

基于随机生产模拟的火电机组深度调峰提升 新能源消纳能力评估方法

马彦宏¹, 姜继恒², 鲁宗相², 乔颖², 叶一达²

(1. 国网甘肃省电力公司, 甘肃省 兰州市 730030;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Assessment Method of Conventional Units With Deep Peak-shaving for Renewable Energy Accommodation Based on Probabilistic Production Simulation

MA Yanhong¹, JIANG Jiheng², LU Zongxiang², QIAO Ying², YE Yida²

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, Gansu province, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Dept. of Electrical Engineering,
Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: The trial of thermal units with regulation capacity developed has been carried out in many regions. Most of the existing sequential production simulation methods are difficult to effectively deal with various uncertainties, which are not applicable to the effect evaluation, especially the power capacity planning without detailed data. Based on the probabilistic production simulation, this paper proposes an assessment method for renewable energy accommodation, which considers participation of conventional units with deep peak shaving. The method establishes a probabilistic model of supply side, including non-heating thermal power units, CHP generator units, and wind power. This paper analyzes the variation of probability characteristics of system load and renewable power source under different thermal power peak-shaping modes. The calculation method of the curtailment indicators is given. The data experiment has been carried out with the data of a provincial power grid in northern China. The variation of the curtailment rate under different deep peak-shaving configuration schemes has been studied, and this method proves to be effective.

Keywords: probabilistic production simulation; probabilistic model; multidimensional joint probability distribution

摘要: 中国许多地区已经开展火电机组深度调峰辅助可再生能源消纳的试点工作, 但基于场景的时序模拟方法在分析

其调峰效果时受到各类不确定因素影响, 难以覆盖所有的运行场景, 导致中长期评估结果准确性不高。因此, 时序方法不适用于缺少详细时序数据的电源容量规划。为此基于随机生产模拟方法, 面向规划应用提出了一种火电深度调峰提升系统可再生能源消纳效果的评估方法。该方法建立了包括非供热火电机组、热电联产机组和风电等电源在内的供给侧概率模型, 分析了在不同火电深度调峰方式下, 系统负荷、可再生能源发电的概率特性变化, 给出了弃风率等指标的计算方法。以北方某省级电网为仿真系统进行数据实验, 研究了不同深度调峰配置方案下的弃风率变化情况, 证明了该方法的有效性。

关键词: 随机生产模拟; 概率模型; 多维联合随机变量

0 引言

近年来, 中国可再生能源发电规模持续扩大, 2017年, 中国并网风电、光伏累计并网装机容量达到1.64亿 kW和1.3亿 kW, 为未来电力系统清洁化转型提供了原动力。但是, 由于源网建设不协调等原因, 以“三北”地区为代表的大型可再生能源基地区域出现了严重的弃能限电, 甘肃、新疆、内蒙古、东北等地的弃风率常年维持在10%以上, 新能源消纳窘境亟待破解。现阶段弃能问题的成因构成复杂^[1], 原因之一是电网调峰能力不足^[2], 系统内常规火电机组调节容量比例过低, 可再生能源电源消纳空间严重不足, 日内低负荷且风、光资源丰富时段易出现弃风、弃光现象。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902200); 国网甘肃省电力公司科技项目(SGGSKY00FJJS1700007)。

National Key Research and Development Program of China (2017YFB0902200); Science and Technology Project of Gansu Power Company (SGGSKY00FJJS1700007).

为了应对这一难题,国家发改委、能源局出台一系列辅助服务政策,部分省市也积极开展了火电参与深度调峰试点工作,加快火电机组灵活性改造。从本质上看,火电主要通过降低最小稳定功率和允许频繁启停或调停备用来实现负荷低谷期的发电空间让渡,以此辅助新能源消纳。在此背景下,量化评价常规火电机组调峰能力对可再生能源消纳贡献,可为电网现状评价和未来系统规划提供关键信息,也可为政策制定提供量化基准。该评估方法已成为解决弃能问题的研究热点。传统的规划方法通常以某些场景集合下的时序计算作为初始结果,通过外推获得可再生能源上网电量等信息,这种场景依赖的模拟方法难以克服可再生能源波动性带来的场景爆炸问题。另一方面,不同的调峰辅助消纳措施在同一模型内实现对标评价时,需要在以机组组合为代表的时序方法中分别建模,实现难度较大。综上所述,该问题有2个难点:一是如何避免典型日或典型场景带来的偶然误差,全面分析可再生能源不确定性的影响;二是如何量化系统调峰能力与可再生能源消纳间的耦合关系,实现同一框架下几类调峰改进措施的对标评价。

已有关于电网调峰能力评价的研究大多聚焦整体效果指标,文献[3]基于“调峰特性评价”,分析调峰容量变化特点,利用蒙特卡洛随机抽样方法求解调峰不足概率和期望值,以此评估不同时间尺度下的调峰充裕性。一些研究基于典型场景、典型出力/负荷曲线开展研究,文献[4]在典型运行场景下采用容量评估方法对省级电网内常规水电、火电开机方式与系统调峰能力和新能源消纳能力进行了初步评价,文献[5]利用典型日负荷曲线和常规电源调峰能力估算风电消纳空间,结合典型风电功率曲线获得弃风情况。其他大部分研究成果多以机组组合模型为基础进行,文献[6]利用时序方法面向负荷低谷时期建立了调峰能力评价和机组运行优化一体化的计算方法。部分研究针对区域外送通道建立了考虑调峰约束与网架容量约束的弃风电量评价模型^[7-8],同时较粗略地给出了电源侧的开机方式优化模型。除此之外,还有研究从单一环节入手,分别对风电^[9]、储能的调峰特性及其对新能源消纳的影响展开分析。综上所述,各类研究在研究思路和方法上高度趋同,典型场景、时序模拟、机组组合方法构成了基本的技术体系。

