

DOI: 10.7667/PSPC180485

考虑新能源接入对系统调峰性能影响的随机生产模拟算法

罗捷¹, 袁康龙², 钟杰峰², 林创², 陈思思²

(1. 广东电网公司肇庆供电局, 广东 肇庆 526000; 2. 中能建广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510660)

摘要: 针对新能源机组出力的随机性与波动性导致其消纳难的问题, 利用一种基于等效电量函数法的随机生产模拟算法辅助新能源与常规能源的协调规划。首先, 以多状态机组为基础, 引入分段模拟体现新能源的时序性, 克服传统等效电量函数法丢失时序信息的缺点。然后, 在系统可靠性指标(LOLP 和 EENS)的基础上, 提出两个描述系统调峰性能的指标——调峰容量不足概率与调峰电量不足期望值。最后, 采用 IEEE 的 RTS-86 测试系统验证算法的准确性和可行性, 以及探究风光能源接入对系统可靠性和调峰性能的影响。

关键词: LORCP; ERENS; 分段模拟; 等效电量函数法; 随机生产模拟

Probabilistic production simulation algorithm considering new energy's impact on regulation

LUO Jie¹, YUAN Kanglong², ZHONG Jiefeng², LIN Chuang², CHEN Sisi²

(1. Zhaoqing Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Zhaoqing 526000, China; 2. China Energy Construction Group Guangdong Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510660, China)

Abstract: The randomness and volatility of new energy cause difficulties in grid-connection and consumption. Based on the Equivalent Energy Function Method, a probabilistic production simulation algorithm is proposed, which helps to coordinate planning of new energy and conventional energy. Firstly, based on the multi-state model, segmented simulation is proposed to embody the timeliness of new energy, and the traditional Equivalent Energy Function Method's shortcoming of losing timing information is overcome. Secondly, based on the system reliability indices (LOLP and EENS), two indices describing the system's regulation performance are proposed, which includes Loss of Regulating Capacity Probability (LORCP) and Expected Regulating Energy Not Supplied (ERENS). Finally, the IEEE RTS-86 is applied to verify the accuracy and feasibility of the proposed algorithm and study the impact of wind and solar on system reliability and regulation.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd (No. 031200KK52160003) and International (Regional) Cooperation and Interexchange Project of National Natural Science Foundation of China (No. 51761145106).

Key words: LORCP; ERENS; segmented simulation; equivalent power function method; probabilistic production simulation

0 引言

根据《电力发展“十三五”规划》, 新能源正逐步发展成为中国的主要电源之一^[1]。当前中国大部分地区的弃风弃光问题严重, 对提高新能源消纳量的需求日益迫切, 大量学者从运行、规划、保护、控

制等方面开展研究^[2-4]。

作为电源规划中的重要环节, 电力系统的随机生产模拟算法是从规划的角度分析电力系统内负荷与发电机组的相互关系, 以模拟系统投建或改建完成后的电力电量供给情况为目的而设计的算法。基于等效电量函数法, 已经有大量关于含常规能源与新能源的随机生产模拟算法的研究。文献[5]通过将风电场出力从原始负荷曲线中分离, 得到净负荷曲线, 然后对净负荷进行发电电量的卷积运算, 计算系统可靠性指标和运行成本。该算法未考虑新能

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(031200KK52160003); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目资助(51761145106)

源机组出力间歇性和随机性对系统可靠性指标和运行成本计算结果的影响,仅按历史经验值把新能源作为定出力机组从负荷曲线上分离;文献[6]建立了风电和光伏的多状态机组模型,运用等效电量函数法计算得到系统的可靠性指标,该算法更合理地考虑了新能源出力特性的影响,但光伏模型直接利用电站出力的历史数据建立,且未考虑光伏出力的昼夜差异和系统的调峰需求;文献[7]针对光伏显著的时序特性提出把光伏作为定出力机组从负荷曲线分离,把风电作为多状态机组进行处理,此思路考虑了风光的差异性,却忽略了风光在出力随机性方面的共同点。此外,也有学者另辟蹊径对含新能源和常规能源的随机生产模拟方法进行研究,文献[8]根据风电容量可信度的概念,利用现有的随机生产模拟软件计算风电的实际有效容量,并据此对新能源与常规能源的协调规划问题进行了探究,但该研究仍未计及风电出力的随机特性;文献[9]基于序列运算理论设计了含新能源和常规能源的随机生产模拟算法。文献[10]从调峰充裕性的角度对含大规模风电的系统进行生产模拟,并引进若干指标描述系统的调峰裕度。

