

考虑虚拟电厂参与的深度调峰市场机制与出清模型

赵晋泉^{1*}, 杨余华¹, 孙中昊¹, 叶洪波², 凌晓波², 王啸天²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省 南京市 210098; 2. 国网上海电力有限公司, 上海市 浦东新区 200137)

Deep Peak Regulation Market Mechanism and Clearing Model Considering Participation of Virtual Power Plants

ZHAO Jinquan^{1*}, YANG Yuhua¹, SUN Zhonghao¹, YE Hongbo², LING Xiaobo², WANG Xiaotian²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Co., Ltd., Pudong New District, Shanghai 200137, China)

Abstract: Renewable energy sources such as wind power and photovoltaics connected to the grid on a large scale have increased the peak regulation pressure of the power grid. Therefore, the power grid needs to consider the use of demand-side resources for peak regulation. This study designs a peak regulation ancillary service market mechanism considering the participation of virtual power plants (VPPs) from three aspects: transaction organization, transaction process, and transaction settlement. Further, it proposes that thermal power units and VPPs equally participate in the bidding of the deep peak regulation market. A day-ahead clearing model and a real-time clearing model of the peak regulation market are presented. They adopt paying as the bid mode. The thermal power unit and VPPs can gain profits according to the actual peak regulation capacity and the bid prices. Finally, a case analysis and numerical results show the effectiveness of the proposed market mechanism and the clearing model.

Keywords: virtual power plant; equal bidding; deep peak regulation; market mechanism; clearing model

摘要: 风电光伏等可再生能源大规模并网, 增大了电网调峰压力, 需要发掘需求侧资源参与调峰。从交易组织、交易流程、交易结算3个方面设计了考虑虚拟电厂参与的调峰辅助服务市场机制, 使虚拟电厂与火电机组同台平等参与深度调峰市场竞价, 并分别给出了深度调峰市场日前出清和实时出清模型。交易采用按报价出清的方式, 火电机组和虚拟电

厂根据实际调用的调峰容量和申报价格获得收益。最后通过算例分析验证了所提市场机制和模型的有效性。

关键词: 虚拟电厂; 同台平等竞价; 深度调峰; 市场机制; 出清模型

0 引言

近年来, 风电光伏等可再生能源大规模并网, 压缩了火电机组的发电空间, 再加上其间歇性和波动性的特点, 增大了电网的调峰压力^[1-4]。当前为满足可再生能源优先消纳要求, 电网对深度调峰有巨大需求, 在水电和燃气发电占比低的电网, 已有的火电机组深度调峰不能完全满足需求。此外, 火电机组低功率运行提供深度调峰辅助服务的成本很高。为缓解调峰压力, 并降低调峰成本, 应充分发掘需求侧资源参与调峰。虚拟电厂可以整合、调度需求侧的调峰资源, 以类似于传统电厂的形式参与调峰市场^[5-6], 其具备了参与深度调峰的下调功率的技术条件。因此, 在当前火电机组多阶段调峰机制电力市场阶段, 应同时充分发掘需求侧响应以及虚拟电厂参与深度调峰的潜力。针对水电和燃气发电占比低的电网, 在现货市场机制下为满足虚拟电厂参与深度调峰市场, 本文初步研究了虚拟电厂参与深度调峰的市场机制与出清模型。

目前对虚拟电厂的研究大多集中在虚拟电厂参与电能量市场竞价策略与模型^[7-8], 以及虚拟电厂内部运营与收益分析方面^[9], 关于其参与调峰方面的研究也主要是基于成本分析的调峰模型^[10-11], 虚拟电厂参与深度调峰的市场机制与出清模型研究较少。华东能监

基金项目: 国家电网公司总部科技项目 (虚拟电厂参与电力现货市场关键技术研究)。

Science and Technology Foundation of SGCC (Research on Key Technologies of Electric Spot Market Considering Participation of Virtual Power Plant).

