

电力系统新能源等效消纳能力及其工程应用

孙沛¹, 范越², 孙骁强², 牛拴保², 杨攀峰¹, 张智荏³, 郭瑾程³

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048; 3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 构建以新能源为主体的新型电力系统, 新能源消纳问题是规划人员要面临的挑战之一。在电力系统规划阶段, 通常需要评估电力系统新能源的调峰需求, 以便规划调峰电源, 控制新能源弃电率在合理水平。在评估电力系统新能源调峰需求时, 一般较难定量分析, 往往通过采用生产模拟计算电力系统弃电率的方法侧面反映。本文结合生产模拟与新能源特性, 提出等效消纳能力概念, 可快速便捷评估系统调峰需求、计算系统弃电率、安排调峰电源等。并在实际工程中对西北电网多省实例验证方法的可行性。

关键词: 新能源消纳; 弃电率; 等效消纳能力

DOI: 10.12067/ATEEE2208016

文章编号: 1003-3076(2023)08-0079-08

中图分类号: TM715

1 引言

为应对日益加剧的能源与环境危机, 各国政府相继提出了构建高比例可再生能源电力系统的目标与计划。习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话指出, 中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和^[1]。这就需要改变目前以化石能源燃烧为主的发电结构, 提升光伏、风能等清洁能源发电的占比^[2]。近年来新能源规模快速增长, 截止2021年底, 全国可再生能源发电累计装机容量和发电量分别为10.63亿kW和2.48万亿kW·h^[3,4]。新能源快速增长带来的系统消纳问题日益突出^[5-7]。

分析系统新能源消纳问题, 需重点分析系统调峰需求, 即灵活性资源的需求。在少量新能源接入系统时, 为追求全额消纳新能源, 考虑调峰需求为负荷峰谷差加上新能源的装机容量^[8,9]。随着风电等规模增大, 考虑风电反调峰特性, 分析其在负荷高峰、低谷时段的出力, 将二者差值代替装机容量来考虑调峰需求^[10,11]。文献[12]以风电接入前后系统负荷峰谷差变化, 考虑概率因素, 以最大、平均两个角度分析调峰需求。这些方法都通过简单数学运算即可实现, 一般通过电子表格等计算即可得到结果。

以上方法从电力的角度去描述系统对新能源的调峰需求, 简单直观; 但是在大规模新能源接入背景下, 系统调峰能力不足, 此类方法无法给出弃电量等规划决策关心的指标, 有学者提出采用时序生产模拟的方法分析调峰需求^[13-15]。随着国际能源署(International Energy Agency, IEA)提出的电力系统灵活性及其评估方法^[16,17], 国内外学者研究重点从调峰平衡需求分析转向电力系统灵活性分析^[18-23]。但此类方法一般需要通过程序实现, 并且计算结果不够直观, 在规划阶段不利于规划人员拟定方案, 也不方便决策人员理解。

本研究尝试将上述两类方法结合, 通过引入等效消纳能力的概念, 定量分析新能源调峰需求。

2 等效消纳能力及其工程应用

2.1 整体思路

在进行省级及以上系统的电源规划时, 通常会拟定多个新能源规划装机方案。进行方案评估时, 需要计算每一方案的系统弃电率, 明确系统调峰需求, 规划合理的调峰电源规模, 控制系统弃电率在合理水平下。在实际规划过程中, 对每一方案都得使用生产模拟软件计算, 计算较为耗时; 其次, 难以定量给出系统调峰需求; 此外, 无法粗略判断系统的调

收稿日期: 2022-07-29

作者简介: 孙沛(1988-), 男, 陕西籍, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统规划、新能源消纳;

郭瑾程(1992-), 女, 河南籍, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统规划(通信作者)。

峰电源规模,仅靠不断调整调峰电源方案,生产模拟试算的方法得到调峰电源规模。

针对以上问题,结合新能源资源特性曲线,本文引入电力系统新能源等效消纳能力的概念,在实际工程允许的误差范围内,可快速计算系统的弃电率,定量评估系统调峰需求,粗略判断调峰电源规模。