基于等效电量函数法以及受上述研究的启发,本文分别利用 Weibull 分布和 Beta 分布对风速和光照的随机性进行模拟,建立风电和光伏的多状态出力模型。同时针对新能源出力的时序特性,采用分时间段模拟的方法,各分段内分别选用不同时段的风速和光照典型分布参数。本文通过提出调峰容量不足概率(Loss of Regulating Capacity Probability, LORCP)与调峰电量不足期望值(Expected Regulating Energy not Supplied, ERENS)两项指标及其计算方法,结合当前已有的电力不足概率(Loss of Load Probability, LOLP)与电力不足期望值(Expected Energy not Supplied, EENS)指标,对电力系统在新能源接入后的可靠性和调峰性能进行研究。此外,本文算法还涉及利用调峰机组和抽水蓄能机组的模型修正时序负荷曲线。最后,采用 IEEE 的 RTS-86 测试系统对本文所提出的方法进行验证。

1 风电及光伏的多状态机组模型

1.1 风电的多状态机组模型

为模拟自然界中风速随机变化的情况,本文采用 Weibull 分布对短期内风速的概率分布进行描述^[11]。

$$f_w(v) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha}, 0 \leq v \leq \infty \quad (1)$$

式中: $f_w(v)$ 表示风速的概率密度函数, v 为风速;

α 为风速的形状参数; β 为风速的尺度参数。

风电机组的出力函数与风速密切相关,出力与风速的函数关系可表示为

$$P_w = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci}, v > v_{co} \\ P_{w0} \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ P_{w0} & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_w 为风电输出功率; P_{w0} 为额定输出功率; v_r 为额定风速; v_{co} 为切出风速; v_{ci} 为切入风速。

1.2 光伏的多状态机组模型

本文采用 Beta 分布对短期内的光照功率密度的概率分布进行描述^[11]。

$$f_b(E) = \frac{\Gamma(k+c)}{\Gamma(k)\Gamma(c)} \left(\frac{E}{E_{max}}\right)^{k-1} \left(1 - \frac{E}{E_{max}}\right)^{c-1} \quad (3)$$

式中: k 为光照功率密度的形状参数; c 为光照功率密度的尺度参数; Γ 为 Gamma 函数,通过 Gamma 表获取函数值; E_{max} 为该区域研究周期内最大光照功率密度。

光伏电池板的输出功率与光照功率密度、光伏阵列面积、光电转换效率以及逆变器效率有关,具体函数如式(4)所示。

$$P_{pv} = EA\eta\eta_{inv} \quad (4)$$

式中: P_{pv} 为光伏出力功率; E 为光照功率密度; η_{inv} 为逆变器效率; η 为光伏电池的光电转换效率; A 为光伏阵列面积。根据光伏电池的 E - η 特性^[12],只有在弱光照下, η 才出现明显的变化,但此时光伏发电量很少, η 的变化对系统而言可以忽略,为简化计算,本文把 η 作固定值。

2 基于等效电量函数法的随机生产模拟算法

2.1 等效电量函数的基本原理说明

等效电量函数法是一种考虑机组随机停运影响的生产模拟算法^[13]。以此为基础,引入由特定分布确定的新能源多状态机组模型,即把新能源看作具有多种随机停运状态的机组,实现在生产模拟中计及新能源随机出力的影响^[5-6]。

把研究周期内的原始时序负荷曲线转化为持续负荷曲线(如式(5)所示),则持续负荷的概率分布如式(6)。

$$t = F(x) \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{F(x)}{T} \quad (6)$$