局下发的《上海电力调峰辅助服务市场运营规则（试行）》^[12]，明确规定了虚拟电厂可以参与调峰市场，虚拟电厂提供的调峰辅助服务和火电提供的深度调峰不是同一个交易品种，2个调峰市场是分开单独开展的，但是这样无法保证调峰整体费用的最小化。文献[13]研究了上海虚拟电厂参与调峰的出清机制，给出了出清流程，但是并没有建立相应的数学模型。本文采用在同一个市场中虚拟电厂和火电机组平等参与竞价的方式设计市场机制和出清模型，旨在使电网的总调峰费用最小。

本文设计了虚拟电厂参与调峰辅助服务市场机制。首先，给出了虚拟电厂参与调峰辅助服务市场的准入原则。然后，从交易组织、交易流程、结算方式3个方面设计了虚拟电厂和火电机组同台平等参与竞价的调峰辅助服务市场机制，并分别建立了深度调峰市场的日前预出清和实时出清模型。最后，通过算例分析验证了所提机制与模型的合理性。

1 虚拟电厂参与深度调峰市场的市场机制

1.1 虚拟电厂参与深度调峰市场机理

虚拟电厂由聚合分布式电源、可控负荷、电动汽车以及储能等资源形成，与外部大电网、调峰市场通过虚拟电厂运营商进行信息交互。虚拟电厂运营商既可以作为售电企业，也可以作为辅助服务提供商。本文主要利用虚拟电厂内部灵活性资源，提供调峰辅助服务。

虚拟电厂的调峰能力主要通过储能充电、负荷增加、电动汽车充电等方式提供，具体如图1所示，调峰

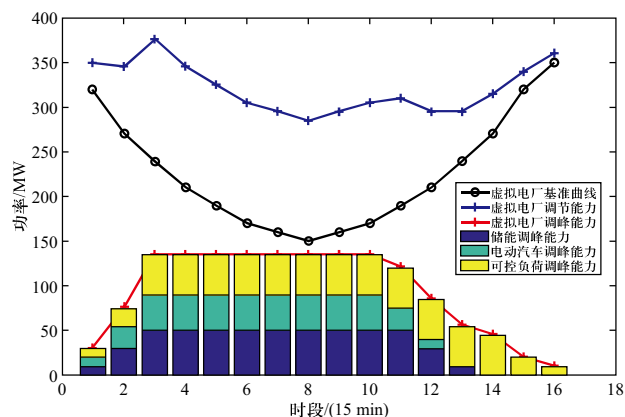


图1 虚拟电厂调峰能力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of virtual power plant peak regulation capacity

能力的大小主要取决于储能的充电功率、电动汽车充电功率、可增的负荷功率，同时受到储能容量以及电动汽车电池容量的限制。虚拟电厂的调节容量不小于一定的标准（如20 MW）且应满足调度通信接入要求并能被实时调用。发（用）电信息采集周期和调峰响应时间均应小于15 min，调峰持续时间应不小于30 min^[12]。

1.2 交易组织与交易流程

本文深度调峰辅助服务市场采用日前预出清、日内实时出清的方式，交易时段为竞价日次日的24 h，共分为96个时段，每个时段15 min。市场主体为火电机组、虚拟电厂，交易标的为其调峰容量。

在日前现货市场出清之后，如果存在弃风弃光现象，则启动深度调峰市场，调度中心发布次日深度调峰需求，火电机组和虚拟电厂申报次日的深度调峰容量和价格曲线，参与市场竞价，调度中心进行日前预出清。

由于风光等可再生能源的出力预测存在偏差，需要在日内调用时根据实际情况，对日前调峰计划做出调整。因此，调控中心会在日内预计出现弃风、弃光时，启动深度调峰市场，实时出清。

在日前市场中，虚拟电厂除了申报调峰容量和调峰价格外，还需要提供其基准曲线，用以计算虚拟电厂的实际调用的调峰电量，其值为虚拟电厂实际发（用）电曲线与基准曲线的时间积分面积。

本文参考文献[14]设计了日前和实时2级深度调峰市场的交易流程，包括交易发布、集中申报、交易出清、结果发布、交易执行，具体如下。

1) 竞价日9:30前，调控中心发布深度调峰市场开市信息，包括：各个时段调峰需求信息；可参与市场交易的火电机组、虚拟电厂；申报价格的上下限。

2) 竞价日9:30–10:00，各火电机组以及虚拟电厂集中竞价申报。其中火电机组需分3档报价，报价需在市场发布的各档报价区间之内。虚拟电厂需要提供自身的基准曲线。

3) 竞价日10:30，调控中心进行深度调峰市场日前预出清，模型见本文2.1节。形成考虑调峰市场交易的日前发电计划，并向市场发布，内容包括火电机组与虚拟电厂的96点调峰出力曲线。

4) 运行日内，以15 min为周期实时出清。在每个调度周期前5–15 min，调控中心参照调峰市场日前报价按价格由低到高的顺序依次调用火电机组和虚拟电厂进行深度调峰，形成日内发电计划。