以上研究对数据要求极高,整个模型需要详细时序数据,在面向未来电网进行消纳电量评估时,周、月以上时间尺度的风光等波动性电源的时序数据很难

获得,极大限制了以上方法的使用。另外,机组组合方法一般以15min或1h为计算周期进行仿真,所得结果有效刻画了短期内的系统生产情况,但很难展示中长期时间尺度下系统各方的生产关系。第三方面,后期参数优化难度较高。现有的评估方法通过优化模型,直接解得新能源电源的并网发电情况,中间过程不能人工干预。但是在实际研究中,系统内某些参数与风电消纳量之间有着十分复杂的隐式耦合关系,必须进行人工干预和优化调整。

本文从中长期视角,以概率化系统物理变量替代典型时序曲线,在月度时间范围内进行新能源消纳量评估。借鉴文献[10]的方法,本文以随机生产模拟理论作为方法基础,对火电、风电多类型电源建立概率模型,通过改进生产安排方法,而后针对2种火电参与深度调峰的典型模式——降低最小稳定功率和允许频繁启停进行机理分析,在概率意义体系下量化不同深度调峰方式对可再生能源消纳量的影响。

1 多环节概率模型

利用随机生产模拟方法进行消纳电量评估,其基础是建立供需双侧的概率模型。本章将对需求侧(负荷)、供给侧(风电和常规火电)进行分析。

1.1 需求侧概率模型

本文利用持续负荷曲线对负荷概率特性进行描述。电力负荷的累计概率曲线即持续负荷曲线,如下式所示:

$$F_L(x) = \int_x^{P_{Lmax}} f_L(x) dx \quad (1)$$

式中: x 为负荷值; P_{Lmax} 为电力负荷最大值, MW; $f_L(x)$ 为负荷的概率密度函数。因此,持续负荷曲线上任意一点表示在一个时间周期 T 内,负荷大于 x 的持续时间 t 。由图1可知,一段时间内的总需求电量 E_T 为

$$E_T = T \cdot \int_0^{P_{Lmax}} f(x) dx \quad (2)$$

在随机生产模拟中,为了考虑机组非额定出力工况的运行特点,可采用等效持续负荷曲线(equivalent load duration curve, ELDC)进行描述。假设A机组最大容量为 C_A (MW)。机组A参与生产后,需要对持续负荷曲线进行修正,如图1所示,修正过程为负荷概率曲线与机组概率进行卷积运算,如下式:

$$f^{(i)}(x) = (1 - q_i) f^{(i-1)}(x) + q_i f^{(i-1)}(x - C_i), (i = 1, 2, 3, 4 \dots) \quad (3)$$

式中： $f^{(i)}(x)$ 为第*i*台机组参与生产修正后的等效持续负荷曲线， $f^{(i-1)}(x)$ 为修正前的持续负荷曲线， C_i 为第*i*台机组的容量， q_i 为第*i*台机组的强迫停运率（forced outage rate, FOR）^[11]。

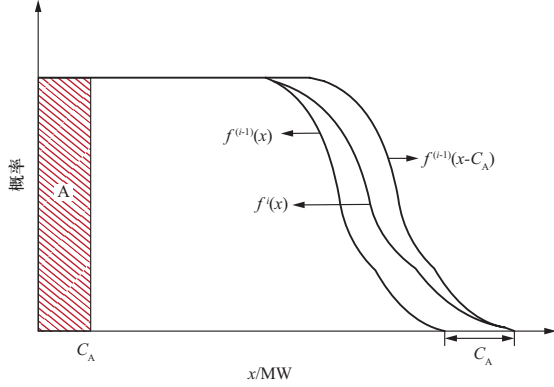


图1 等效持续负荷曲线

Fig. 1 Equivalent load duration curve

1.2 风电场功率概率分布模型

考虑到原始风电功率数据可能是弃风限电后的统计值，无法反映风电真实的最大发电能力，本文使用原始风速概率分布及风机特性生成风电功率概率曲线。

假设模拟周期内的风速概率密度分布满足Weibull分布^[12]。该概率密度函数由2个参数确定，其表达式为

$$f_w(s_w) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{s_w}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{s_w}{c}\right)^k\right] \quad (4)$$

式中： s_w 为风速值，m/s； k 为形状参数； c 为尺度参数，反映统计周内的平均风速值。利用历史数据按照文献[13]所提方法可以获得以上参数。

风电机组的功率与风速之间呈非线性关系，如图2所示，一般可简化为下述分段函数关系：

$$P_w(s_w) = \begin{cases} 0, & 0 \leq s_w \leq v_{ci} \\ \eta(s_w), & v_{ci} \leq s_w \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq s_w \leq v_{co} \\ 0, & s_w \geq v_{co} \end{cases} \quad (5)$$

