

# 考虑灵活爬坡辅助服务和弃风惩罚的现货 电能量市场出清模型

胡晓静<sup>1</sup>, 李慧<sup>2</sup>, 崔晖<sup>1</sup>, 刘思嘉<sup>2</sup>, 叶林<sup>3</sup>, 路怡<sup>1</sup>, 丁强<sup>1</sup>

(1. 电力调度自动化技术研究及系统评价北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192;  
2. 北京信息科技大学自动化学院, 北京 100192; 3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为解决风电不确定性引起的系统爬坡能力不足、高比例风电接入时系统总运营成本偏高等问题, 提出了计及改进灵活爬坡辅助服务和弃风惩罚的现货电能量市场出清模型。首先, 分析了单台机组在出力状态、投入/退出过程中需要满足的爬坡速率约束, 以及系统因净负荷波动需要满足的爬坡能力约束, 提出了改进的灵活爬坡辅助服务产品。然后, 以发电计划和机组状态为决策变量, 构建了计及灵活爬坡辅助服务和弃风惩罚的目标函数。最后, 通过两个算例从风电预测误差、风电渗透率和弃风惩罚成本等不同角度进行深入分析, 验证所提出清模型的有效性。算例结果表明, 所提出清模型既提高了系统运行的灵活性和经济性, 又提升了高比例风电的消纳能力。

**关键词:** 现货市场; 风电消纳; 灵活爬坡; 弃风惩罚; 出清模型

## Cleaning model of a spot electric energy market considering flexible ramping auxiliary services and wind curtailment penalty

HU Xiaojing<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2</sup>, CUI Hui<sup>1</sup>, LIU Sijia<sup>2</sup>, YE Lin<sup>3</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, DING Qiang<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Research and System Evaluation of Power Dispatching Automation Technology (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China; 2. School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** A cleaning model of a spot electric energy market considering modified flexible ramping auxiliary service and wind curtailment penalty is presented to solve issues such as insufficient system ramping capacity caused by wind power uncertainty and high total operating costs caused by a high penetration of wind power. First, a modified flexible ramping auxiliary service is proposed. This is done by analyzing the flexible ramping speed constraints that a single-unit needs to meet during output, startup and shutdown processes, and the flexible ramping ability constraints that the system needs to meet because of net load fluctuations. Secondly, an objective function that takes into account the modified flexible ramping auxiliary service and wind curtailment penalty is established. It uses output plans and the status of generators as decision variables. Finally, two examples are given to verify the effectiveness of the proposed cleaning model through in-depth analysis from different perspectives such as wind power forecasting error, penetration ratio, and curtailment penalty cost. The simulation results show that the presented model not only improves system flexibility and economy of system operation, but also enhances the consumptive ability of a high proportion of wind power.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2403400).

**Key words:** spot market; wind power consumption; flexible climbing; wind curtailment penalty; cleaning model

## 0 引言

传统化石能源过度开采和不可再生性加剧了世

界能源的枯竭, 破坏了地球生存环境。因此, 加快能源转型已经成为世界各国实现可持续发展的重中之重<sup>[1]</sup>, 也是实现“双碳”目标的必经之路<sup>[2-4]</sup>。风能具有绿色低碳、可再生、易获取等优势, 在能源转型中占据了主流地位, 因此备受青睐。近20年, 风能产业在我国发展迅速, 风电上网电量急剧增加。

**基金项目:** 国家重点研发计划资助(2022YFB2403400); 北京市重点实验室开放基金项目资助(DZ80-22-001)

然而，受气象因素的影响，风电出力具有较强的间歇性、随机性和波动性，使得电力供需平衡难度增大<sup>[5]</sup>，需要系统具备优质的灵活资源调节能力，以保证系统在安全稳定运行的前提下实现大规模风电的并网与消纳<sup>[6-7]</sup>。

目前，学者们基于中国电力市场的实际情况，关于现货电能量出清及其耦合辅助服务市场联合出清等问题进行相关研究。文献[8]以购电成本、失负荷和弃风惩罚成本最小为目标，构建了含风电的日前电能量市场出清优化模型。文献[9]提出一种考虑碳交易市场的电碳耦合市场运行机制，并构建了考虑动态碳排放强度的电-碳耦合市场日前出清模型。文献[10-12]建立了储能资源参与调频的辅助服务市场，优化了电力系统的灵活性配置，促进了新能源消纳。文献[13-15]设计了不同的深度调峰市场机制，实现了深度调峰和日前市场的融合，解决电网调峰能力不足和新能源消纳受限的问题。上述文献主要是针对现货电能量市场的运营及其与辅助服务市场间的协调运行问题<sup>[9]</sup>，并未涉及系统内灵活性资源的调节能力问题，现有的调频、调峰等手段难以完全满足系统对灵活性资源调节的需求。

近些年，美国的一些独立系统运营机构引入灵活爬坡产品(flexible ramping product, FRP)<sup>[16-18]</sup>，解决了灵活性资源调节不足的问题。FRP 是一种通过预先储存一定的灵活性容量以满足系统中潜在的向上/向下爬坡需求的市场产品，调度运行机构可以应用 FRP 对下一时刻可能出现的净负荷(即负荷需求减去风电出力)变动进行实施调控，为电力系统安全稳定运行提供保障。文献[19]考虑新能源不确定性功率波动的物理边界，提出一种基于数据驱动分布鲁棒机会约束的灵活爬坡备用经济调度模型。文献[20]提出了一种基于爬坡容量校验的灵活爬坡辅助服务，以激励发电资源的灵活调节能力，但是，该方法通过“反复校验-添加约束”的方式提升了

系统的爬坡能力，增加了计算时间，降低了运行效率。文献[21]从系统成本、可靠性和环境影响等方面探究了系统引入灵活爬坡辅助服务市场的优势。文献[22]提出了一种电、热系统参与能源和灵活爬坡产品联合辅助服务市场的出清模型。文献[23]提出一种同时考虑实时发电容量和日前旋转备用服务的 FRP 联合供应机制。文献[24]设计了一款增强型 FRP，以提高系统的灵活性和可用资源的快速响应能力。文献[25]结合预测误差相关性与条件风险价值，提出一种综合能源系统灵活爬坡优化调度方法。

上述研究均考虑了机组运行在出力状态时的爬坡速率约束和爬坡能力约束，但未考虑机组在投入/退出过程中对系统灵活爬坡能力约束所产生的负面影响。实际上，机组在投入/退出运行时系统可提供的向上/向下爬坡能力与机组在出力状态时可提供的向上/向下爬坡能力并不相同，而且投入/退出的机组只具备单一方向上的爬坡能力，即该机组对系统向下/向上爬坡能力产生负作用。此外，上述文献虽然涉及到弃风惩罚或风电渗透率的影响分析，但未从风电预测误差、风电渗透率和弃风惩罚成本等不同角度综合分析灵活爬坡辅助服务对提升风电消纳能力、降低系统备用和总运营成本等方面的作用。表 1 给出了相关文献调研情况的对比。