式中: x 为负荷大小; t 表示负荷为 x 时所持续的时间; F 为对应函数关系; T 为研究周期; f 为负荷的

概率分布。

假设已知 $f^{(i-1)}(x)$ ，在安排第 i 台发电机组运行前，设其容量为 C_i ，强迫停运率为 q_i ，则 $f^{(i)}(x)$ 通过卷积运算表示为

$$f^{(i)}(x) = p_i f^{(i-1)}(x) + q_i f^{(i-1)}(x - C_i) \quad (7)$$

等效电量函数的定义如式(8)所示^[15]，则根据式(7)等效电量函数 $E^{(i)}(J)$ 表示为

$$E(J) = \int_x^{x+\Delta x} F(x) dx = T \int_x^{x+\Delta x} f(x) dx \quad (8)$$

$$E^{(i)}(J) = p_i E^{(i-1)}(J) + q_i E^{(i-1)}(J - K_i) \quad (9)$$

式中， $J = \lfloor x/\Delta x \rfloor + 1$ ， $K_i = C_i/\Delta x$ ， $\lfloor x/\Delta x \rfloor$ 表示取不大于 $x/\Delta x$ 的整数， Δx 根据所有发电机组容量的最大公因子选择。

在等效电量函数 $E^{(n)}(J)$ 的基础上，可以对系统的 *EENS*、*LOLP* 等可靠性指标进行计算，并引入电力不足期望值(Loss of Load Expectation, LOLE)，计算方法如式(10)一式(12)所示。

$$EENS = \sum_{J>J_n} E^{(n)}(J) \quad (10)$$

$$LOLP \cong \frac{E^{(n)}(J_n + 1)}{T\Delta x} \quad (11)$$

$$LOLE = LOLP \times T \quad (12)$$

式中： $E^{(n)}(J)$ 表示完成所有 n 台机组发电量的卷积运算后得到的等效电量函数； J_n 表示 n 台机组的总装机容量。

本文在应用等效电量函数法时，还涉及对多状态机组和分段机组的处理，但由于篇幅限制，不再赘述。

2.2 采用分段模拟的方法

基于等效电量函数法建立了随机生产模拟算法的基本框架后，本文采用分段模拟的方法对算法流程进行改进，目的是计及新能源出力的时序性特点。

根据前文所述，新能源的多状态机组模型反映其出力波动性与随机性的特点，但当前的许多研究表明新能源的出力并非是毫无规律性的，而与昼夜、季节等时间尺度存在一定的相关性。光伏发电的昼夜差异最为明显，依据早午晚三个典型时间段内的一般光照规律，光伏出力表现为“从低到高，再从高降为零”，在一年的不同季节中其出力也具有规律性；而在中国内陆，风电的出力则具有季节性和“昼低夜高”的规律^[14]。若新能源模型仅以一组反映全周期(年或日)风光分布特点的参数为基础进行构建，则必然不能体现新能源发电的上述规律，所以更合理的做法是把全周期进行分段，并在各分段内分别构建模型。另一方面，系统负荷的分布也与时

间存在相关性，本文把出力或负荷与时间的相关性称为时序特性。由于负荷与新能源机组时序特性的相互影响，系统可能仅会在某些时段内出现调峰容量不足的现象，为了研究和预防上述风险，随机生产模拟需要对调峰性能指标进行分时段计算。在各时段内，新能源仍是由特定分布所确定的多状态机组，但不同时段分布参数具有差异，这种差异则体现了新能源出力的时序特点。

因此，本文引入多组风速与光照的典型分布参数，构建不同时段内的新能源模型。具体方法是以等效电量函数的线性可加性为基础，把研究周期分为若干时段进行模拟，在每一分段内利用相应的分布参数建立模型。在算法的具体实施过程中，考虑到除新能源外，可调节出力机组(如水电机组)的可调容量会随时间变化而改变，即具有一定的时序特性，但时序性又弱于新能源，所以可以采用多分段的方法进行处理，按需求选择不同的分段尺度进行模拟。图1为分段模拟的流程，其中 S 、 D 、 N 代表3种分段尺度，在分段周期内，相应机组完成对等效电量函数的卷积运算并叠加结果，直至得到下一分段尺度的等效电量函数。