式中： v_{ci} 为切入风速， v_r 为额定风速， v_{co} 为切出风速，m/s； P_r 为风机的额定功率，MW。对于切入风速到额定风速段，风电的功率曲线可以进行线性化处理，得到式(6)。

$$\eta(s_w) = P_r \frac{(s_w - v_{ci})}{(v_r - v_{ci})} \quad (6)$$

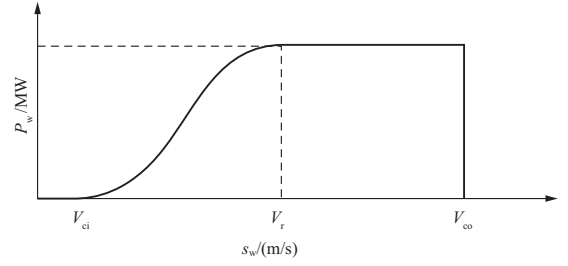


图2 风机功率—风速关系

Fig. 2 Curve of wind turbine power - wind speed

通过公式(4)和(5)联立，可以解得区域内某一时间周期的风电总功率概率密度函数，记为 $f_w(P)$ 。将以上概率分布曲线离散化，建立多状态模型，其原理如图3所示。

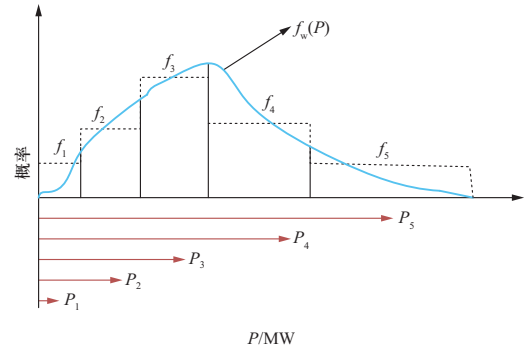


图3 风电多状态功率模型

Fig. 3 Multi-state model of wind power

1.3 常规火电机组模型

本文所述的常规火电机组包括非供热火电机组和热电联产机组（combined heat and power, CHP）。对非供热火电机组，其发电能力仅受容量约束，模型相对简单。在中国北方冬季，部分火电机组处于热电联产状态，“以热定电”导致了这类机组的最小功率骤升。因此，从数学上看，该类机组呈现电热耦合的特征，本文借鉴文献[14]所提方法进行研究。

假设第*i*台热电联产机组具有供热功率 H_i 和发电功率 x_i ，由以上分析可知该机组有

$$\begin{cases} G_i(H_i) = P_{rg}, & g_i(H_i) = p_{rg} \\ F_i(x_i) = P_{rp}, & f_i(x_i) = p_{rp} \end{cases} \quad (7)$$

式中： P_{rg} 、 p_{rg} 分别为热电机组热功率的累积概率函数和概率密度函数， P_{rp} 、 p_{rp} 分别为热电机组电功率的累积概率函数和概率密度函数。

以背压式机组为例，其电热功率曲线表达式为

$$\begin{cases} P_i = a_i H_i + b_i \\ H_{i \min} \leq H_i \leq H_{i \max} \end{cases} \quad (8)$$

式中： a_i 、 b_i 分别为电热关系的线性系数； $H_{i\min}$ 、 $H_{i\max}$ 分别为机组 i 的供热功率最小值和最大值，MW。

进一步可得机组的电功率概率密度函数：

$$f_i(x_i) = \frac{1}{a_i} g_i\left(\frac{P_i - b_i}{a_i}\right) \quad (9)$$

热发电机组参与生产安排的排序按照“煤耗—电热比”因子降序进行，该指标反映了机组的煤耗特性和单位发电功率所对应的供热能力，定义如下：

$$\gamma_{ix} = \alpha \cdot y_x + \frac{\beta}{f_{cc}(x)} \quad (10)$$

式中： α 、 β 为权重系数； $f_{cc}(x)$ 为机组发电功率为 x 时的单位时间煤耗量，g/kWh； y_x 为机组的电热比，表征机组在某一功率 $P_i = x$ 处，每多发单位功率热量对应的电功率增长值。

$$y_x = \left. \frac{dP_i}{dH_i} \right|_{P_i = x} \quad (11)$$

2 基于随机生产模拟的弃风电量评估模型

2.1 随机生产模拟原理

作为调峰措施效果评估模型的理论基础，随机生产模拟方法的本质是利用负荷、机组的概率性描述进行中长期生产计算。由于风电这类波动电源在长时间尺度下功率概率分布具有一定规律性但无法求解具体时序信息，因此，随机生产模拟方法在进行可再生能源电量评估时具有原理优势。

本文所述的随机生产模拟利用等效电量函数法进行求解，文献[15]对该方法进行了详细说明。该方法的本质是将所有物理量的连续概率分布函数曲线离散化处理，如ELDC等，得到具有电能量纲的序列。

2.2 电量评估计算

随机生产模拟的主要步骤如下：

1) 根据历史数据生成研究周期区域内所有电力负荷的ELDC以及热力负荷持续曲线（heat load duration curve, HLDC），类似于ELDC，HLDC用于表征系统热需求特征，包括自备电厂供热机组的供热负荷。对以上2个等效持续曲线进行离散化，生成电力负荷序列和热力负荷序列。