针对上述问题，本文提出了一种计及改进灵活爬坡辅助服务和弃风惩罚的现货电能量市场出清模型，利用简单测试系统和改进 IEEE39 节点系统验证所提模型的有效性。本文的主要贡献如下：

1) 考虑到机组在投入/退出过程中的爬坡速率与出力运行时的爬坡速率有所区别，以及该机组在投入/退出过程对系统灵活爬坡能力产生的负影响，设计了改进型的灵活爬坡速率和爬坡能力约束，当净负荷发生波动时，下一运行时刻电力系统仍满足供需平衡，增强了系统运行的灵活性。

表 1 现有文献调研情况对比

Table 1 Comparison of existing literature research

类别	文献	灵活爬坡产品		影响分析		
		考虑机组出力时的爬坡能力	兼顾机组投入/退出时的爬坡能力及其负面影响	风电预测误差	风电渗透率	弃风惩罚
无灵活爬坡产品	[7]					✓
	[8]				✓	
灵活爬坡产品	[15]	✓				
	[20]	✓		✓		✓
	[21]	✓				
	[25]	✓			✓	
改进灵活爬坡产品	本文方法	✓	✓	✓	✓	✓

2) 将爬坡费用和弃风惩罚费用作为目标函数, 构建现货电能市场出清模型, 修正了系统原有备用容量。该模型可适应不同风电预测误差和风电渗透率下的系统灵活爬坡容量需求, 可在较低的弃风惩罚成本下具有较高的风电消纳能力。

## 1 改进的灵活爬坡辅助产品

风电的波动性和随机性, 使净负荷具有变化性和不确定性<sup>[26]</sup>, 尤其是高比例风电接入引起净负荷突升/突降的情况愈加频繁, 导致传统的现货电能市场出清模型无法满足系统对灵活性资源调节的需求, 因此本文在现有灵活爬坡产品的基础上, 考虑单台机组在投入/退出过程中的爬坡速率约束条件, 以及系统因净负荷波动需要满足的爬坡能力约束条件, 分别对“爬坡速率约束”和“爬坡能力约束”进行改进, 以增强系统运行的灵活性和经济性。

### 1.1 灵活爬坡速率约束

文献[14]的出清模型中考虑了各台机组在出力状态时的向上/向下爬坡速率约束, 但当机组处于投入或退出过程时, 传统爬坡速率约束并不合适, 原因是该机组在投入或退出过程中只能提供单一方向的爬坡速率约束, 即投入(启动)过程中只存在向上爬坡速率约束, 退出(停机)过程中只存在向下爬坡速率约束。因此, 本文以 15 min 为一个出清时段, 对传统爬坡速率约束进行改进, 得到单台机组向上和向下的灵活爬坡速率约束分别为

$$\begin{cases} P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq \Delta P_i^U & P_i^{\min} \leq P_{i,t} < P_{i,t+1} \\ P_{i,t+1} - P_{i,t} \leq \Delta P_i^{SU} & P_{i,t} < P_{i,t+1} \leq P_i^{\min} \end{cases} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t+1} \leq \Delta P_i^D & P_i^{\min} \leq P_{i,t+1} < P_{i,t} \\ P_{i,t} - P_{i,t+1} \leq \Delta P_i^{SD} & P_{i,t+1} < P_{i,t} \leq P_i^{\min} \end{cases} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (2)$$

式中: 下标  $i$  为第  $i$  台机组编号; 下标  $t$  和  $t+1$  为间隔 15 min 的两个相邻时刻;  $I$  和  $T$  分别为涉及的所有机组以及运行总时长的集合;  $P_{i,t}$  和  $P_{i,t+1}$  分别为机组  $i$  在  $t$  和  $t+1$  时刻的计划出力;  $\Delta P_i^U$  和  $\Delta P_i^D$  分别为机组  $i$  每 15 min 的向上和向下爬坡速率;  $\Delta P_i^{SU}$  和  $\Delta P_i^{SD}$  分别为机组  $i$  每 15 min 的启动和停机爬坡速率;  $P_i^{\min}$  为机组  $i$  最小运行出力。

式(1)表明, 若机组  $i$  在  $t$  和  $t+1$  时刻均处于出力状态(即出力均大于最小运行出力), 则向上爬坡时出力的变化量应不大于向上爬坡速率; 若机组  $i$  在  $t-t+1$  时段处于启动过程(即  $t+1$  时刻出力不大

于最小运行出力), 则向上爬坡时出力的变化量应不大于启动爬坡速率。

式(2)表明, 若机组  $i$  在  $t$  和  $t+1$  时刻均处于出力状态, 则向下爬坡时出力的变化量应不大于向下爬坡速率; 若机组  $i$  在  $t-t+1$  时段处于停机过程(即  $t$  时刻出力不大于最小运行出力), 则向下爬坡时出力的变化量应不大于停机爬坡速率。

### 1.2 系统灵活爬坡能力约束

除了单台机组在出力状态、投入或退出过程中要满足爬坡速率约束, 因净负荷具有变化性和不确定性, 系统还要满足灵活爬坡能力约束, 即系统要通过发电机组提前预留一定的向上和向下灵活爬坡容量, 以避免系统在下一运行时刻因爬坡能力不足而无法保证供需平衡。

本文提出的系统向上/向下灵活爬坡能力约束既考虑了机组在出力状态时可提供的向上/向下爬坡能力, 又兼顾了机组在投入/退出运行时可提供的向上/向下爬坡能力。图 1 为机组爬坡能力示意图。以机组向上爬坡为例, 当机组  $i$  在  $t$  时刻处于出力状态时, 若位于  $a1$  点, 则向上爬坡能力为  $P_i^{\max} - P_{i,t}$ ; 若位于  $a2$  点, 则向上爬坡能力为  $\Delta P_i^U$ 。当机组  $i$  处于启动过程时(即  $a3$  点), 则向上爬坡能力为  $\Delta P_i^{SU}$ 。于是, 机组  $i$  在  $t$  时刻可提供的向上和向下的爬坡能力表达式为

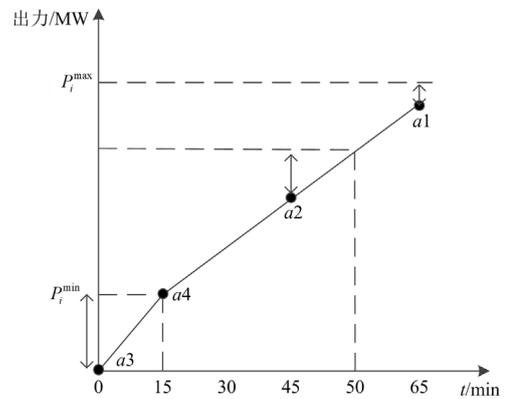


图 1 机组爬坡能力示意图

Fig. 1 Diagram of generator ramping capacity

$$\begin{cases} \Delta P_{i,t}^U = \min(P_i^{\max} - P_{i,t}, \Delta P_i^U) u_{i,t} + \Delta P_i^{SU} (1 - u_{i,t}) \\ \Delta P_{i,t}^D = \min(P_{i,t} - P_i^{\min}, \Delta P_i^D) u_{i,t} + \\ \Delta P_i^{SD} \frac{1 - \text{sgn}(P_{i,t} - P_i^{\min})}{2} \end{cases} \quad (3)$$