分段的最优尺度即机组出力特性变化的最小周

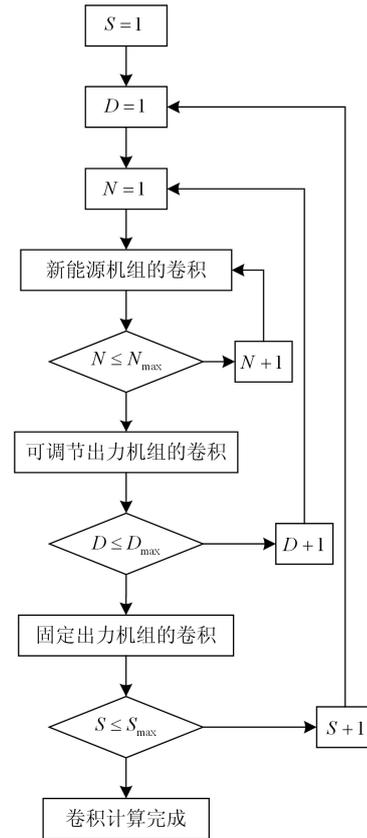


图1 分段模拟流程图

Fig. 1 Flow chart of segmented simulation

期,可根据算例样本提供的机组出力数据选取分段尺度。本文的算例系统未设置固定出力机组($S=1$),常规能源机组在典型日内保持出力特性不变,新能源机组以日内凌晨、上午、下午和夜晚的4个时段分别作为出力特性的变化周期。因此,本文所选择的分段尺度 D 、 N 分别为日和6h(即每日分为4个时段),该分段尺度已经能够反映新能源出力典型的昼夜变化特征。

2.3 引入调峰电源模型

专用调峰电源对于提高新能源的消纳量有至关重要的作用^[15-16],但传统的等效电量函数法缺少体现该类电源出力特性的模型,所以本文在算法中引入调峰电站的发电模型和抽水蓄能电站的抽水模型以模拟新能源接入的真实环境。

专用调峰电源的发电任务以“削峰填谷”为主要目标。燃气轮机、小型启停火电等调峰机组在系统负荷的高峰时段投入发电,其余时段则一般处于关机状态;抽水蓄能机组在系统负荷的低谷时段投入抽水,其余时段则处于关机或发电状态。与火电、水电等常规能源电站相比较,专用调峰电源运行具有明显的间歇性,确定发电量与发电位置必须基于负荷的时序信息,所以该类机组不能使用等效电量函数法进行卷积计算;另一方面,与风电、光伏等新能源相比,专用调峰电源的随机性和波动性较小,其发电量与发电时间有明显的规律性,可依据原始负荷曲线确定,所以该类机组也不适宜使用多状态机组模型进行模拟。由于专用调峰机组的单机容量小且停机时间长,所以本文所采用的模型忽略其强迫停运的影响。

建立调峰电站模型的方法^[17]如下。首先,搜索原始时序负荷曲线上负荷最高的若干个时间点,然后将相应的负荷减去调峰机组的额定出力。抽水蓄能电站的抽水模型与之类似,即搜索负荷最低点,并将相应负荷加上机组抽水容量。此外,上述两种模型还考虑了若干约束条件。

2.4 引入系统的调峰性能指标

等效电量函数法的 $LOLE$ 、 $LOLP$ 与 $EENS$ 等指标反映了系统运行的可靠程度,但在新能源接入后,上述指标不能反映新能源对系统调峰性能的影响,而系统调峰性能是决定新能源接入和消纳的关键因素^[18]。对此,本文引入 $LORCP$ 与 $ERENS$ 两项指标及其计算方法,以研究系统的调峰性能。