上述工程应用在误差允许范围内可行的前提为:系统开机方式没有大的改动;新能源规模与特性没有大规模改动。

2.2 等效消纳能力的计算方法

电力系统消纳新能源的能力取决于新能源的资源条件与系统中负荷、电源结构、开机情况、机组的调峰能力等,也称这种能力为新能源消纳空间^[24],如图 1 所示。

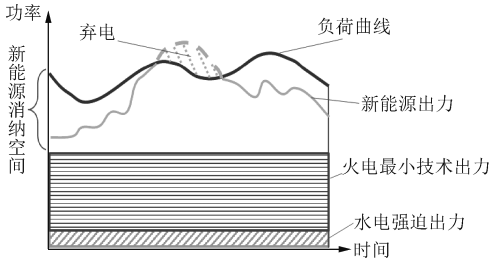


图 1 新能源消纳能力示意图

Fig.1 Power system's capability of accommodating renewable energy

定量来看, i 时刻的新能源消纳能力 C_{Ni} 为:

$$C_{Ni} = P_{Li} - \sum_{c=1}^{N_C} P_{c,i,\min}^C - \sum_{h=1}^{N_H} P_{h,i}^H - \sum_{e=1}^{N_E} P_{e,i,\text{dis}}^E + \sum_{e=1}^{N_E} P_{e,i,\text{ch}}^E \quad (1)$$

式中, P_{Li} 为 i 时刻的负荷; $P_{c,i,\min}^C$ 为 i 时刻第 c 台火电最小技术出力; $P_{h,i}^H$ 为 i 时刻第 h 台水电出力; $P_{e,i,\text{dis}}^E$ 、 $P_{e,i,\text{ch}}^E$ 分别为 i 时刻第 e 台储能电源放电、充电功率; N_C 、 N_H 、 N_E 分别为开机火电台数、水电台数、储能电站数量。

此外,水电站还需满足出力和电量约束,即:

$$P_{h,\min}^H \leq P_{h,i}^H \leq P_{h,\max}^H \quad (2)$$

$$\sum_i P_{h,i}^H \leq E_h^H \quad (3)$$

式中, $P_{h,\min}^H$ 为第 h 台水电强迫出力; $P_{h,\max}^H$ 为第 h 台水电预想出力; E_h^H 为第 h 台水电发电量。

储能电站也需满足充放电约束^[25,26],即:

$$\sum_i P_{e,i,\text{dis}}^E = \eta_e \sum_i P_{e,i,\text{ch}}^E \quad (4)$$

式中, η_e 为第 e 台储能电源的效率。

若 i 时刻的新能源理论出力序列为 C_{Ri} , 则 i 时

刻的新能源消纳功率 C_{Ai} 为:

$$\begin{cases} C_{Ai} = C_{Ni} & C_{Ri} \geq C_{Ni} \\ C_{Ai} = C_{Ri} & C_{Ri} < C_{Ni} \end{cases} \quad (5)$$

i 时刻的新能源弃电功率 C_{Di} 为:

$$\begin{cases} C_{Di} = C_{Ri} - C_{Ni} & C_{Ri} \geq C_{Ni} \\ C_{Di} = 0 & C_{Ri} < C_{Ni} \end{cases} \quad (6)$$

如图 1 所示,系统中每一时刻的新能源消纳空间(或消纳能力)都是变化的,和负荷电源等都相关,同时也与其他时刻耦合在一起,计算起来也较为复杂。实际规划中对于新能源消纳能力的分析一般基于全年的弃电结果,本文提出的等效消纳能力尝试以一个全年不变的数值等效描述系统一年的新能源消纳能力。

等效消纳能力是一个功率概念,将系统的消纳能力与新能源资源条件结合,即认为新能源理论出力大于等效消纳能力时系统才发生弃电,弃电量为二者之差。

图 2 给出了等效消纳能力示意图。图 2 中给出新能源资源曲线,深色面积为系统实际发生的弃电量,横坐标为对应时刻;等效消纳能力以上的斜线面积即为系统等效弃电量,与深色面积相等。

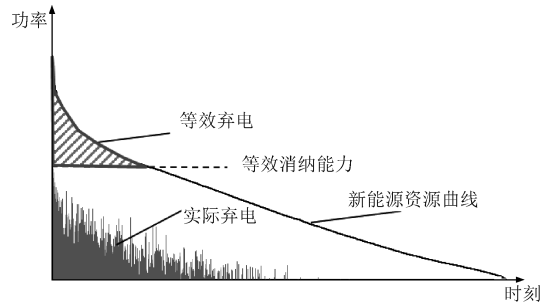


图 2 等效消纳能力计算示意图

Fig.2 Equivalent accommodating renewable energy capability calculation

具体计算流程如图 3 所示。步骤如下:

(1) 基于生产模拟软件计算,得到初始电源方案的系统新能源弃电量 E_0 。

(2) 整理新能源理论出力序列 $\{C_{Ri}\}$, 其中 $i = 1, 2, 3, \dots, 8\ 760$ 。

(3) 令待求解变量等效消纳能力的初值等于新能源最大理论出力 $C_N = \max\{C_{Ri}\}$ 。

(4) 按步长 ΔC 向下搜索更新待求解变量,即 $C_N = C_N - \Delta C$ 。

(5) 对应的系统新能源等效弃电量为新能源理论出力大于等效消纳能力的部分之和,即为:

$$E_1 = \begin{cases} \sum_i (C_{Ri} - C_N) & C_{Ri} \geq C_N \\ 0 & C_{Ri} < C_N \end{cases}$$