$\forall i \in I, t \in T$

式中:  $\Delta P_{i,t}^U$  和  $\Delta P_{i,t}^D$  分别为机组  $i$  在  $t$  时刻可提供的向上和向下的爬坡能力;  $P_i^{\max}$  为机组  $i$  最大运行出

力;  $u_{i,t}$  为机组  $i$  在  $t$  时刻是否大于最小运行出力, 其为 0-1 变量, 1 表示大于。

进一步地, 若机组  $i$  在下一时刻退出/投入运行, 此时则具备向下/向上单一方向的爬坡能力, 而失去向上/向下双向的爬坡能力, 给系统的向上/向下爬坡能力带来负面影响。例如, 机组  $i$  在  $t$  时刻处于最小运行出力(即图 1 中 a4 点),  $t+1$  时刻因日前计划调度退出运行, 若此时系统需要向上爬坡能力, 但该机组却失去了向上爬坡能力, 失去的向上爬坡能力大小为  $P_{i,t}^{\text{stop}} = (u_{i,t} - u_{i,t+1})\Delta P_i^U$ , 即相当于机组  $i$  在  $t+1$  时刻对系统向上爬坡能力产生了一个  $-P_{i,t}^{\text{stop}}$  的负面影响。如果该机组不退出运行, 则  $P_{i,t}^{\text{stop}} = 0$ 。同理, 若机组  $i$  在  $t$  时刻处于图 1 中 a4 点,  $t+1$  时刻投入运行, 若此时系统需要向下爬坡能力, 该机组却丢失了向下爬坡能力, 对系统向下爬坡能力产生负面影响。此时, 退出/投入的机组对系统向上/向下爬坡能力产生的负面影响可用式(4)表示。

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{stop}} = \max\{(u_{i,t} - u_{i,t+1})\Delta P_i^U, 0\} \\ P_{i,t}^{\text{start}} = \max\{(u_{i,t+1} - u_{i,t})\Delta P_i^D, 0\} \end{cases} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (4)$$

式中:  $P_{i,t}^{\text{stop}}$  为机组  $i$  在  $t+1$  时刻退出对向上爬坡能力产生的负面影响;  $P_{i,t}^{\text{start}}$  为机组  $i$  在  $t+1$  时刻投入对向下爬坡能力产生的负面影响;  $u_{i,t+1}$  为机组  $i$  在  $t+1$  时刻是否大于最小运行出力。

结合式(3)和式(4)得到系统可提供的综合向上/向下爬坡能力, 其应不小于系统向上/向下爬坡的容量需求, 系统灵活爬坡能力约束如式(5)所示。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (\Delta P_{i,t}^U - P_{i,t}^{\text{stop}}) \geq \Delta P_{\text{sum},t}^U \\ \sum_{i=1}^N (\Delta P_{i,t}^D - P_{i,t}^{\text{start}}) \geq \Delta P_{\text{sum},t}^D \end{cases} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

式中:  $N$  为机组总台数;  $\Delta P_{\text{sum},t}^U$  和  $\Delta P_{\text{sum},t}^D$  分别为系统在  $t$  时刻的向上和向下灵活爬坡容量需求, 它包含变化性和不确定性两部分, 前者为前后 2 个时刻预测净负荷之差, 体现净负荷的变化性, 后者则是因风电预测偏差而引起的净负荷不确定性, 即

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{sum},t}^U = \max\{((P_{t+1}^L - P_{t+1}^{\text{WF}}) - (P_t^L - P_t^{\text{WF}})) + \alpha_{t+1}, 0\} \\ \Delta P_{\text{sum},t}^D = \max\{((P_t^L - P_t^{\text{WF}}) - (P_{t+1}^L - P_{t+1}^{\text{WF}})) + \alpha_{t+1}, 0\} \end{cases} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

式中:  $P_{t+1}^L$  和  $P_t^L$  分别为  $t+1$  和  $t$  时刻总负荷的预测值;  $P_{t+1}^{\text{WF}}$  和  $P_t^{\text{WF}}$  分别为所有风电场在  $t+1$  和  $t$  时刻的预测出力;  $\alpha_{t+1}$  为  $t+1$  时刻风电预测功率偏差,

取  $\alpha_{t+1} = \beta_w P_{t+1}^{\text{WF}}$ ,  $\beta_w$  为风电功率预测误差最大值。

## 2 计及爬坡费用和弃风惩罚费用的目标函数

本文提出的现货电能量出清模型采用 15 min 为时间间隔进行出清, 在考虑改进的灵活爬坡辅助产品之后, 以发电计划和机组状态为决策变量, 以购买电能(包括火力发电费用、空载费用、启动费用、停机费用、正/负备用费用和风电场发电费用等组成)和灵活爬坡辅助服务的总费用最小为目标, 同时还加入弃风惩罚费用以实现高比例风电的并网消纳, 得到新的目标函数  $f_1$  表达式为

$$\begin{aligned} \min f_1 = & \sum_{t=1}^K \sum_{i=1}^N [0.25 C_{i,t} (P_{i,t} - u_{i,t} P_i^{\text{min}}) + C_{i,t}^{\text{NL}} u_{i,t} + \\ & C_{i,t}^{\text{SU}} v_{i,t} + C_{i,t}^{\text{SD}} w_{i,t}] + \sum_{t=1}^K 0.25 [C_t^{\text{pr}} P_t^{\text{pr}} + C_t^{\text{nr}} P_t^{\text{nr}}] + \\ & \sum_{t=1}^K \sum_{m=1}^M (0.25 C_m^{\text{W}} P_{m,t}^{\text{W}}) + \sum_{t=1}^K \sum_{m=1}^M [\lambda_m (P_{m,t}^{\text{WF}} - P_{m,t}^{\text{W}})] + \\ & \sum_{t=1}^K \left[ C_t^{\text{ra}} \sum_{i=1}^N (\Delta \hat{P}_{i,t}^U + \Delta \hat{P}_{i,t}^D) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $K$  为出清时段总数;  $M$  为风电场个数;  $C_{i,t}$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的发电成本报价;  $C_{i,t}^{\text{SU}}$  和  $C_{i,t}^{\text{SD}}$  分别为机组  $i$  在  $t$  时刻的启动和停机成本报价;  $C_{i,t}^{\text{NL}}$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的空载成本报价;  $v_{i,t}$  为机组  $i$  在  $t$  时刻是否处于启动过程;  $w_{i,t}$  为机组  $i$  在  $t$  时刻是否处于停机过程;  $C_t^{\text{pr}}$  和  $C_t^{\text{nr}}$  分别为系统在  $t$  时刻正/负备用成本报价;  $P_t^{\text{pr}}$  和  $P_t^{\text{nr}}$  分别为系统在  $t$  时刻正/负备用需求;  $C_t^{\text{ra}}$  为  $t$  时刻爬坡容量价格上限;  $C_m^{\text{W}}$  为风电场  $m$  在  $t$  时刻日前市场发电成本报价;  $\lambda_m$  为风电场  $m$  的弃风惩罚成本;  $P_{m,t}^{\text{WF}}$  和  $P_{m,t}^{\text{W}}$  分别为风电场  $m$  在  $t$  时刻日前市场预测出力和计划出力;  $\Delta \hat{P}_{i,t}^U$  和  $\Delta \hat{P}_{i,t}^D$  分别为机组  $i$  在  $t$  时刻的实际向上和向下爬坡计划。