系统的调峰需求一般是根据日最大负荷与基荷之差定义的,因此从物理意义的角度, $LORCP$ 表示系统所有机组的强迫出力之和超过系统基荷的概

率, $ERENS$ 表示机组强迫出力中超过基荷部分的发电量。以系统基荷与机组的强迫出力为依据,本文提出一种基于等效电量函数法的调峰性能指标计算方法,步骤如下。

步骤1:调峰容量初步判断。如果系统内常规能源的强迫出力与新能源额定出力之和大于基荷,则系统可能会出现调峰容量不足的情况,转步骤2;否则,无需计算指标。

步骤2:形成常规能源强迫出力与新能源额定出力总和的持续出力曲线,计算相应的等效电量函数。

步骤3:取原始负荷中强迫出力所承担的部分,并形成持续负荷曲线,计算相应的等效电量函数。

步骤4:利用常规能源机组的强迫出力以及新能源机组的多状态模型,通过卷积运算修正步骤3的等效电量函数。

步骤5:将步骤2的等效电量函数与步骤4修正后的等效电量函数作差,结果设为 $E_L(J)$ 。

步骤6: $LORCP$ 与 $ERENS$ 的计算如式(13)、式(14)所示。

$$LORCP = \frac{E_L(J_f)}{T} \quad (13)$$

$$ERENS = \sum_{J_{\min} < J \leq J_f} E_L(J) \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} J_f = \langle P_f / \Delta x \rangle \\ J_{\min} = \langle P_{\min} / \Delta x \rangle \end{cases}$$

式中: J_{\min} 和 J_f 分别表示系统基荷和机组强迫出力所对应的离散变量; P_{\min} 为系统基荷; P_f 为机组强迫出力之和; T 为研究周期。

$LORCP$ 与 $ERENS$ 计算方法的核心思想是把原本发电机组可变强迫出力是否超过系统固定基荷的问题,转化为系统可变基荷能否满足发电机组固定强迫出力要求的问题。一方面,把新能源视为定出力机组,结合常规能源机组的强制出力得到系统内所有机组的强迫出力之和;另一方面,机组随机出力和强迫停运的影响通过修正系统基荷的等效电量函数来反映。参考式(12)引入调峰容量不足期望值指标($LORCE$)。

$$LORCE = LORCP \times T \quad (15)$$

2.5 随机生产模拟算法的整体流程

前文已对随机生产算法的基本原理及改进内容进行了必要的说明,下面给出算法在单个周期内的整体流程图,如图2所示。

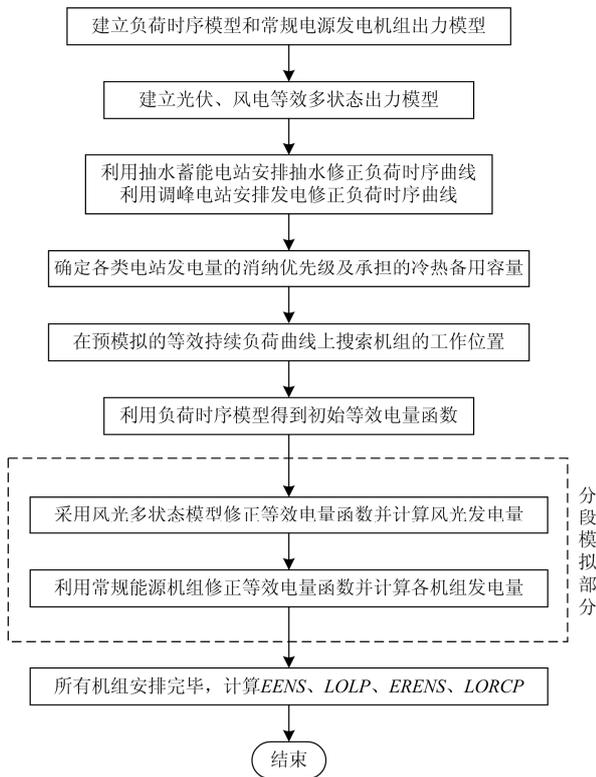


图 2 随机生产模拟算法的整体流程图

Fig. 2 Overall flow chart of probabilistic production simulation algorithm

3 算法验证与算例分析

3.1 核心算法验证

本文利用 IEEE 的 RTS-86 测试系统与其所提供的参考数据^[19], 对本文随机生产模拟算法的核心部分进行校验, 主要包含分段机组模型、多状态机组模型以及可靠性指标等几个主要内容。测试系统相关指标的参考数值及本文所提出算法的计算结果分别如表 1、表 2 所示。

表 1 RTS-86 提供的参考数据

Table 1 Reference data provided by RTS-86

系统类型	LOLE	EENS
原始发电机系统	9.394 18 h/a	1.176 GWh
含多状态机组系统	0.882 58 d/a	—

表 2 随机生产模拟的结果

Table 2 Results of probabilistic production simulation

测试系统	LOLE/ year	偏差/ %	EENS/ GWh	偏差/ %
原始发电机系统	9.394 18 h	0	1.180	0.34
含多状态机组	0.882 6 d	0.002 6	0.653	—
含分段机组	9.394 18 h	—	1.180	—
含分段多状态机组	5.665 94 h	—	0.653	—