(6) 比较两种方法计算的新能源弃电量是否在误差 ε 范围内,即是否满足 $|E_1 - E_0| \leq \varepsilon$, 在误差范围内,进入下一步,否则跳至步骤(4)。

(7) C_N 即为系统的等效消纳能力。

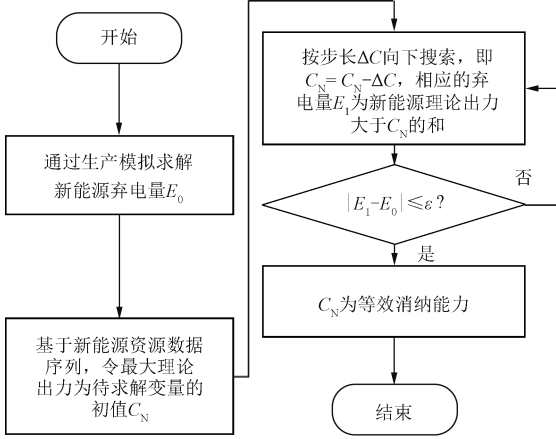


图3 等效消纳能力计算流程图

Fig.3 Equivalent accommodating renewable energy capacity calculation flowchart

2.3 等效消纳能力的工程应用

2.3.1 定量评估系统调峰需求

规划研究中,新能源的有效容量是资源特性分析的一个重要指标,通过出力-电量累积特性曲线,可确定指定弃电率下的有效容量系数。

如常选取弃电率为 5%,则对应的 95%有效容量指新能源累计电量为 95%时的最大出力值^[11]。图 4 为西北某省实际年风电出力-电量累积特性曲线。由图 4 可见,95%有效容量系数为 0.5,其物理意义为如果系统能够保证消纳风电装机 50%的出力,即可满足全年弃电率控制在 5%以下。

根据定义,本次研究提出:在给定弃电率下,新能源的有效容量与等效消纳能力的差即为系统新能源的调峰需求,如图 5 所示。

通过本方法,将新能源资源特性与调峰需求结合起来,便于规划人员方案拟定与分析。

2.3.2 系统弃电率计算

求得系统的等效消纳能力后,可快速计算不同新能源规模的系统弃电率。新规模下新能源出力序列为 $\{C_{Ri}^1, i = 1, \dots, 8760\}$, 对应的系统新能源等效弃电量如图 6 所示,计算公式为:

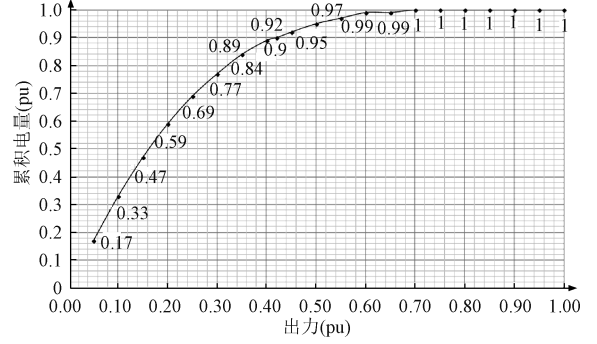


图4 风电出力-电量累积特性曲线

Fig.4 Wind power output-electricity accumulation characteristic curve

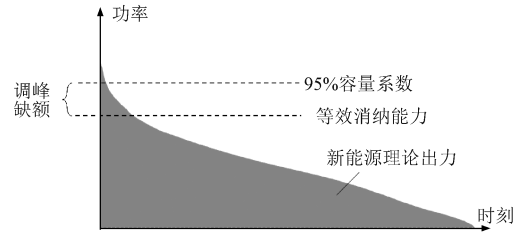


图5 系统调峰需求示意图

Fig.5 Power system's peak-load regulating requirement

$$E_1^1 = \begin{cases} \sum_i (C_{Ri}^1 - C_N) & C_{Ri}^1 \geq C_N \\ 0 & C_{Ri}^1 < C_N \end{cases} \quad (7)$$