通过引入改进的灵活爬坡辅助产品, 可以减少机组给净负荷不确定性所预留的备用容量, 从而使系统原有备用容量有所降低, 正/负备用需求的表达式为

$$\begin{cases} P_t^{\text{pr}} = \max \left( \beta_a \sum_{m=1}^M P_{m,t}^{\text{W}} + \beta_c \sum_{i=1}^N P_{i,t} - \sum_{i=1}^N (\Delta P_{i,t}^U - P_{i,t}^{\text{stop}}), 0 \right) \\ P_t^{\text{nr}} = \max \left( \beta_a \sum_{m=1}^M P_{m,t}^{\text{W}} - \sum_{i=1}^N (\Delta P_{i,t}^D - P_{i,t}^{\text{start}}), 0 \right) \end{cases} \quad \forall t \in T \quad (8)$$

式中:  $\beta_a$  为风电场的发电备用系数(取现阶段风电功率预测误差最大值);  $\beta_c$  为火电机组的发电备用系数(取现阶段负荷预测误差最大值)。

本文重点阐述了对灵活爬坡产品和出清目标函数的改进, 其余有关出清模型中还需要满足的约束条件包括系统负荷平衡约束、机组出力约束、启停状态约束、最小连续启停过程持续时间约束、风机出力约束等, 可详见文献[14]。综上, 结合式(1)~式(8)以及常规约束条件, 得到本文提出的计及改进灵活爬坡辅助服务和弃风惩罚的现货电能市场出清模型, 该模型属于非线性混合整数规划问题, 可以采用 CPLEX、GUROBI、CMIP 等高性能求解器进行求解。

### 3 算例分析

为了验证本文所提模型的有效性, 设置了 3 种模型, 并分别在简单测试系统和改进的 IEEE39 节点系统中进行对比分析。

模型 1: 无灵活爬坡产品的现货电能市场出清模型。

模型 2: 考虑灵活爬坡产品的现货电能市场出清模型。

模型 3: 考虑改进灵活爬坡辅助产品和目标函数的现货电能市场出清模型, 此为本文所提方法。

本文算例中, 线损率取 3.69%, 火电机组的发电备用系数  $\beta_c = 0.05$ , 风电场的发电备用系数  $\beta_a = 0.2$  (即风电预测误差最大值  $\beta_w$  为 20%)。各项成本报价数据<sup>[20,27]</sup>见表 2。本文通过 Intel Core i5-11400 和 16 GB 内存的 PC 平台运行 Yalmip 优化软件包计算得到仿真结果。

表 2 各项成本报价数据表

Table 2 Various cost data

名称	数值
风力发电成本	350
弃风惩罚成本	200
正备用成本	200
负备用成本	110
爬坡容量价格上限	100

#### 3.1 简单测试系统

简单测试系统含 4 台火电机组和 1 台风电机组, 其中机组 1 为恒定输出的发电机, 不计其各项成本及开关机过程, 其他机组均为快速启动机组; 风电机组额定功率为 100 MW。表 3 为各火电机组数据表。表 4 为某日前 11:00—14:00 之间 12 个出

清时刻的风力发电预测数据和负荷预测数据, 其中风电渗透率约为 10%。假设初始状态 4 台机组均在运行(即  $u_{i,0} = 1, i = 1, 2, 3, 4$ ; 下标 0 表示初始时刻), 风机发电初始值为 40 MW。

表 3 简单测试系统火电机组数据

Table 3 Generator data of simple test system

名称	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4
发电成本/(元/MWh)	0	140	280	420
空载成本/元	0	7000	14 000	28 000
开机成本/元	0	2100	4200	6300
关机成本/元	0	700	1400	2100
最大出力/MW	300	200	150	200
最小出力/MW	300	50	50	50
启动爬坡率/(MW/15 min)	0	50	50	50
停机爬坡率/(MW/15 min)	0	50	50	50
向上爬坡率/(MW/15 min)	0	45	45	45
向下爬坡率/(MW/15 min)	0	45	45	45
最小启动持续时间/h	1	1	1	1
最小停机持续时间/h	1	1	1	1
初始值/MW	300	50	50	150

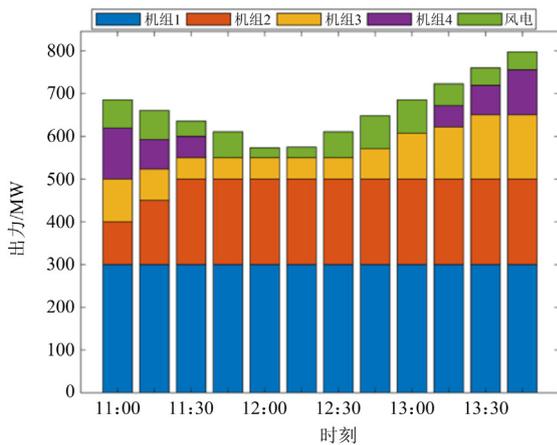
表 4 风电预测数据和负荷预测数据

Table 4 Forecasting data of wind power and load

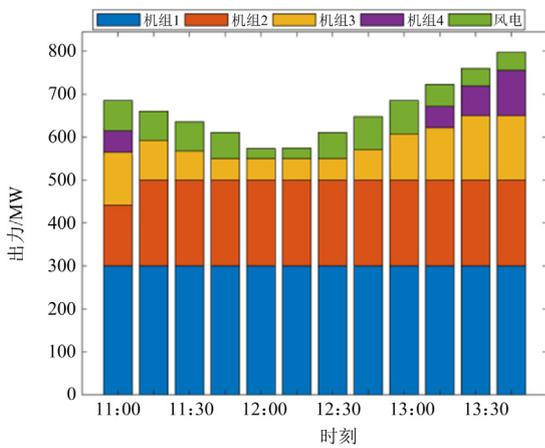
时刻	风电功率	负荷功率	风电预测误差量
11:00	66	660	13.2
11:15	68	636	13.6
11:30	68	612	13.6
11:45	66	588	13.2
12:00	68	552	13.6
12:15	69	553	13.8
12:30	75	588	15.0
12:45	77	624	15.4
13:00	78	660	15.6
13:15	51	696	10.2
13:30	41	732	8.2
13:45	42	768	8.4

图 2 给出了 3 种模型下各机组计划出力堆积图, 可以很清楚地看出各机组出力的变化情况。由图 2 可知, 前 3 个出清时刻, 模型 1 中机组 2—4 均处于爬坡状态, 模型 2 中机组 3 处于爬坡状态、机组 2 和 4 在后两个时刻处于满发和停机, 而模型 3 中只有机组 3 始终处于爬坡状态、机组 2 始终满发、机组 4 始终停机。与模型 1 和模型 2 相比, 模型 3 中采用改进的灵活爬坡辅助产品和目标函数后, 降低了爬坡费用和空载费用。