2) 确定模拟月内火电机组的开机台数，形成在线机组集合。

3) 对所有非供热火电机组进行基荷、峰荷分段，按照煤耗率升序进行排列，检查排列顺序是否合理。

4) 安排非供热火电机组的基荷部分参与生产，

如图4所示，假设有 N 台火电机组，则火电机组的功率累积概率曲线 $F_{cn}(x)$ 与ELDC有下列关系：

$$F_{cn}(x) = f(x), 0 \leq x \leq \sum_{i=1}^N C_{i\min} \quad (12)$$

式中 $C_{i\min}$ 为第 i 台火电机组的最小发电功率，MW。

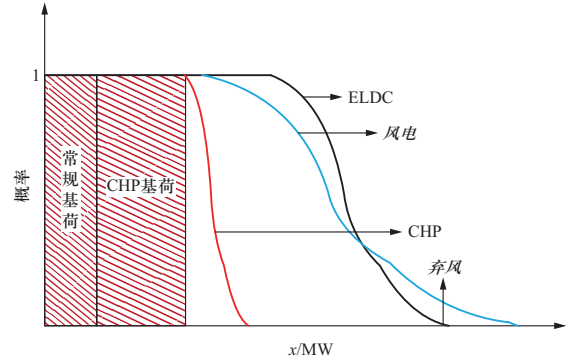


图4 随机生产模拟方法示意图

Fig. 4 Diagram of probabilistic production simulation

5) 安排热电联产机组参与生产，对于 M 台CHP机组，在ELDC和HLDC上安排各机组的最小电、热功率，该部分容量不可调节，承担系统基荷。

$$\begin{cases} G_M(H) = G_L(H), 0 \leq H \leq \sum_{i=1}^M H_{i\min} \\ F_t(x) = f(x), \sum_{i=1}^N C_{i\min} \leq x \leq \sum_{i=1}^{M+N} C_{i\min} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $G_L(H)$ 为系统热力负荷持续曲线， $G_M(H)$ 为 M 台机组的持续热功率曲线，且有

$$G_M(H) = G_1(H) \oplus G_2(H) \cdots G_m(H) \quad (14)$$

式中 $F_t(x)$ 为 M 台机组的持续电功率曲线，计算方式同式(14)。

6) 安排热电联产机组的可调节功率部分参与生产，应优先安排其供应系统的热力负荷，优先填满热负荷曲线，对每一台机组，按照电热功率关系曲线，将各台机组在热负荷曲线上的概率值映射到电负荷曲线上，如图5所示。安排次序通过“煤耗—电热比”排序原则确定。

对第 i 台机组，功率区间 j 段内热功率、电功率区间值分别为 ΔH 、 Δx ，可调节部分参与生产时，有下列关系：

$$\begin{cases} G_i(H_{i\min} + j\Delta H) = G_L(H_{\text{pos}} + j\Delta H), \frac{H_{i\min}}{\Delta H} \leq j \leq \frac{H_{i\max}}{\Delta H} \\ F_i(C_{i\min} + j\Delta x) = f(x_{\text{pos}} + j\Delta x), \frac{C_{i\min}}{\Delta x} \leq j \leq \frac{C_{i\max}}{\Delta x} \end{cases} \quad (15)$$

式中： G_i 为第 i 台机组的持续热功率曲线， H_{pos} 与 x_{pos} 分别是当前功率区间在HLDC和ELDC上的安排起点。

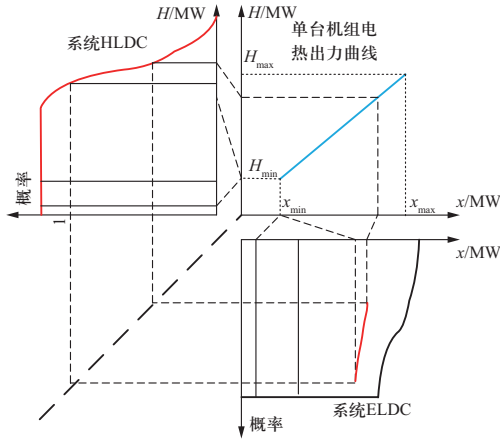


图5 热电联产机组生产安排

Fig. 5 Arrangement of CHP

7) 安排风电参与生产, 热电联产机组的电功率累积概率分布曲线与非供热火电机组的基荷功率曲线不同, 曲线形状不为矩形或者曲边梯形, 它们的下降边沿呈现缓降趋势。因此风电的功率曲线只能在火电机组、热电联产机组的总电功率曲线与ELDC之间进行安排。利用反函数的概念表示风电安排过程, 假设风电安排完的各电源功率累积概率函数用 $p_{ww} = F_{ww}(x)$ 表示, 那么有反函数 $x = F_{ww}^{-1}(p_{ww})$, 则

$$F_{ww}^{-1}(p_{ww}) = \sum_{i=1}^{M+N} C_{i\min} + F_i^{-1}(p) \quad (16)$$

8) 计算弃风电量, 计算图4中所示的弃风面积电量。

9) 安排剩余的非供暖火电机组参与生产, 填补未满足电量。安排方式同上。

3 基于随机生产模拟的深度调峰效果评估

本节将针对降低最小稳定功率和允许频繁启停2种火电深度调峰措施, 在不考虑调峰带来的成本变化基础上, 从技术层面研究系统对调峰机制的响应程度。

3.1 火电机组参与深度调峰的潜力分析

在供暖期内, 部分火电机组转变为热电联产模式, 机组的电功率主要由热功率决定。因此, 受供热负荷影响, 其实际最低发电功率将远超非供热状态下的最小功率, 即使通过技术改造也很难以理论最低功率运行。因此, 在中国大部分区域电网还没有实现供暖季内大规模“热电解耦”的背景下, 本节主要讨论非供热火电机组实现深度调峰后对新能源消纳量的影响。