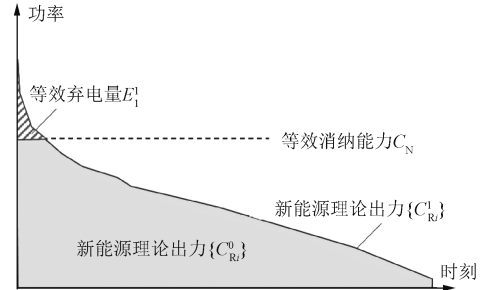


图6 系统弃电量计算示意图

Fig.6 Schematic diagram of calculation of power consumption of system

若原始规模的新能源逐小时理论出力序列为 $\{C_{Ri}^0\}$, 系统消纳新能源的逐小时消纳能力序列为 $\{C_{Ai}^0\}$ 。通过生产模拟软件计算,可得到系统新能源弃电量 E_0^0 。用消纳能力序列测算的弃电量为:

$$E_0^0 = \begin{cases} \sum_i (C_{Ri}^0 - C_{Ai}^0) & C_{Ri}^0 \geq C_{Ai}^0 \\ 0 & C_{Ri}^0 < C_{Ai}^0 \end{cases} \quad (8)$$

根据等效消纳能力计算等效弃电量为:

$$E_1^0 = \begin{cases} \sum_i (C_{Ri}^0 - C_N) & C_{Ri}^0 \geq C_N \\ 0 & C_{Ri}^0 < C_N \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)、式(9),根据等效消纳能力的定义,原规模下的计算误差为:

$$\Delta E^0 = \sum_j (C_{Rj}^0 - C_{Aj}^0) - \sum_k (C_{Rk}^0 - C_N) \leq \varepsilon \quad (10)$$

式中, $k \in \{\text{等效弃电时刻}\}$; $j \in \{\text{实际弃电时刻}\}$ 。未发生弃电的时刻两项抵消,相减为零。

其次,改变系统新能源规模,以增加新能源规模为例进行误差测算分析。在新规模下,用消纳能力序列测算的弃电量为:

$$E_0^1 = \begin{cases} \sum_i (C_{Ri}^1 - C_{Ai}^1) & C_{Ri}^1 \geq C_{Ai}^1 \\ 0 & C_{Ri}^1 < C_{Ai}^1 \end{cases} \quad (11)$$

等效弃电量见式(7),二者的误差为:

$$\begin{aligned} \Delta E^1 &= E_0^1 - E_1^1 \\ &= \sum_j (C_{Rj}^1 - C_{Aj}^1) + \sum_{j'} (C_{Rj'}^1 - C_{Aj'}^1) - \\ &\quad \sum_k (C_{Rk}^1 - C_N) - \sum_{k'} (C_{Rk'}^1 - C_N) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, j', k' 分别为增加新能源规模后实际、等效新发生弃电的时刻。

根据等效消纳能力的前提,系统开机方式没有大的改动,可认为系统接纳能力不变,即:

$$C_{Ai}^1 \approx C_{Ai}^0 \quad \forall i \quad (13)$$

近似认为新能源规模与特性没有大规模改动,新出力为原始出力加上小差异,如下所示:

$$C_{Ri}^1 = C_{Ri}^0 + \Delta\alpha \cdot C_{Ri}^0 \quad (14)$$

将式(13)、式(14)代入式(12),可得:

$$\begin{aligned} \Delta E^1 &\approx \Delta\alpha \left(\sum_j C_{Rj}^0 - \sum_k C_{Rk}^0 \right) + \sum_{j'} (C_{Rj'}^1 - C_{Aj'}^1) - \\ &\quad \sum_{k'} (C_{Rk'}^1 - C_N) \end{aligned} \quad (15)$$

式中,计算弃电量的误差项由三部分构成,第一项为实际弃电时刻与等效弃电时刻的资源量的差乘以规模变化量;第二项为新增实际弃电时刻资源量与消纳能力的差;第三项为新增等效弃电时刻资源量与等效消纳能力的差。

在式(7)~式(15)中,实际弃电中大部分发生在新能源大发时刻,与等效弃电时刻很多重合,即 $\{j\}$ 与 $\{k\}$ 序列、 $\{j'\}$ 与 $\{k'\}$ 序列很多数值重叠,如图2所示;其次, $\{j'\}$ 、 $\{k'\}$ 为规模变化后新增的弃电时刻,总数都不大;最后,规划阶段更关心的是弃电率

指标,误差电量还需除以总电量,误差数值会更小,在工程应用中可满足误差要求。

此外,改变系统等效消纳能力,比如进行火电灵活性改造,也可按此方法快速计算系统弃电率。

2.3.3 调峰电源规模估算

在得到系统的弃电率与调峰需求后,需要进行调峰电源的规划。以常见的火电灵活性改造与储能为例说明。

火电灵活改造提升的调峰能力与开机率的乘积即为提升的等效消纳能力 ΔC_N , 如下所示:

$$\Delta C_N = \bar{p} \sum_{c=1}^{N_{C_{\text{new}}}} \sum_{t=1}^{t_T} \lambda_t (P_{c,\min}^C - P_{c,\min}^{C,\text{new}}) \quad (16)$$