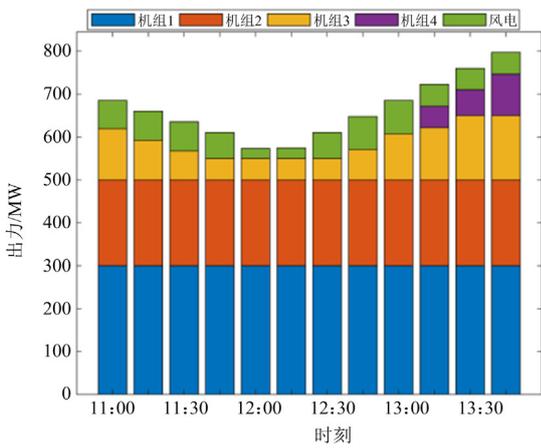
为了更加突出本文所提模型的优势, 表 5 给出了 3 种模型下总费用和各项费用的对比结果。由表 5 可知, 与模型 1 相比, 模型 2 的空载费用、备用



(a) 模型1



(b) 模型2



(c) 模型3

图 2 3 种模型下各台机组出清结果

Fig. 2 Clearing results of generators under three models

费用、爬坡费用和弃风惩罚费用分别降低了 6.88%、24.31%、2.99%和 22.89%，总费用降低了 2.89%，但由于风电消纳的增加使得风电费用增加了 3.18%；

相比模型 2 而言，模型 3 的空载费用、备用费用、爬坡费用和弃风惩罚费用分别降低了 10.51%、100%、12.40%和 0.91%，风电费用增加了 2.03%，总费用继续下降了约 5.70%，既缩减了总运营成本，又进一步促进了可再生能源的消纳。同时，由于备用容量的大幅度降低，使得电厂建设的一次投资成本也有所降低。

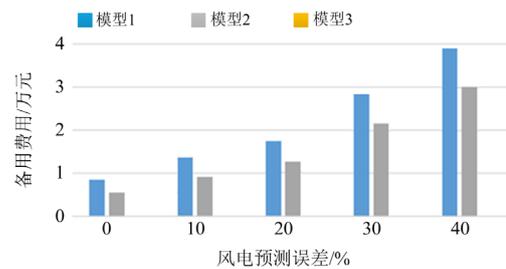
表 5 简单测试系统的经济性对比

Table 5 Comparison of economy under simple test system

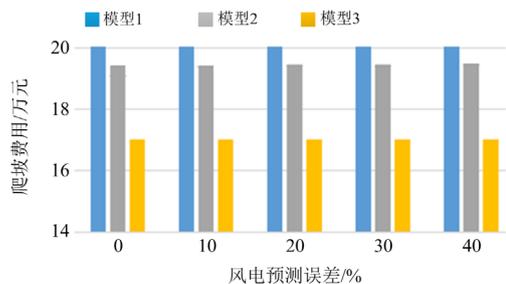
万元			
费用类型	模型 1	模型 2	模型 3
总费用	127.1	123.43	116.4
火电费用	41.79	41.75	41.73
空载费用	37.8	35.2	31.5
开关机费用	0.84	0.84	0.84
备用费用	1.81	1.37	0
爬坡费用	20.03	19.43	17.02
风电费用	21.95	22.65	23.11
弃风惩罚费用	2.84	2.19	2.17

为了进一步证明本文所提模型的效果，图 3 展示了不同风电预测误差下 3 种模型的备用费用、爬坡费用和总费用。

由图 3(a)可知，模型 1 和模型 2 的备用费用基本随风电预测误差线性增加，而模型 3 的备用费用为 0，不随风电预测误差变化。由图 3(b)可知，各模型的爬坡费用均基本不变，但模型 1 和模型 2 的爬坡费用明显高于模型 3。由图 3(c)可知，模型 1 的总费用随风电预测误差线性增加，模型 2 和模型 3 的总费用几乎不随风电预测误差变化。



(a) 备用费用



(b) 爬坡费用

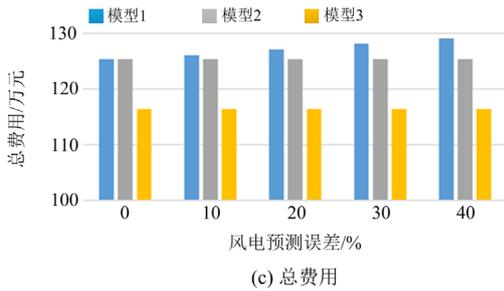


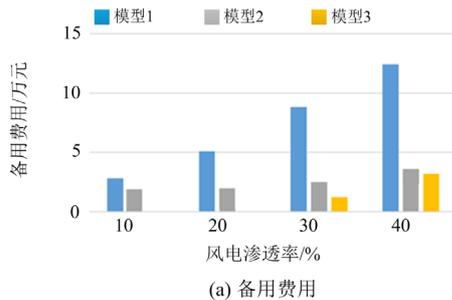
图3 不同风电预测误差下3种模型的对比

Fig. 3 Comparison of three models under different wind power forecasting errors

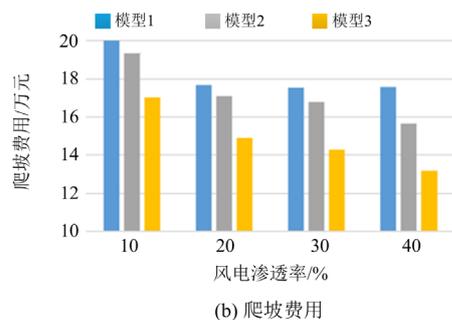
由图3可得: 本文所提出清模型可在不同风电预测误差下, 大幅降低因风电不确定性而预留的备用容量, 从而降低系统总运营成本。由此说明本文所提模型能够有效应对风电不确定性带来的波动影响。

为了进一步探究本文所提模型对风电并网的消纳能力, 图4给出了不同风电渗透率下3种模型的备用费用、爬坡费用和总费用对比结果, 图5给出了不同弃风惩罚费成本下3种模型的风电消纳率、弃风惩罚费用和总费用对比结果, 此处取风电预测误差为30%。

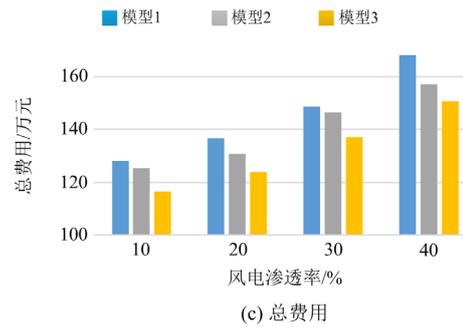
由图4(a)可知, 模型1的备用费用随风电渗透率增加而呈线性增长, 而模型2和模型3在风电渗透率较低( $\leq 20\%$ )时, 备用费用基本维持不变, 当风电渗透率较高( $\geq 30\%$ )时, 备用费用才开始增加, 并随风电渗透率呈线性增长, 但模型3仍小于模型2。



