益占总效益的 33.9%,虽然供电效益与资源节约效益之和占总效益的 73.4%,但是,因机组经济效益指标为负,因此,经济效益指标的比重降低为 66.1%。这同样是因为风电接入而导致调峰机组频繁启动的缘故。

表 2 随机生产模拟结果  
Table 2 Probabilistic production simulation result

方案	$EENS$ / MWh	$LOLP$	燃料 费用/\$	缺电 成本/\$	运行 费用/\$	环境 成本/\$	启停 费用/\$	总生产 费用/\$
1	31401	0.0721	46238324	1884049	2235971	25950314	4012000	80320658
2	13959	0.0324	35921872	837522	1690776	20697386	5686000	64833556



表3 风电场的各个效益指标

Table 3 The comprehensive benefit index of wind farm

资源节约效益 $C_{res}/\text{\$}$	供电效益 $C_{unc}/\text{\$}$	机组经济效益 $C_{sys}/\text{\$}$	环境效益 $C_{em}/\text{\$}$	综合效益 $C_{total}/\text{\$}$
10316452	1046527	-1128805	5252928	15487102

5 结 论

1)所提出的随机生产模拟方法不但考虑负荷及风电场输出功率的序贯特性,保留相关的时间信息,且计及风速及风力发电机组强迫停运的影响,同时还能准确评估风电接入系统之后相关的动态费用。

2)一定容量的风电场接入系统,不仅能带来常规机组的燃料、运行费用的减少以及可观的环保效益,而且还会使得缺电成本下降。但不容忽视的是,风电场接入会导致调峰机组启动次数的增多以及机组启停费用的增加。当系统接入的风电容量较大时,该问题应引起重视。

需要说明的是,本文目前的研究工作仅针对标准测试系统验证了所提方法和各项指标的有效性。本文后续的研究工作将针对含风电场的大规模实际电力系统来展开,以此验证本文所提指标针对实际电力系统是否全面有效,所提方法是否满足电力系统实时计算要求。

[参考文献]

[1] 康重庆,白利超,夏清,等.基于序列运算理论的随机生产模拟算法的实施[J].中国电机工程学报,2002,22(9):6—11.

[1] Kang Chongqing, Bai Lichao, Xia Qing, et al. Implement of probabilistic production cost simulation algorithm based on sequence operation theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 6—11.

[2] 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.

[2] Wang Xifan, Wang Xiuli. Probabilistic production simulation method and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 10—15.

[3] 雷亚洲,王伟胜,印永华,等.风电对电力系统运行的价值分析[J].电网技术,2002,26(5):10—14.

[3] Lei Yazhou, Wang Weisheng, Yin Yonghua, et al. Analysis of wind power value to power system operation [J]. Power System Technology, 2002, 26(5): 10—14.

[4] 戴慧珠,王伟胜,迟永宁.风电场接入电力系统研究

的新进展[J].电网技术,2007,31(20):16—23.

[4] Dai Huizhu, Wang Weisheng, Chi Yongning. Recent wind power integration study in China[J]. Power System Technology, 2007, 31(20): 16—23.

[5] 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—31,69.

[5] 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, 69.

[6] 张秉良,张博颐,吴耀武,等.基于随机生产模拟的风电场容量及电量效益[J].中国电力,2013,46(8):74—79.

[6] Zhang Bingliang, Zhang Boyi, Wu Yaowu, et al. An approach to evaluate the capability benefits and energy benefits of wind farms based on probabilistic product simulation[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 74—79.

[7] 曲翀,王秀丽,谢绍宇,等.含风电电力系统随机生产模拟的改进算法[J].西安交通大学学报,2012,46(6):115—121.

[7] Qu Chong, Wang Xiuli, Xie Shaoyu, et al. An improved algorithm for probabilistic production simulation of power systems with wind power[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(6): 115—121.

[8] 谈天夫,高山,李海峰,等.基于等效间隔-频率分布的含风电场电力系统随机生产模拟[J].电工技术学报,2014,29(12):148—157.

[8] Tan Tianfu, Gao Shan, Li Haifeng, et al. Power system probabilistic production simulation based on equivalent interval frequency distribution including wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 148—157.

[9] 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.

[9] 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.

- [10] 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.
- [10] Nie Yonghui, Li Tianyun, Guan Xiaohui, et al. Power system probabilistic production simulation including wind farms [J]. Power Systems Protection and Control, 2013, 41(14): 102—107.
- [11] 张建平, 张 翔, 程浩忠, 等. 考虑能效电厂影响的含风电电力系统随机生产模拟[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1804—1807.
- [11] Zhang Jianping, Zhang Xiang, Cheng Haozhong, et al. Production simulation of power system with wind farms considering EPP influence[J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1804—1807.
- [12] 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.
- [12] Zou Bin, Li Dong. Power system probabilistic production simulation with wind generation based on available capability distribution [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 23—31.
- [13] 夏 清, 王少军, 相年德. 时序负荷曲线下电力系统概率性生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(3): 21—28.
- [13] Xia Qing, Wang Shaojun, Xiang Niande. The probabilistic power system production simulation based on chronological load curve[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(3): 21—28.
- [14] Malik A S, Cory B J. An application of FD approach in generation planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1076—1084.
- [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.
- [16] 陆 华, 周 浩. 发电厂的环境成本分析[J]. 环境保护, 2004, 4(9): 51—54.
- [16] Lu Hua, Zhou Hao. Environmental cost analysis of power plants[J]. Environmental Economy, 2004, 4(9): 51—54.

## PROBABILISTIC PRODUCTION SIMULATION CONSIDERING CHRONOLOGICAL CHARACTERISTIC AND COMPREHENSIVE BENEFIT OF WIND FARMS

Hu Xiuqiong<sup>1</sup>, Zhang Nan<sup>2</sup>, Ren Zhouyang<sup>3</sup>

(1. School of Information and Electric Engineering, Panzhihua University, Panzhihua 617000, China;

2. Hennan Jiyuan Power Supply Company, Jiyuan 459000, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A new method of probabilistic production simulation considering the chronological characteristic of power system including wind power is proposed, as well as the comprehensive benefit index. Because of considering the probabilistic characteristic of wind speed and the impact of the forced shut-down of wind power generators on out-put power of wind farms, the proposed probabilistic production simulation method can retain the complete time information, and can not only give the regular production simulation result, but also assess the impact of wind farms on start-up and shut-down of conventional units, and the corresponding dynamic costs. On the basis of the probabilistic production simulation, the comprehensive benefit index of power farms is presented to value the economic and environmental profit of wind power integration exactly, which offers the significant information for operation and planning of power system. Finally, the case studies are carried out on EPRI-36 unit system and the validity and correctness of the proposed method and index are verified.

**Keywords:** power system; wind power; probabilistic production simulation; reliability analysis