式中, $P_{c,\min}^{C,\text{new}}$ 为改造后第 c 台火电最小技术出力; \bar{p} 为平均开机率; $N_{C_{\text{new}}}$ 为改造机组台数; t_T 为机组不同最小技术出力状态数,如供暖期、非供暖期最小技术出力不同; λ_t 为不同状态时长占比,还需满足以下条件:

$$\sum_{t=1}^{t_T} \lambda_t = 1 \quad (17)$$

储能是良好的调峰电源,其加入可增加系统等效消纳能力。由于影响开机及储能时长限制,其等效消纳能力要进行折算。

$$\Delta C_N = \alpha \sum_{e=1}^{N_{E_{\text{new}}}} C_e^E \quad (18)$$

式中, $N_{E_{\text{new}}}$ 为新增储能台数; C_e^E 为第 e 台储能电源的装机容量; α 为修正系数。

储能的加入同时会影响系统的开机方式,可能减少开机规模;此外,电化学储能的储能时长较短,无法充分发挥其容量效益,储能电源提升的等效消纳能力为装机容量乘以修正系数 α ,根据工程经验, α 一般取 0.4~1.5。修正系数主要根据储能时长与系统的弃电水平确定,弃电率越高、储能时长越长修正系数越大。

3 8 760全时段生产模拟软件及模型介绍

近年来,大规模新能源的接入为电力系统运行带来了新的挑战,新能源特性的间歇性与预测的不准确性对电力系统的调节能力提出了越来越高的要求,对生产模拟方法提出了新的挑战。为应对以上问题,西北电力设计院有限公司联合西安交通大学进行了包含中长期运行模拟和逐周运行模拟的电力系统多时间尺度运行模拟研究,开发了电力系统全时段生产模拟程序(Power-system Overall Production

Simulation,POPS)^[27-30]。在大规模新能源接入的背景下,为充分反映新能源在不同时间尺度下的特性,程序由中长期运行模拟和短期运行模拟组成,程序框图如图 7 所示。

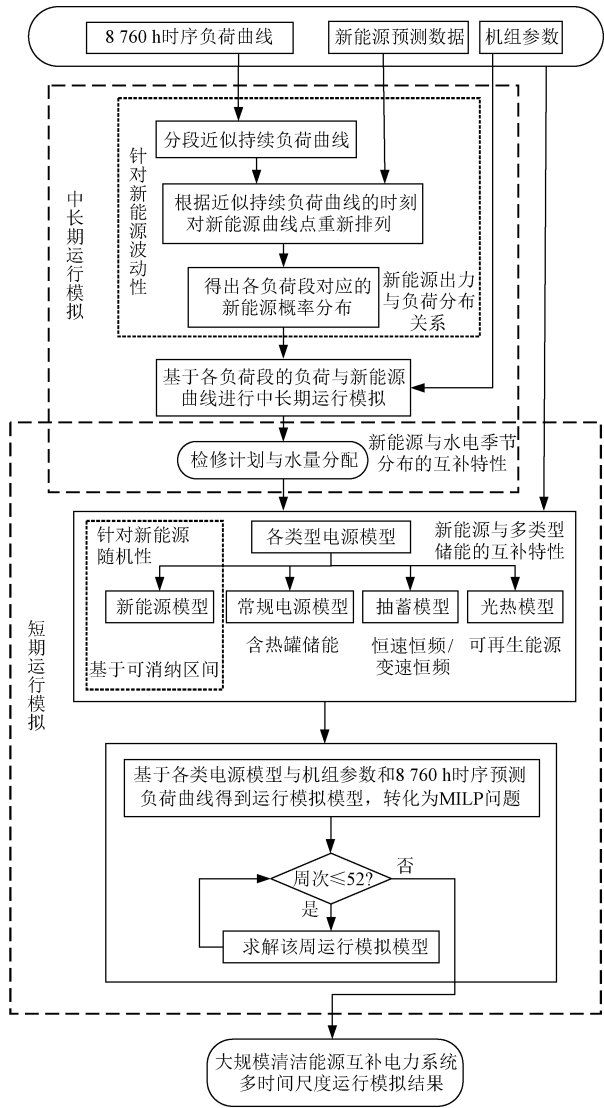


图 7 电力系统全时段生产模拟程序框架

Fig.7 POPS framework

中长期模拟实现以周为基本时长进行全年模拟,实现检修安排、水电电量跨周调节、长期交易安排等功能。模型基于分段近似持续负荷曲线,目标函数为火电机组煤耗最小、电力不足最小、新能源弃电惩罚最小。按时段统计新能源概率分布,形成离散概率分布模型;采用分段线性函数对火电机组燃料成本进行建模;水电考虑水文约束;储能考虑充放电约束、电站整体的能量平衡约束。