(a) 备用费用



(b) 爬坡费用



(c) 总费用

图4 不同风电渗透率下3种模型的对比

Fig. 4 Comparison of three models under different wind power penetration ratios

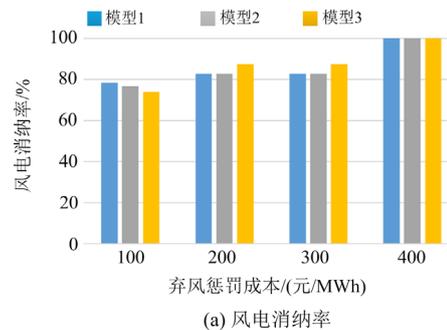
由图4(b)可知, 随着风电渗透率的增加, 风电消纳能力提升, 使得机组爬坡费用均有所降低, 且本文提出的模型3降低最多。

由图4(c)可知, 随着风电渗透率的增加, 3种模型的总费用均呈现线性增长, 其中模型1增长的最多, 模型3增长的最少, 但模型3的总费用始终是最底的。此外, 相比模型1, 在不同风电渗透率下, 模型3的总费用均降低7%~8%。

由图4可得: 本文所提出清模型可在不同风电渗透率下, 借助灵活爬坡辅助服务提升风电消纳能力, 有效降低备用费用和爬坡费用, 从而降低系统的总运营成本。

由图5(a)可知, 随着弃风惩罚成本的增加, 3种模型的风电消纳率呈增长趋势; 当弃风惩罚成本较低( $< 400$ 元)时, 3种模型的风电消纳率均在80%左右, 但模型3的弃风量最少, 风电消纳率最多; 当弃风惩罚成本较高( $\geq 400$ 元)时, 所有模型的风电消纳率均达到100%。

由图5(b)可知, 当弃风惩罚成本较低( $< 400$ 元)时, 所有模型的弃风惩罚费用随弃风惩罚成本的增加而增大, 但模型3的增幅最小; 当弃风惩罚成本较高( $\geq 400$ 元)时, 由于所有模型的风电全部消纳, 因此弃风惩罚费用均为0。



(a) 风电消纳率

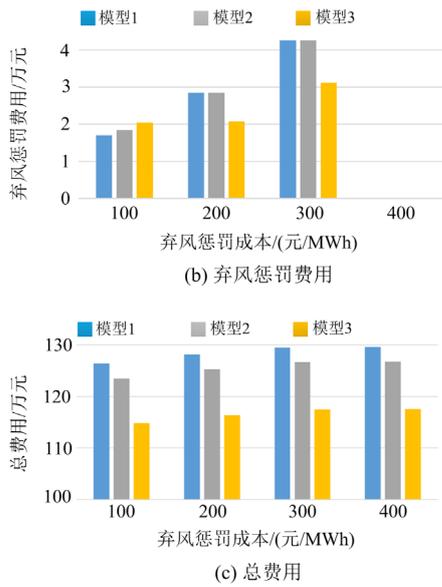


图 5 不同弃风惩罚成本下 3 种模型的对比

Fig. 5 Comparison of three models under different wind curtailment penalty cost

由图 5(c)可知,随着弃风惩罚成本的增加,3 种模型的总费用略微增加,但是模型 3 的总费用明显低于模型 1 和模型 2。

由图 5 可得:本文所提出清模型可在一定范围的弃风惩罚成本下,提升风电消纳能力,有效降低系统总运营成本。

### 3.2 改进 IEEE39 节点系统

为进一步验证本文所提出清模型适应于高比例风电参与下的复杂系统,采用改进 IEEE39 节点算例,对比无灵活爬坡产品的现货电能量市场出清模型(模型 1)和考虑改进灵活爬坡辅助产品和目标函数的现货电能量市场出清模型(模型 3)在不同条件下的经济性。

系统拓扑如图 6 所示,它含 10 台火电机组(G1—G10)和 1 个风电场 W。其中, G1 为恒定输出的发电机, G2 和 G3 具有慢启动特性(即启/停机爬坡率低于上/下爬坡率);风电场 W 接入节点 30,装机容量为 550 MW,风电渗透率约为 20%。弃风惩罚费成本取 200 元/MWh,  $\alpha_{t+1}$  取 25%预测误差下的风电功率预测值。图 7 为日前 24 h(96 个时刻)风电和负荷的预测功率曲线。假设初始状态下风电场出力的初始值为 280.04 MW。

图 8 给出了改进 IEEE39 系统在两种模型下日前 24 h(96 个时刻)各台机组的出清结果。由图 8 可知,模型 3 中各台机组发电计划的阶梯型指令更接近实际,提高了系统运行的灵活性。

表 6 给出了两种模型下总费用和各项费用的

对比结果。由表 6 可知,对于含有 10 台火电机组且风电渗透率约 20%的改进 IEEE39 节点系统,本文所提出清模型的备用费用在模型 1 的基础上大幅削减,削减率超过 99%,弃风惩罚费用也降低了 42.6%,使系统总费用降低约 10.3%。

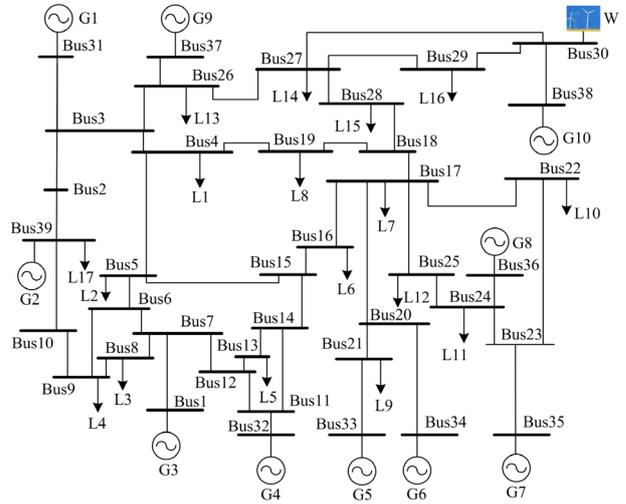


图 6 接入风电场的 IEEE39 系统图

Fig. 6 Diagram of IEEE39 system integrated into wind farm

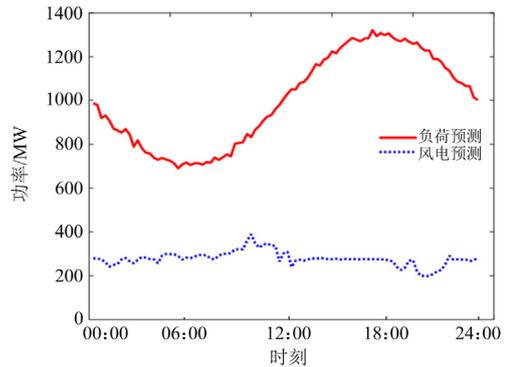
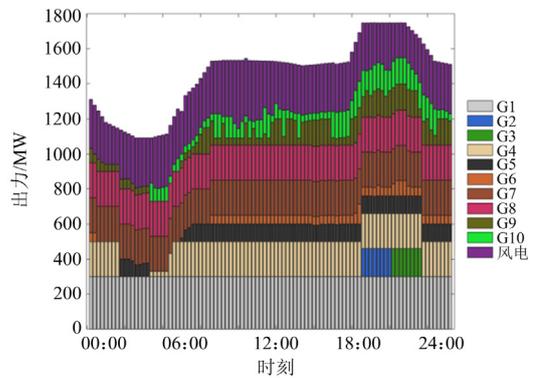