从随机生产模拟算法运行的结果分析可见: 对原始发电系统的模拟结果与参考数值吻合度非常高、偏差较小; 加入多状态机组模型后, 为满足参考数据的要求, 改为采用日负荷峰值作为负荷数据进行模拟, 得到的 LOLE 吻合度同样很高。此外, 由于等效电量函数法具有“机组卷积顺序不影响卷积运算的最终结果”这一重要性质, 所以设置分段机组对 LOLE 和 EENS 的计算结果没有影响, 与模拟结果一致。

3.2 设置调峰机组对系统调峰性能的影响

由于测试系统并未指定专用的调峰机组, 所以本文对测试系统进行了改进, 限定了某些机组的功能, 即增加燃气机组和抽水蓄能机组。对改进后的测试系统进行模拟, 结果如表 3 所示。原系统以调峰性能较差的火电机组为主, 设置调峰机组的预期效果使系统调峰性能得到改善, 而可靠性基本不变。分析表 3 可知, 原系统的 LORCE 约为 1 170 h, 设置调峰机组后, 减小为约 26 h, 而 LOLE 变化较小, 结果符合预期, 说明本文所提的调峰性能指标能够反映系统调峰资源的充裕程度。

表 3 RTS-86 改进后的模拟结果

Table 3 Results of improved RTS-86

测试系统	LORCE/ (h/a)	ERENS/ GWh	LOLE/ (h/a)	EENS/ GWh
原始发电 机系统	1 170.36	70.23	5.665 9	0.653
含调峰机 组的系统	26.46	1.20	5.226 4	0.599

3.3 新能源接入量对系统的影响

本节分析不同新能源接入量对测试系统可靠性和调峰性能的影响。在改进的测试系统中, 所接入风电机组的基本参数如下: 单机容量为 4 MW, 切入、切出和额定风速为 3 m/s、25 m/s、14 m/s, 强迫停运率为 5%。光伏机组的基本参数如下: 峰值功率为 20 MW, 光伏阵列面积为 200 000 m², 逆变器效率为 95%, 最大光电转换效率为 12%, 光照功率密度的最大值为 1 kW/m², 强迫停运率为 5%。Weibull 分布和 Beta 分布的参数如表 4 所示^[11,20]。同时, 本文还设置了新能源接入的若干情景。

对接入新能源的测试系统进行模拟, 模拟结果如表 5 所示。对比并分析表 3 与表 5 可知, 在接入新能源后, 系统的可靠性有所改善(LOLE 和 EENS 下降), 而调峰性能恶化(LORCE 和 ERENS 上升); 在仅接入一类新能源时, 光伏对可靠性的改善作用更大, 同时对调峰性能的影响也最明显, 当其装机容量为 40 MW 时, LOLE 降低了约 10%, 而 LORCE

上升了约 91%; 在接入装机总容量为 100 MW 的风光能源时, 系统的可靠性优于接入相同容量风电的情景, 调峰性能优于接入相同容量光伏的情景。

表 4 风速与光照强度的分布参数

Table 4 Distribution parameters of wind speed and light intensity

季节	夏				冬				春、秋				
	1—6	7—12	13—18	19—24	1—6	7—12	13—18	19—24	1—6	7—12	13—18	19—24	
风速	α	6	5	5	6	9	5	6	8	9	5	9	8
	β	7	4	3	6	8	4	6	8	8	4	7	7
光照	k	—	2.57	2.57	—	—	1.27	1.27	—	—	0.9	0.95	—
	c	—	2.00	1.60	—	—	1.40	1.40	—	—	0.8	0.95	—

表 5 含新能源的系统的模拟结果

Table 5 Test results of the systems with new energy

新能源引入量	LORCE/(h/a)	ERENS/GWh	LOLE/(h/a)	EENS/GWh
40 MW 风电	33.83	1.32	5.080 0	0.579
40 MW 光伏	50.63	1.77	4.731 4	0.536
100 MW 风电	51.72	1.63	4.877 6	0.550
100 MW 光伏	116.28	3.91	4.056 0	0.455
40 MW 风电+60 MW 光伏	78.67	2.47	4.351 5	0.488
100 MW 风电+100 MW 光伏	163.46	4.98	3.714 6	0.412