短期生产模拟以小时为时间尺度,逐周进行模拟。考虑燃料成本、弃电惩罚等,计及各类运行约

束,构建混合整数线性规划 (Mixed Integer Linear Programming, MILP) 模型,调用商用求解器 CPLEX 求解。可计算各类电源利用小时数、弃电量、电量不足等指标。模型基于时序负荷曲线,目标函数为火电机组煤耗和启停成本最小、电力不足最小、新能源弃电惩罚最小。新能源模型为考虑预测误差的时序功率曲线模型;火电、水电、抽蓄等与中长期模型类似,同时,中长期模拟求解的机组检修安排、水电电量协调等结果传递给逐周模拟。

此外,中长期模拟和短期模拟还需要计入系统运行约束,包括功率平衡约束、备用约束等。程序还考虑断面间功率传输限制的约束。

上述中长期模拟和短期模拟模型均为 MILP 问题,程序采用 CPLEX 商业求解器求解。程序已应用于多项实际规划中,并与 GE-MAPS 等程序对比验证,结果可信,得到中外专家认可。

4 算例分析

本节以西北两个省份的规划系统为算例进行计算说明。

4.1 算例 1

本小节以 2025 年西北某电网为例。该电网 2025 年最大负荷为 6 185 万 kW,直流外送 2 000 万 kW;火电规模为 8 918 万 kW,水电 1 324 万 kW,基础方案风电 3 100 万 kW、光伏 1 550 万 kW。在规划边界下,通过生产模拟计算可得系统弃电率为 5%,计算可得等效消纳能力为 1 930 万 kW。

对不同新能源方案计算,弃电率结果对比见表 1。若火电灵活性改造增加能力,弃电率结果对比见表 2。算例误差均在 5%以内。

表 1 不同新能源规模弃电率结果				
Tab.1 Curtailment rate of different renewable capacity				
风电/ 万 kW	光伏/ 万 kW	生产模拟 (%)	本方法 (%)	误差 (%)
3 100	1 550	4.92	—	—
3 000	1 550	4.56	4.44	-2.6
2 900	1 550	4.00	3.95	-1.3
2 800	1 550	3.50	3.51	0.3
2 700	1 550	3.10	3.09	-0.3
2 600	1 550	2.80	2.70	-3.6
3 350	1 700	6.90	7.00	1.4
3 000	1 500	4.20	4.24	1.0
6 200	3 100	32.00	33.40	4.4

表 2 火电灵活性改造后弃电率计算结果

Tab.2 Curtailment rate of flexibility improvement
of thermal power

火电灵活性改造 增加能力/万 kW	生产模拟 (%)	本方法 (%)	误差 (%)
50	4.49	4.37	-2.7
100	3.92	3.86	-1.5
200	2.97	3.00	1.0

4.2 算例 2

上述算例弃电率已不超过 5%,本小节以 2030 年西北另一省电网为例。该电网 2030 年最大负荷为 2 396 万 kW,直流外送 1 200 万 kW;火电规模为 3 800 万 kW,水电 242 万 kW,风电 2 500 万 kW、光伏 2 550 万 kW。在规划边界下,通过生产模拟计算可得系统弃电率为 17.3%,计算得等效消纳能力为 1 310 万 kW。新能源 95%有效容量为 1 935 万 kW,系统调峰需求为 625 万 kW。

措施 1:火电灵活性改造

火电灵活性改造规模见表 3。根据生产模拟结果,火电平均开机率 71%,估算可提升等效消纳能力 350 万 kW。通过生产模拟实际计算,系统弃电率为 7.9%,实际提升等效消纳能力 400 万 kW。二者接近。

表 3 火电灵活性改造提升等效消纳能力

	装机规模/ 万 kW	非采暖期提升/ 万 kW	采暖期提升/ 万 kW
合计	3 800	509	522
纯凝改造	2 559	412	412
热电改造	548	97	110
已改造	693	0	0

措施 2:增加储能电源

考虑灵活性改造以后,系统剩余调峰需求为 225 万 kW。电化学储能电源的修正系数取为 0.5,则需配置 450 万 kW×2 h 电化学储能。或抽蓄修正系数取为 1,按 240 万 kW×8 h 配置。经生产模拟程序测算,再增加 400 万 kW×2 h 电池储能或 240 万 kW×8 h 抽蓄,弃电率可降至 5%以下。与估算规模接近。