图 7 日前 24 h 风电和负荷的功率预测曲线

Fig. 7 Day-ahead 24 h power prediction curves of wind power and load



(a) 模型 1

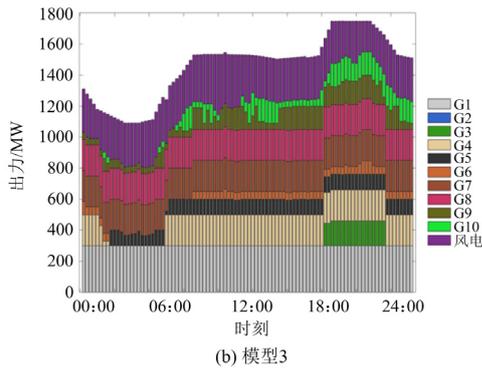


图 8 两种模型下日前 24 h 各机组出清结果

Fig. 8 Day-ahead 24 h clearing results of generators under two models

表 6 IEEE39 节点系统的经济性对比结果

Table 6 Comparison of economy under IEEE39 system

费用类型	万元	
	模型 1	模型 3
总费用	3202.2	2872.5
火电费用	1155.4	1155.6
空载费用	61.9	61.3
开关机费用	1.27	3.1
备用费用	342.3	0.8
爬坡费用	709.4	699.3
风电费用	926.6	949.3
弃风惩罚费用	5.4	3.1

表 7 给出了不同风电预测误差下两种模型的经济性对比结果。由表 7 可知, 随着风电预测误差的增加, 模型 1 的总费用和备用费用基本呈现线性增长趋势, 而本文所提模型能有效应对风电不确定性所带来的波动影响, 总费用基本保持不变, 备用费用大幅降低; 相比于模型 1, 模型 3 的总费用降低了 5%~10%。

表 7 不同风电预测误差下系统经济性的对比

Table 7 Comparison of system economy under different

风电预测 误差/%	wind power prediction errors			
	总费用/万元		备用费用/万元	
	模型 1	模型 3	模型 1	模型 3
5	3029.7	2864.6	176.5	1.2
10	3073.7	2874.7	217.9	2.5
15	3116	2877	259.4	1.8
20	3160.2	2878	300.9	2.1
25	3202.2	2872.5	342.3	0.8

表 8 和表 9 分别给出了不同风电渗透率和弃风惩罚成本下两种模型的经济性对比结果, 表中结果均在风电预测误差 25% 下得到。

表 8 不同风电渗透率下系统经济性的对比

Table 8 Comparison of system economy under different wind power penetration ratios

风电渗透率/%	总费用/万元		备用费用/万元	
	模型 1	模型 3	模型 1	模型 3
10	3006.7	2790.2	238.7	0.36
20	3202.2	2872.5	342.3	0.8
30	3414.7	3000.1	445.9	11.3
40	3655	3150.1	544.4	21.13

表 9 不同弃风惩罚成本下系统经济性的对比

Table 9 Comparison of system economy under different wind curtailment penalty cost

弃风惩罚成本/ (元/MWh)	总费用/万元		弃风惩罚费用/万元	
	模型 1	模型 3	模型 1	模型 3
100	3191.7	2869.6	2.9	2.4
200	3202.2	2872.5	4.4	3.1
300	3202.8	2874.8	6.7	3.8
400	3202.8	2874.8	0	0

由表 8 可知, 随着风电渗透率的增加, 两种模型的总费用均呈增长趋势, 但相比模型 1, 模型 3 的总费用增长速度缓慢; 同时, 模型 1 的备用费用呈线性增长趋势, 而模型 3 在风电渗透率较低( $< 30%$ )时, 备用费用几乎很小, 当风电渗透率较高( $\geq 30%$ )时, 备用费用才略微增加, 其值远低于模型 1。

由表 9 可知, 两种模型的总费用随弃风惩罚成本的增加略微增大, 而当弃风惩罚成本较高( $\geq 400$  元)时, 总费用几乎不变, 且模型 3 的总费用均低于模型 1。当弃风惩罚成本较低( $< 400$  元)时, 两种模型的弃风惩罚费用均随其成本增加而增大, 但模型 3 均低于模型 1; 而当弃风惩罚成本较高( $\geq 400$  元)时, 两种模型的风电全部消纳, 弃风惩罚费用均为 0。

## 4 结论

本文综合考虑单台机组在出力状态、启停过程中需要满足的爬坡速率约束以及系统因净负荷波动需要满足的爬坡能力约束, 提出了计及改进灵活爬坡辅助产品和弃风惩罚的现货电能量市场出清模型, 通过简单测试系统和改进 IEEE39 节点系统进行仿真验证, 结果表明:

1) 与无灵活爬坡产品和现有灵活爬坡产品的出清模型相比, 改进灵活爬坡辅助产品较好地解决了风电不确定性引起的系统爬坡能力不足、高比例风电接入时系统总运营成本偏高等问题, 实现了各机组出力的最优经济分配, 提高了系统运行的灵活

性和经济性。

2) 提出的新模型适应于不同风电预测误差和风电渗透率下的系统灵活爬坡容量需求。随着风电预测误差的增加,新模型的总费用和备用费用几乎不受其影响,二者均低于其他模型。随着风电渗透率的增加,新模型的总费用和备用费用呈增加趋势,但仍低于其他模型。