相关研究指出^[16], 较先进的硬煤发电机组最小稳定功率可以达到额定容量的25%~40%, 先进的褐煤发电机组最小稳定功率可以实现额定容量的35%~50%。在配合进行灵活改造后, 已有煤电机组(德国的贝克斯巴赫和海尔布隆电厂)将最小稳定功率压低至12%的额定容量。现阶段中国火电机组在非供暖状态下的最低稳定功率为40%~60%的额定容量^[17], 远高于理论最小值, 灵活性改造空间很大。从效果上看, 降低机组最小稳定功率能够增加可调容量, 是改善系统调峰能力的重要措施之一。另一方面, 增加系统调峰能力也可通过设置启停调峰机组实现。该方式能够放宽机组最小启停时间约束和启停次数约束, 以允许机组更加频繁地启停, 或者通过热备用的形式为系统提供备用容量。

3.2 典型火电深度调峰措施效果评估模型

3.2.1 增加可调容量

对于下调最小功率的机组, 在随机生产模拟中安排生产时, 会减小第一段机组功率概率分布曲线的宽度, 减小非供热火电机组的基荷段电量面积, 使风电的发电功率曲线前移。

假设第*i*台机组减小的最小功率为 $\Delta C_{i\min}$, 共有*n*台机组参与了灵活性改造, 那么风电的带负荷位置将向前移动 $\sum_{i=1}^n \Delta C_{i\min}$ 容量, 这样必然会增加新能源消纳量, 但是具体消纳量与2条曲线的走向有密切关系, 只能通过计算机求解, 在此不给出具体公式。非供热火电机组的剩余容量安排在风电之后参与生产, 用于填满ELDC与风电功率曲线之间的不规则形状区域, 显然, 火电的总发电量有所减少。

3.2.2 设置启停机组

在装机严重过剩的区域中, 另外增加调峰机组对减少弃能限电几乎是毫无作用的, 因为系统此时所需的下调容量空间大大超过系统火电机组的最小稳定功率。因此, 在此讨论的增加启停调峰机组主要是将原有的非供热火电机组通过技术改造或者政策激励变为启停调峰机组, 或者可以长时间作为系统热备用的机组。

由于随机生产模拟忽略了大量时序信息, 因此无法借鉴传统机组组合方法, 对每一时刻的负荷与电源情况进行精确分析。在常规卷积法中, 机组停运率对ELDC的影响启示启停机组也可以通过这种方式进行分析。从实施效果看, 设置启停调峰机组一方面会改

变非供热火发电机组的功率曲线，同时也会对持续负荷产生影响。

假设某一机组从原有的正常机组改造为启停调峰机组，其总容量为 C_{qmax} ，最小技术功率为 C_{qmin} ，如图6所示的C部分。设置为启停机组后，它将更多地承担对风电功率的平滑作用，因此图中C部分不承担基荷部分。风电的带负荷位置向前移动 C_{qmin} 容量，其发电累积概率曲线由图中“风电1”变为“风电2”。

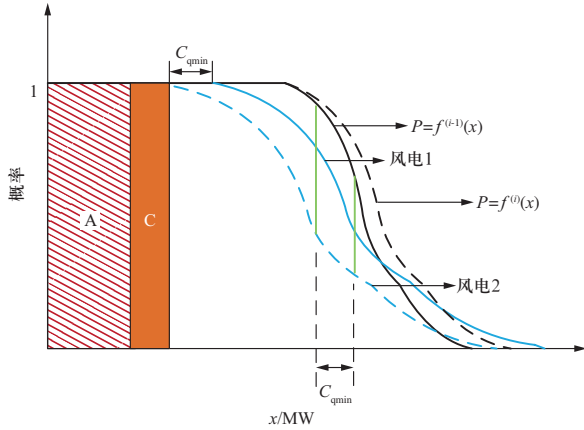


图6 启停调峰机组效果分析图

Fig. 6 Diagram of on-off units effect evaluation

假设该机组有技术停运率 q_q ，其定义为

$$q_q = \frac{T_{op} - t_{op}}{T_{op}} \quad (17)$$

式中： T_{op} 为启停机组发挥作用的总时间，其小于研究周期时间； t_{op} 为开机运行时间，或作热备用机组时的有功输出时间，h。

基于以上分析，机组减少的基荷段容量应安排在系统调节能力需求最大的位置，但是，这一举措很难通过量化进行评估，可定性地认为风电功率曲线的中部最需要调峰机组发挥作用，这一部分可能是一年中电源功率情况最为复杂、波动性最强烈的时段。本文假设启停机组的基荷部分安排于如图6中绿色线所标部分。在此不必讨论机组峰荷段的变化，原因是各类机组的可调节容量部分爬坡率等调节能力较强，可以满足跟随新能源功率的需求。