综合以上分析,本算例中各类调峰电源等效消纳能力及工作位置如图 8 所示。

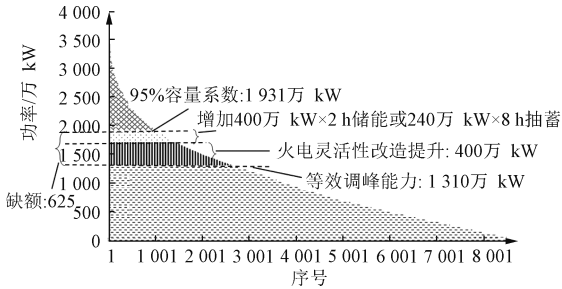


图 8 调峰电源工作位置示意图

Fig.8 Working position of flexible power

5 结论

高比例新能源系统的消纳问题是规划人员面临的重要挑战。本次研究结合生产模拟与新能源出力特性,提出等效消纳能力概念,直观地将新能源调峰电量问题与电力问题结合起来。基于等效消纳能力,可快速便捷地评估系统调峰需求、计算系统弃电率、安排调峰电源等。经过西北实际电网省级算例验证方法的正确性。本方法已在西北电网多项电源规划等实际工作中得到应用。需要说明的是,本方法仅适用新能源规模变化不大、系统开机变动不大的场景;后续工作将会进一步研究其余场景。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 努力推动实现碳达峰碳中和目标 [N/OL]. 国家节能中心, 2021-11-11 [2022-07-29]. https://www.ndrc.gov.cn/ws-dwhfz/202111/t20211111_1303691_ext.html.

[2] 廖华, 向福州. 中国“十四五”能源需求预测与展望 [J]. 北京理工大学学报 (社会科学版), 2021, 23 (2): 1-8.

Liao Hua, Xiang Fuzhou. Forecast and prospect of energy demand in China’s “14th Five-year” plan period [J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 23 (2): 1-8.

[3] 中国政府网. 国家能源局举行新闻发布会发布 2021 年可再生能源并网运行情况等并答问 [EB/OL]. (2022-01-29) [2022-07-09]. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/29/content_5671076.htm.

[4] 国家统计局. 中国统计年鉴 (2021) [DB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2021/indexch.htm>.

[5] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (1): 1-9.

Shu Yinbiao, Zhang Zhigang, Guo Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (1): 1-

- 9.
- [6] 彭波, 陈旭, 徐乾耀, 等. 面向新能源消纳的电网规划方法初探 [J]. 电网技术, 2013, 37 (12): 3386-3391.
- Peng Bo, Chen Xu, Xu Qian Yao, et al. Preliminary research on power grid planning method aiming at accommodating new energy [J]. Power System Technology, 2013, 37 (12): 3386-3391.
- [7] 朱俊澎, 施凯杰, 李强, 等. 考虑输电网潮流约束的时序生产模拟及新能源消纳能力评估 [J]. 电网技术, 2022, 46 (5): 1947-1955.
- Zhu Junpeng, Shi Kaijie, Li Qiang, et al. Time series production simulation and renewable energy accommodation capacity evaluation considering transmission network power flow constraints [J]. Power System Technology, 2022, 46 (5): 1947-1955.
- [8] 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.
- [9] 吴峰, 张弘. 大规模潮流能发电接入电网的调峰充裕性评估 [J]. 可再生能源, 2015, 33 (2): 326-332.
- Wu Feng, Zhang Hong. Peak-load regulation adequacy assessment of grid-connected large-scale tidal current power [J]. Renewable Energy Resources, 2015, 33 (2): 326-332.
- [10] 韩小琪, 孙寿广, 戚庆茹. 从系统调峰角度评估电网接纳风电能力 [J]. 中国电力, 2010, 43 (6): 16-19.
- Han Xiaoqi, Sun Shouguang, Qi Qingru. Evaluation of wind power penetration limit from peak regulation [J]. Electric Power, 2010, 43 (6): 16-19.
- [11] 中国电力工程顾问集团有限公司. 电力工程设计手册 24: 电力系统规划设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [12] 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.
- [13] 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.
- Lv 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.
- [14] 姚力, 王秀丽, 肖汉, 等. 基于多场景随机规划的电力系统生产模拟方法 [J]. 电力建设, 2016, 37 (12): 74-81.
- Yao Li, Wang Xiuli, Xiao Han, et al. Production simulation method of power system based on multi-scenario stochastic programming [J]. Electric Power Construction, 2016, 37 (12): 74-81.
- [15] 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. Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35 (22): 77-81.
- [16] International Energy Agency. Empowering variable renewables-options for flexible electricity flexible electricity systems [R]. Paris, France: International Energy Agency, 2008.
- [17] International Energy Agency. Harnessing variable renewables [M]. Paris: International Energy Agency, 2011: 41-67.
- [18] Lannoye E, Flynn D, O'Malley M. The role of power system flexibility in generation planning [A]. 2011 IEEE Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting [C]. Detroit, MI, 2011.
- [19] Lannoye E, Flynn D, O'Malley M. Evaluation of power system flexibility [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 27 (2): 922-931.
- [20] Lannoye E, Flynn D, O'Malley M. Transmission, variable generation, and power system flexibility [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (1): 57-66.
- [21] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估 [J]. 电网技术, 2015, 39 (6): 1672-1678.
- Li Haibo, Lu Zongxiang, Qiao Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms [J]. Power System Technology, 2015, 39 (6): 1672-1678.
- [22] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (1): 9-19.
- Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand and balance principle of power system with high-penetration renewable electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (1): 9-19.
- [23] 徐唐海, 鲁宗相, 乔颖, 等. 源荷储多类型灵活性资源协调的高比例可再生能源电源规划 [J]. 全球能源互联网, 2019, 2 (1): 33-40.
- Xu Tanghai, Lu Zongxiang, Qiao Ying, et al. High pen-