由表 5 可知, 该系统在接入光伏时对于调峰资源的需求更大, 以接入 100 MW 的新能源为例, 光伏导致 LORCE 和 ERENS 上升至约 116 h 和 3.91 GWh, 而风电接入时两项指标约为 52 h 和 1.63 GWh。但本文借助分段模拟的方法, 在对系统典型日内各时段的调峰性能进行研究后发现, 上述结论是片面的。以调峰问题突出的第 189 个典型日为例, 对 3 种情景下的系统进行模拟, 其结果如图 3 所示, 分析可得以下结论。

在 2、3 时段内(上午与下午)的 LORCP 和 ERENS 较高, 同样符合光伏的出力特点。

(2) 在系统中同时接入装机容量均为 100 MW 的风光机组时, 各时段的 LORCP 和 ERENS 为其余两种接入情景的最大值, 即该情景下系统的调峰性能最差, 但各时段的调峰需求差异较小。

综上所述: 风电在晚上与凌晨时段对系统的调峰性能影响更大; 而光伏则主要影响系统在上午与下午时段的调峰性能。因此, 单独依据一类新能源的调峰需求进行电源规划可能会导致调峰资源冗余, 此外, 由于光伏的调峰需求期是系统峰荷时期, 而风电的调峰需求期则处于谷荷时期, 所以风电导致的调峰问题往往比光伏更值得关注。合理的调峰资源配置方案应综合考虑风光在不同时期的调峰需求, 另一方面, 风光的联合接入则可以提高调峰资源的利用率, 避免其在某时段的闲置。

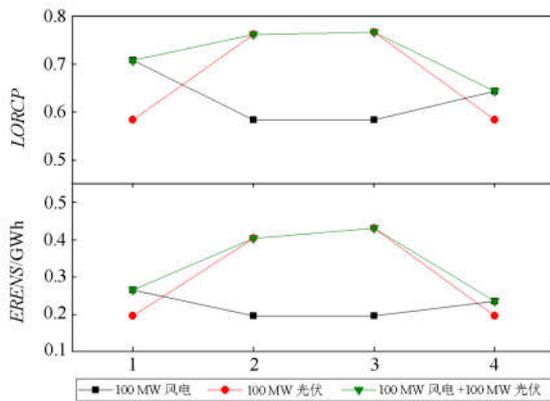


图 3 第 189 个典型日的模拟结果

Fig. 3 Simulation results of 189th typical day

(1) 在系统中分别先后接入装机容量为 100 MW 的风电与光伏机组, 前者使系统在 1、4 时段内(晚上与凌晨)的 LORCP 和 ERENS 高于其余时段, 符合风电机组出力的“昼低夜高”特性; 后者导致系统

4 结论

本文基于等效电量函数法, 综合考虑各类常规能源机组与新能源机组的出力特点, 并引入分段模拟方法以及两个评估系统调峰性能的指标 LORCP 和 ERENS, 设计了随机生产模拟算法。该算法可实现对含常规能源和新能源的完整发电系统进行电力电量平衡的模拟分析, 并准确计算各项指标。最后, 以 RTS-86 为基础, 本文对该系统在接入不同类型和不同容量新能源后的可靠性和调峰性能变化情况进行了研究, 得到如下结论。

(1) 本文所提的调峰性能指标 *LORCE* 与 *ERENS* 可以反映系统调峰性能的优劣。

(2) 风电与光伏两类新能源都能改善系统的供电可靠性, 但同时也会恶化系统的调峰性能。

(3) 不同类型和不同接入容量的新能源对系统可靠性和调峰性能的影响都具有差异, 而分段模拟的结果可直观地反映不同类型新能源对于调峰资源在各时段的需求差异。

(4) 通过研究模拟结果中 *LOLP*(或 *LOLE*)、*EENS*、*LORCP* 和 *ERENS* 的变化情况, 可以为电源规划中新能源与常规能源的协调, 以及调峰容量的配置提供参考, 并且可以利用上述的指标初步评估系统对新能源的消纳能力。