那么该机组的实际停运率 q_e 为

$$q_e = [1 - \frac{E_{gq}}{C_{qmax} \cdot T} (1 - q_q)] \quad (18)$$

式中： E_{gq} 为图6中绿色线与ELDC、风电功率曲线所围面积代表的电量，MWh； T 为研究时间周期。

该机组为第 i 段参与安排的机组，那么 E_{gq} 的计算则为

$$E_{gq} = T \int_{x_{i-1}}^{x_{i-1} + C_{qmin}} [f^{(i-1)}(x) - F_{ww}(x)] dx \quad (19)$$

式中 $F_{ww}(x)$ 为风电功率累积概率曲线。

启停调峰机组基荷段参与生产后，负荷曲线修正为

$$f^{(i)}(x) = (1 - q_e) f^{(i-1)}(x) + q_e f^{(i-1)}(x - C_{qmin}) \quad (20)$$

在设置启停调峰后，图6所示系统下几乎无弃风现象出现，启停机组减少弃风的主要途径是：一是通过改变风电带负荷位置；二是通过改变ELDC的形状，使其下降沿更加平缓，同风电功率概率分布曲线愈加相似。

4 算例分析

4.1 系统情况

选取北方某省级电网历史数据进行全年12个月的模拟计算。该地区全网最大发电负荷为27330.98 MW，最小发电负荷为19082.24 MW，发电负荷均值为23309.55 MW。总装机容量46800 MW，其中煤电33000 MW、水电800 MW、风电约13000 MW。网调火电机组装机容量为26760 MW，其中非供热火电机组10780 MW、热电联产机组15980 MW。

网调各台非供热火电机组最小稳定发电功率约为额定容量的50%，供暖机组处于热电联产状态下的最小稳定功率为额定容量的80%。

进行逐月消纳能力评估，结果如表1所示。

表1 系统现有消纳能力评估

Table 1 Current system accommodation assessment

月份	弃风电量/GWh	弃风率/%
1	1127.60	35.71
2	598.38	33.88
3	1083.27	37.54
4	170.95	9.90
5	198.72	6.26
6	6.29	0.51
7	101.38	6.17
8	105.45	9.02
9	42.75	2.98
10	318.75	14.35
11	2185.11	47.29
12	3057.42	50.46

4.2 增加可调节容量

本节分析增加非供热火电机组可调节容量的消纳效果。增加机组的调峰深度，可以使得自备电厂、热电联产机组的功率曲线位置向前移动，为风电提供更多的消纳空间，图 7显示了1月份不同非供热火电机组调峰深度下风电功率曲线的位置变化情况，其中，最左侧曲线为非供热火电机组实现100%调峰深度的情况，反映出在供暖季单独依靠增加调峰深度这一措施不能完全解决弃风问题。

不同月度内，弃风情况对非供热火电机组的调峰深度响应程度也不同。在可调容量增加量0~2490 MW的范围内，图8显示了1~3月和7~9月的弃风率变化情况。其中，图8中未考虑实际最小容量的限制。

可以看出，7月弃风率与可调容量增加量之间呈二次关系，弃风对深度调峰措施响应程度较高，而1~3月以及未显示结果的10月中，弃风率响应程度次之，11月和12月弃风较严重，在试验范围内仅能降低至25%。另外，从促进消纳量来看，7~9月内，可调容量增加量超过500 MW后，弃风率可控制在5%以下，继续增加调峰容量的需求降低。

根据上述仿真结果，得到不同弃风率要求下各月份的调峰容量需求情况，如表2所示。显然，现状系统即使非供热火电机组的调节能力按照全额容量计算，3月的弃风率仅能控制在6%水平上，11月和12月的弃风率仅能控制在15%水平上，弃风矛盾突出。

表 2 不同弃风率要求下各月所需的可调容量增加值

Table 2 Extra capacity required for each month under different curtailment rates

月份	现有最小稳定功率	MW					
		5%	6%	8%	10%	15%	20%
1	3090	2660	2440	2060	1740	1150	790
2	2490	2360	2180	1870	1610	1070	650
3	2640	3170	2960	2620	2330	1750	1270
4	2490	680	510	220	0	0	0
5	3240	210	30	0	0	0	0
6	3240	0	0	0	0	0	0
7	5500	140	10	0	0	0	0
8	5500	640	430	110	0	0	0
9	3240	0	0	0	0	0	0
10	3240	870	750	540	350	0	0
11	3240	5390	5110	4630	4240	3470	2810
12	3240	NA	5340	4790	4310	3330	2730