3) 提出的新模型在目标函数中引入了弃风惩罚,结合改进型的灵活爬坡辅助产品使弃风惩罚费用和系统总费用得以降低,可在较低的弃风惩罚成本下具有较高的风电消纳能力。

### 参考文献

- [1] NEEVATIKA V, NARENDRA K, SAKET G, et al. Review of sub-synchronous interaction in wind integrated power systems: classification, challenges, and mitigation techniques[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 277-302.
- [2] 臧延雪, 边晓燕, 梁思琪, 等. 计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(11): 15-26.  
ZANG Yanxue, BIAN Xiaoyan, LIANG Siqi, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatching method of a renewable energy power system considering line transmission capacity[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(11): 15-26.
- [3] HE Q, LIN Z, CHEN H, et al. Bi-level optimization based two-stage market clearing model considering guaranteed accommodation of renewable energy generation[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(3): 433-445.
- [4] 李德鑫, 郑涛岳, 姜齐荣, 等. 计及消纳惩罚的日前市场优化出清方法[J]. *电力建设*, 2023, 44(4): 29-36.  
LI Dexin, ZHENG Taoyue, JIANG Qirong, et al. Day-ahead optimized market clearing method considering renewable energy absorption[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(4): 29-36.
- [5] 任景, 高敏, 程松, 等. 面向新能源不确定性的西北电力电量平衡机制[J]. *中国电力*, 2023, 56(9): 66-78.  
REN Jing, GAO Min, CHENG Song, et al. A balance method for power supply-demand adapting to high uncertainties of renewable energy in northwest power grid[J]. *Electric Power*, 2023, 56(9): 66-78.
- [6] 阳婷婷, 李晓刚, 邹斌, 等. 促进灵活性资源的辅助服务市场分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(7): 73-83.  
YANG Tingting, LI Xiaogang, ZOU Bin, et al. Market analysis of an ancillary service to promote flexible resources[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(7): 73-83.
- [7] 任曦骏, 叶钰童, 邵筱宇, 等. 电力市场环境灵活爬坡产品实施路径研究[J]. *供用电*, 2021, 38(9): 42-48, 55.  
REN Xijun, YE Yutong, SHAO Xiaoyu, et al. Research on implementation paths of flexible climbing products in electricity market[J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(9): 42-48, 55.
- [8] 张学军, 景江帆. 含风电的日前电力市场出清优化模型[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(8): 77-82.  
ZHANG Xuejun, JING Jiangfan. Optimization model of day-ahead power market clearing including wind power[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(8): 77-82.
- [9] 崔杨, 徐扬, 刘新元, 等. 碳交易耦合下现货电能量市场日前出清方法[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-14[2023-11-17]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20231115.173.011>.  
CUI Yang, XU Yang, LIU Xinyuan, et al. Day-ahead clearing method of spot electricity energy market under carbon trading coupling[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-14[2023-11-17]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.tm.20231115.1731.011>.
- [10] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 电力市场环境考虑风电调度和调频极限的储能优化控制[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(9): 1791-1804.  
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Optimal control strategy for energy storage considering wind farm scheduling plan and modulation frequency limitation under electricity market environment[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(9): 1791-1804.
- [11] 李国庆, 闫克非, 范高锋, 等. 储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的交易决策研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(17): 45-54.  
LI Guoqing, YAN Kefei, FAN Gaofeng, et al. Transaction decision-making of energy storage stations participating in the spot energy and frequency modulation ancillary service market[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(17): 45-54.
- [12] 贾文杰, 唐早, 曾平良, 等. 基于鲁棒模型预测控制的风火储联合系统调频优化策略[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(12): 27-35.  
JIA Wenjie, TANG Zao, ZENG Pingliang, et al. Frequency regulation optimization strategy for wind-thermal-storage joint system based on robust model predictive control[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12): 27-35.
- [13] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 等. 考虑深度调峰的电力日前市场机制设计[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(4): 9-15, 78.  
LI Jialong, CHEN Yugo, LIU Sijie, et al. Mechanism design of day-ahead market considering deep peak regulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(4): 9-15, 78.

- [14] 丁强, 任远, 胡晓静, 等. 山西电力现货与深度调峰市场联合优化机制设计与实践[J]. 电网技术, 2021, 45(6): 2219-2227.  
DING Qiang, REN Yuan, HU Xiaojing, et al. Design and practice of joint optimization mechanism for spot market and deep peak shaving regulation market of Shanxi in China[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2219-2227.
- [15] 刘鑫, 王康平, 郭相阳, 等. 计及深度调峰与一次调频的风火负荷优化分配[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 1-9.  
LIU Xin, WANG Kangping, GUO Xiangyang, et al. Load optimal distribution of wind power and thermal power considering deep peak regulation and primary frequency modulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 1-9.
- [16] ZHANG Zhong, LI Furong, PARK S, et al. Local energy and planned ramping product joint market based on a distributed optimization method[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(6): 1357-1368.
- [17] WANG Qin, HODGE B. Enhancing power system operational flexibility with flexible ramping products: a review[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(4): 1652-1664.
- [18] ZHANG Haobo, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid: control strategy, stability, application, and challenges[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(6): 1239-1256.
- [19] 王浩元, 别朝红. 考虑不确定性物理边界的灵活爬坡备用分布鲁棒经济调度[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 59-68.  
WANG Haoyuan, BIE Zhaohong. Distributionally robust economic dispatch of flexible ramping reserve considering physical boundaries of uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 59-68.
- [20] 陈青, 吴明兴, 刘英琪, 等. 面向风电市场化消纳的现货电能辅助服务联合运营机制[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 179-188.  
CHEN Qing, WU Mingxing, LIU Yingqi, et al. Joint operation mechanism of spot electric energy and auxiliary service for wind power market-oriented accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 179-188.
- [21] CORNELIUS A, BANDYOPADHYAY R, PATIÑO D. Assessing environmental, economic, and reliability impacts of flexible ramp products in MISO's electricity market[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(2): 2291-2298.
- [22] MIRZAEI M A, NAZARI M, MOHAMMADI B, et al. Network-constrained joint energy and flexible ramping reserve market clearing of power and heat based energy systems: a two stage hybrid IGDT-stochastic framework [J]. IEEE Systems Journal, 2021, 15(2): 1547-1556.
- [23] KHOSHJAHAN M, DEHGHANIAN P, MOEINI M, et al. Harnessing ramp capability of spinning reserve services for enhanced power grid flexibility[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 7103-7112.
- [24] GHALJEHEI M, KHORSAND M. Day ahead operational scheduling with enhanced flexible ramping product: design and analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 1842-1856.
- [25] 黄悦华, 刘兴韬, 张磊, 等. 基于 C 藤 Copula 及条件风险价值的综合能源系统灵活爬坡优化调度[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-13[2023-11-17]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230820>.  
HUANG Yuehua, LIU Xingtiao, ZHANG Lei, et al. Flexible ramping optimal scheduling of integrated energy system based on C-vine copula and conditional value at risk[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-13[2023-11-17]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230820>.
- [26] 赵越, 蔡秋娜, 王龙, 等. 考虑不同需求弹性的爬坡辅助服务市场出清模型[J/OL]. 电力系统自动化: 1-15[2023-10-11]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1180.TP.20230711.1714.003.html>.  
ZHAO Yue, CAI Qiuna, WANG Long, et al. Clearing model for ramping auxiliary service market considering different demand elasticity[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-15[2023-10-11]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1180.TP.20230711.1714.003.html>.
- [27] 袁桂丽, 刘培德, 贾新潮, 等. 计及绿色电力证书制度的经济性优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(4): 139-146.  
YUAN Guili, LIU Peide, JIA Xinchao, et al. Economic optimal scheduling considering tradable green certificate system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(4): 139-146.

收稿日期: 2023-08-08; 修回日期: 2023-12-28

作者简介:

胡晓静(1991—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力市场与优化调度; E-mail: huxiaojing@epri.sgcc.com.cn

李慧(1976—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统优化调度与运行、柔性直流输电稳定与控制、新能源发电技术; E-mail: lhbxy@bistu.edu.cn

崔晖(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力市场、经济优化调度与电力系统自动化。E-mail: cuih@epri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)