- etration of renewable energy power planning considering coordination of source-load-storage multi-type flexible resources [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2 (1): 33-40.
- [24] 刘纯, 屈姬贤, 石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (10): 3134-3144.
- Liu Chun, Qu Jixian, Shi Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (10): 3134-3144.
- [25] 孙树敏, 程艳, 于芑, 等. 考虑运行调度策略的工商业用户侧光储联合系统协同规划 [J]. 电工电能新技术, 2022, 41 (10): 81-88.
- Sun Shumin, Cheng Yan, Yu Peng, et al. Coordinated planning of photovoltaic-BESS hybrid system for industrial and commercial users considering scheduling strategy [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41 (10): 81-88.
- [26] 罗首权, 丁孝华, 韩韬, 等. 基于目标级联分析法的区域源网荷储系统日前运行优化 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40 (7): 11-19.
- Luo Shouquan, Ding Xiaohua, Han Tao, et al. Day-ahead operation optimization of regional scale source network load storage system based on analytical target cascading theory [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40 (7): 11-19.
- [27] 邵成成, 冯陈佳, 王雅楠, 等. 含大规模清洁能源电力系统的多时间尺度生产模拟 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (19): 6103-6113.
- Shao Chengcheng, Feng Chenjia, Wang Ya'nan, et al. Multiple time-scale production simulation of power system with large-scale renewable energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (19): 6103-6113.
- [28] 傅旭. 一种新的多省区电网协调运行生产模拟方法 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40 (12): 166-174.
- Fu Xu. A new production simulation method for coordinated operation of multi-provincial power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40 (12): 166-174.
- [29] 傅旭, 杨欣, 汪莹, 等. 光热电站容量效益评估及影响因素研究 [J]. 电力工程技术, 2021, 40 (3): 186-192.
- Fu Xu, Yang Xin, Wang Ying, et al. The capacity benefit evaluation of CSP power station and its influencing factors [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40 (3): 186-192.
- [30] 邵成成, 冯陈佳, 傅旭, 等. 多能源电力系统生产模拟: 现状与挑战 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41 (6): 2029-2040.
- Shao Chengcheng, Feng Chenjia, Fu Xu, et al. Multi energy power system production simulation: State of arts and challenges [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (6): 2029-2040.

Equivalent renewable energy accommodating capability and its engineering application

SUN Pei¹, FAN Yue², SUN Xiaoqiang², NIU Shuanbao², YANG Panfeng¹,
ZHANG Zhiren³, GUO Jincheng³

(1.Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Xi'an 710075, China;2.Northwest Branch of State Grid Corporation of China,

Xi'an 710048, China;3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To build a new power system with renewable energy as the main body, the problem of renewable energy consumption is one of the challenges that planners have to face. In the power system planning stage, it is usually necessary to evaluate the peak shaving demand of renewable energy in the power system in order to plan the peak shaving power supply and control the curtailment rate of renewable energy at a reasonable level. When evaluating the demand for renewable energy peak regulation in the power system, it is generally difficult to quantitatively analyze it, and the method of calculating the curtailment rate of the power system by production simulation is often used. Combining production simulation and renewable energy characteristics, this research proposes the concept of equivalent renewable energy accommodating capacity, which can quickly and easily evaluate system peak shaving demand, calculate system power curtailment rate, and arrange peak shaving power supplies. And in the actual project, the feasibility of the method is verified by the example of the Northwest Power Grid in multiple provinces.

Key words: renewable energy consumption; curtailment rate; equivalent accommodating renewable energy capacity