注：表中加粗数字表示调峰容量增加量超过该月内非供热火电机组的最小稳定功率。

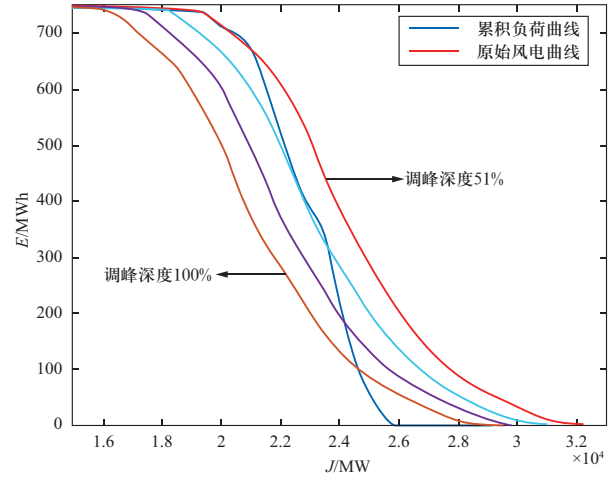
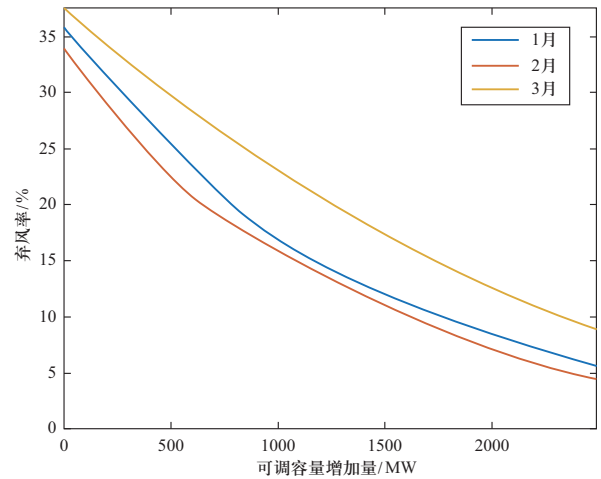
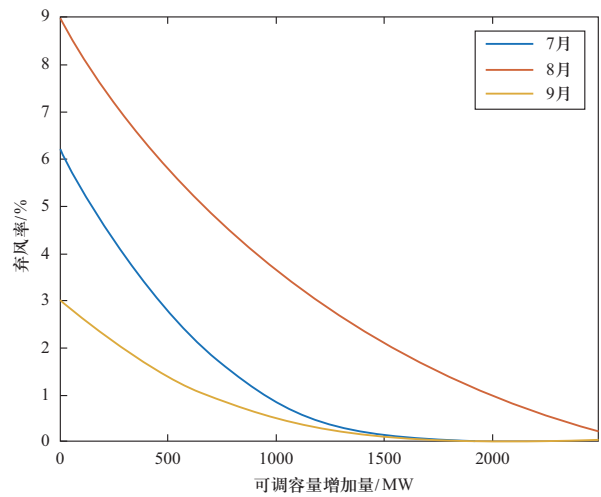


图 7 不同调峰深度下风电功率曲线变化图（1月）

Fig. 7 Curves of wind power CDF under different peak regulation capacity in January



(a) 1~3月



(b) 7~9月

图 8 各典型月内弃风率与调峰容量增加量关系

Fig. 8 Relationship between curtailment rate and increased peaking capacity in typical months

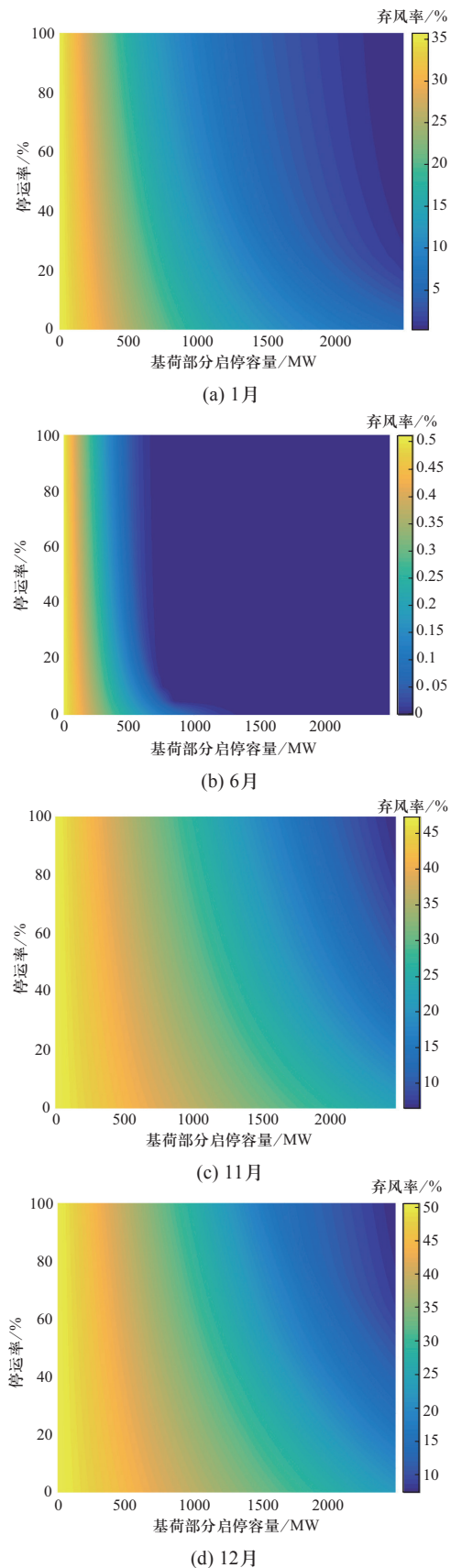


图9 典型月内弃风率与启停调峰参数关系

Fig. 9 Relationship between curtailment rate and parameters of on-off units in typical months