参考文献

- [1] 电力发展“十三五”规划(2016—2020年)[Z]. 2016-11-07. The electric power development planning "in 13th five-year" (2016-2020)[Z]. 2016-11-07.
- [2] 王彩霞, 李琼慧, 谢国辉. 风电供热提高低谷风电消纳能力评估[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 100-106. WANG Caixia, LI Qionghui, XIE Guohui. Evaluation of wind power heating in facilitating wind power integration capability during valley load period[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 100-106.
- [3] 王耀华, 栗楠, 元博, 等. 含大比例新能源的电力系统规划中“合理弃能”问题探讨[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 8-14. WANG Yaohua, LI Nan, YUAN Bo, et al. Discussion on the reasonable curtailment problems in highly renewable power system planning[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 8-14.
- [4] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 146-154. ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 146-154.
- [5] 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.
- [6] 陈亚博, 盛戈皞, 黎建, 等. 含光伏和风电的电力系统随机生产模拟[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(5): 1-6. CHEN Yabo, SHENG Gehao, LI Jian, et al. Probabilistic production simulation of power system with photovoltaic power and wind power[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(5): 1-6.
- [7] 张宏宇, 方鑫, 李碧辉, 等. 含大规模风光电源电力系统随机生产模拟[J]. 中国电力, 2012, 45(6): 78-81. ZHANG Hongyu, FANG Xin, LI Bihui, et al. Probabilistic production simulation of power systems with large-scale wind and photovoltaic generation[J]. Electric Power, 2012, 45(6): 78-81.
- [8] 陈树勇, 戴慧珠. 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. Power system probabilistic production simulation including wind power plants[J]. Electric Power, 2000, 33(3): 30-31.
- [9] 张宁, 康重庆, 陈治坪, 等. 基于序列运算的风电可信容量计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 1-9. ZHANG Ning, KANG Chongqing, CHEN Zhiping, et al. Wind power credible capacity evaluation model based on sequence operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 1-9.
- [10] 张宏宇. 考虑调峰因素的风电规划研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2013. ZHANG Hongyu. Research on wind power integration planning considering peak-shaving factors[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2013.
- [11] KARAKI S H, CHEDID R B, RAMADAN R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 766-772.
- [12] TOPI M, BRECL K, SITES J. Effective efficiency of PV modules under field conditions[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 2007, 15(1): 19-26.
- [13] 王锡凡. 电力系统优化规划[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [14] 于大洋, 韩学山, 梁军, 等. 基于NASA地球观测数据库的区域风电功率波动特性分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 77-81. YU Dayang, HAN Xueshan, LIANG Jun, et al. Study on the profiling of China's regional wind power fluctuation using GEOS-5 data assimilation system of National Aeronautics and Space Administration of America[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 77-81.
- [15] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调

- 峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.
- ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [16] 胡殿刚, 潘正婕, 徐昊亮, 等. 大规模可再生能源并网条件下天然气机组调峰空间估算[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 87-93.
- HU Diangang, PAN Zhengjie, XU Haoliang, et al. Peaking capacity estimation of natural gas unit under the condition of large-scale renewable energy connecting with power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 87-93.
- [17] 唐权. 电力系统电源规划模型及算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- TANG Quan. Research on models and algorithms of power system generation expansion planning[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [18] 吴冠男, 张明理, 徐建源, 等. 适用于评估风电接纳能力的时序生产模拟算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 151-157.
- WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Time series production algorithm for evaluating wind power accommodation capacity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 151-157.
- [19] ALLAN R N, BILLINTON R, ABDEL-GAWAD N M K. The IEEE reliability test system-extensions to and evaluation of the generating system[J]. IEEE Power Engineering Review, 1986, PER-6(11): 24-34.
- [20] 陈旭, 杨雨瑶, 张勇军, 等. 光伏光照概率性对配电网电压的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 112-118.
- CHEN Xu, YANG Yuyao, ZHANG Yongjun, et al. Influence of illumination probability of photovoltaic system on voltage of power distribution networks[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(4): 112-118.

收稿日期: 2018-04-26; 修回日期: 2018-07-25

作者简介:

罗捷(1970—), 女, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划设计。E-mail: zqluojie@126.com

(编辑 许威)