4.3 设置启停调峰机组

在不同启停容量和停运率下,火电机组参与深度调峰的效果有一定差异,图9所示为典型月内(1月、6月、11月、12月)不同启停机组参数与弃风率之间的关系。

从效果上看,同一调峰容量配置下,技术停运率越高,促进消纳效果越明显,图中的色块过渡越快。从时间上看,弃风越严重的月份,弃风率对技术停运率的敏感度越高,如1月与6月对比,1月份区域分布呈三角形,而非供暖期月份则呈矩形。另一方面,图中也清晰地显示了启停调峰促消纳效果的理论最大值,全年中1至10月均可将弃风率控制在5%以下,某些月甚至可以稳定地控制在0水平,而11月和12月仅能控制在10%水平。

5 结论

基于随机生产模拟方法,本文建立了面向规划的中长期调峰能力评价模型。基于源荷侧的概率模型和改进的生产安排方式,本文提出了可再生能源消纳电量评估方法。分析了火电机组参与深度调峰的机理并建立量化模型,从而揭示统计意义下系统调峰能力的变化过程。通过对某地区电网的仿真求解得到不同弃风率要求下各类方案的配置情况。根据结果显示,设置启停调峰机组效果最好,而增加可调节容量措施次之。本文所得结果可为典型地区火电深度调峰技术改造和优化配置的规划提供指导。

参考文献

- [1] John Kabouris, F. D. Kanellos. Impacts of large-scale wind penetration on designing and operation of electric power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2010, 1(2): 107-114.
- [2] 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(in Chinese).
- [3] 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(in Chinese).

- [4] 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(2): 48-51.
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 & Control, 2016, 44(2): 48-51(in Chinese).
- [5] 吕泉, 王伟, 韩水, 等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1887-1894.
Lyu Quan, Wang Wei, Han Shui, et al. A new evaluation method for wind power curtailment based on analysis of system regulation capability[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1887-1894(in Chinese).
- [6] 杨冬锋, 周苏荃, 鲍锋. 风电并网系统低谷时段的调峰能力分析[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1446-1451.
Yang Dongfeng, Zhou Suquan, Bao Feng. Analysis on peak load regulation capability of power grid integrated with wind farms in valley load period[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1446-1451(in Chinese).
- [7] 吴雄, 王秀丽, 李骏, 等. 考虑风电外送的省级系统调峰分析模型[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1578-1583.
Wu Xiong, Wang Xiuli, Li Jun, et al. A model to analyze peak load regulation of provincial power system considering sending-out of wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1578-1583(in Chinese).
- [8] 刘德伟, 黄越辉, 王伟胜, 等. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 77-81.
Liu Dewei, Huang Yuehui, Wang Weisheng, et al. Predicting the accommodation of wind energy in provincial system considering load-following and transmission-line limitation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 77-81(in Chinese).
- [9] 姜欣, 陈红坤, 向铁元, 等. 考虑调峰特性的电网风电接入能力分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 13-18, 25.
Jiang Xin, Chen Hongkun, Xiang Tiejun, et al. Wind power penetration capacity considering peak regulation characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 13-18, 25(in Chinese).
- [10] 王晓海, 乔颖, 鲁宗相, 等. 供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2112-2119.
Wang Xiaohai, Qiao Ying, Lu Zongxiang, et al. A novel method to assess wind energy usage in the heat-supplied season[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2112-2119(in Chinese).
- [11] 电力行业可靠性管理标准化技术委员会. 发电设备可靠性评价规程: DL/T 793—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [12] 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(in Chinese).
- [13] 杨维军, 王斌. 二参数Weibull分布函数对近地层风速的拟合及应用[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 118-122.
Yang Weijun, Wang Bin. Fitting to wind velocity of surface layer using two parameters Weibull distribution function and its application [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1999, 10(1): 118-122(in Chinese).
- [14] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于非时序生产模拟的风电消纳评估方法[J]. 电力建设, 2015, 36(10): 129-137.
Li Haibo, Lu Zongxiang, Qiao Ying, et al. Evaluation method of wind power accommodation capacity based on non-sequential production simulation [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(10): 129-137(in Chinese).
- [15] 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): 16-29.
Wang Xifan. EEF approach to power system probabilistic modeling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1984, 18(6): 16-29(in Chinese).
- [16] Agora Energiewende (2017): Flexibility in thermal power plants-with a focus on existing coal-fired power plants[R]. Berlin: Agora, 2017.
- [17] 曾平良, 鲁宗相, 王秀丽, 等. 大规模新能源并网规划[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.

收稿日期: 2018-10-12; 修回日期: 2018-12-03.



马彦宏

作者简介:

马彦宏 (1975), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源并网技术、电力系统自动化等, E-mail: mayh@gs.sgcc.com.cn.

姜继恒 (1994), 男, 博士研究生, 通信作者, 研究方向为电力系统规划, E-mail: jiheng1020@163.com.

鲁宗相 (1974), 男, 副教授, 研究方向为风电/太阳能发电并网分析与控制、能源与电力宏观规划、电力系统可靠性、分布式电源及微电网, E-mail: luzongxiang98@tsinghua.edu.cn.

乔颖 (1981), 女, 副研究员, 研究方向为新能源、分布式发电、电力系统安全与控制, E-mail: qiaoying@tsinghua.edu.cn.

叶一达 (1992), 男, 博士研究生, 研究方向为电力电子接口装置并网分析与控制, E-mail: yyd14@mails.tsinghua.edu.cn.

(责任编辑 赵杨)