5) 在每个周期前5 min, 调控中心发布调峰市场交易结果, 包括下一周期的火电机组和虚拟电厂的调峰电力曲线。

6) 在每个调度周期内, 实时调用火电机组和虚拟电厂的调峰辅助服务, 并统计其实际调用的调峰电量。

7) 在运行日后, 调控中心根据运行日的实际调用电量和各机组的实际报价, 发布参与深度调峰的火电机组和虚拟电厂的调峰收益。

具体深度调峰市场出清流程如图2所示。

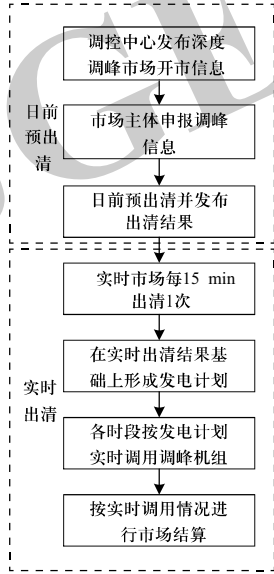


图2 深度调峰市场交易流程

Fig. 2 Deep peak regulation market transaction process

1.3 结算机制

本文深度调峰市场采用按报价出清的方式, 深度市场出清的结果是火电机组和虚拟电厂的调峰出力曲线。

运行日后, 依据火电机组和虚拟电厂的实际深调电量和各机组的实际申报价格分时段进行结算。深度调峰费用由没有参与深度调峰的火电机组和新能源机组按照各时段的上网电量等比例分摊。具体分摊公式^[15]如下:

$$C_g = C_{\text{total}} \frac{Q_g}{\sum_{m=1}^{N_m} Q_m} \quad (1)$$

式中: C_g 表示发电机组 g 需要分摊的调峰费用; C_{total} 表示总的调峰费用; Q_g 表示参与分摊的发电机组 g 的上网电量。

2 虚拟电厂参与深度调峰市场出清模型

2.1 深度调峰市场日前出清模型

2.1.1 目标函数

$$\min \left(\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N^{\text{th}}} \sum_{n=1}^N \lambda_{k,t,n}^{\text{th}} P_{k,t,n}^{\text{th}} \tau + \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N^{\text{vpp}}} \lambda_{j,t}^{\text{vpp}} P_{j,t}^{\text{vpp}} \tau \right) \quad (2)$$

式中: $\lambda_{k,t,n}^{\text{th}}$ 和 $P_{k,t,n}^{\text{th}}$ 分别为火电机组 k 在时段 t 的第 n 段深度调峰报价和中标容量; $\lambda_{j,t}^{\text{vpp}}$ 和 $P_{j,t}^{\text{vpp}}$ 分别为虚拟电厂 j 在时段 t 的深度调峰报价和中标容量; τ 表示每个时段的时间, 15 min; N^{th} 、 N^{vpp} 分别表示火电机组和虚拟电厂数量; T 表示交易时段数; N 表示火电机组报价档数, $N=3$ 。

2.1.2 约束条件

1) 深度调峰需求平衡约束。

火电机组和虚拟电厂总的中标深度调峰容量需满足调控中心发布的深度调峰需求, 故深度调峰需求平衡约束为:

$$\sum_{k=1}^{N^{\text{th}}} \sum_{n=1}^N P_{k,t,n}^{\text{th}} + \sum_{j=1}^{N^{\text{vpp}}} P_{j,t}^{\text{vpp}} = R_t \quad (3)$$

式中: R_t 表示调控中心发布的 t 时段深度调峰需求。

2) 火电机组运行约束。

在参与深度调峰市场后, 火电机组的实际计划出力为:

$$P'_{k,t} = P_{k,t}^0 - \sum_{n=1}^N P_{k,t,n}^{\text{th}} \quad (4)$$

式中: $P'_{k,t}$ 和 $P_{k,t}^0$ 分别表示火电机组 k 在 t 时段的实际计划出力、日前市场计划出力。

根据火电机组的出力下限, 可以得到参与深度调峰市场后的火电机组出力约束:

$$P'_{k,\min} \leq P'_{k,t} \leq P_{k,\min} \quad (5)$$

式中: $P'_{k,\min}$ 和 $P_{k,\min}$ 分别表示火电机组 k 的出力下限和基本调峰下限。

火电机组在叠加了深度调峰出力之后, 仍然要满足爬坡约束:

$$P'_{k,t} - P'_{k,t-1} \leq \Delta P_k^{\text{U}} \quad (6)$$

$$P'_{k,t-1} - P'_{k,t} \leq \Delta P_k^{\text{D}} \quad (7)$$

式中: ΔP_k^{U} 和 ΔP_k^{D} 分别表示机组 k 的最大上、下爬坡速率。

火电机组还需满足最小连续开机约束和最小连续停机约束^[16]:

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_k^{\text{on}}-1} u_{k,\tau} \geq T_k^{\text{on}} y_{k,t} \quad (8)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_k^{\text{off}}-1} (1-u_{k,\tau}) \geq T_k^{\text{off}} z_{k,t} \quad (9)$$

式中: T_k^{on} 表示火电机组 k 的最小连续开机时间; T_k^{off} 表示火电机组 k 的最小连续关机时间; $y_{k,t}$ 为表征火电机组 k 在时刻 t 是否启动的0-1变量, 若机组启动, $y_{k,t}=1$; $z_{k,t}$ 为表征火电机组 k 在时刻 t 是否停机的0-1变量, 若机组停机, $z_{k,t}=1$; $u_{k,t}$ 为表示火电机组 k 在时刻 t 的开停机状态的0-1变量, 若机组开机, $u_{k,t}=1$ 。

火电机组日最大启动次数约束:

$$\sum_{t=1}^T y_{k,t} \leq y_k^{\max} \quad (10)$$

式中: $y_k^{\max}$ 为火电机组 k 的日最大启动次数。

火电机组运行相关的0-1变量之间的约束:

$$y_{k,t} - z_{k,t} = u_{k,t} - u_{k,t-1} \quad (11)$$

$$y_{k,t} + z_{k,t} \leq 1 \quad (12)$$

从经济性的角度来说, 火电机组不能过多处于深度调峰状态, 还需要考虑机组调度周期内调用深度调峰最大次数的约束^[11]:

$$\sum_{t=1}^T v_{k,t} \leq N_k \quad (13)$$

式中: $v_{k,t}$ 表示火电机组 k 在 t 时段是否处于深度调峰状态, 若火电机组处于深度调峰状态, $v_{k,t}=1$; N_k 表示火电机组调用周期内深度调峰的最大调用次数。

3) 虚拟电厂相关约束。

虚拟电厂调峰功率需要满足最大出力约束:

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{vpp}} \leq P_{j,t,\max}^{\text{vpp}} - P_{j,t,\text{st}}^{\text{vpp}} \quad (14)$$

式中: $P_{j,t,\text{st}}^{\text{vpp}}$ 和 $P_{j,t,\max}^{\text{vpp}}$ 分别表示虚拟电厂 j 在时段 t 的基准曲线出力和可提供的最大出力。

虚拟电厂中由于存在储能、电动汽车充电站等组成单元, 会存在电能约束:

$$\sum_{t=1}^T P_{j,t}^{\text{vpp}} \tau \leq Q_j^{\max} \quad (15)$$

式中: $Q_j^{\max}$ 表示虚拟电厂 j 可提供的最大调峰电量。

虚拟电厂还需要满足爬坡约束:

$$P_{j,t}^{\text{vpp}} - P_{j,t-1}^{\text{vpp}} \leq \Delta P_j^{\text{vpp,U}} \quad (16)$$

$$P_{j,t}^{\text{vpp}} - P_{j,t-1}^{\text{vpp}} \leq \Delta P_j^{\text{vpp,D}} \quad (17)$$

式中: $\Delta P_j^{\text{vpp,U}}$ 和 $\Delta P_j^{\text{vpp,D}}$ 分别表示虚拟电厂 j 的最大上、下爬坡速率。

4) 安全约束。

本文假设每个虚拟电厂与电网有唯一的并网节点, 考虑线路和断面潮流约束^[17]:

$$-P_l^{\max} \leq \sum_{k=1}^{N_{\text{th}}} G_{l-k} P'_{k,t} - \sum_{j=1}^{N_{\text{vpp}}} G_{l-j} P_{j,t}^{\text{vpp}} - \sum_{i=1}^{N_l} G_{l-i} D_{i,t} \leq P_l^{\max} \quad (18)$$

式中: $P_l^{\max}$ 表示线路 l 的潮流传输极限值; G_{l-k} 表示火电机组 k 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布

因子; G_{l-i} 表示节点 i 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子; $D_{i,t}$ 表示节点 i 在时段 t 的母线负荷值。

$$P_s^{\min} \leq \sum_{k=1}^{N_{\text{th}}} G_{s-k} P'_{k,t} - \sum_{j=1}^{N_{\text{vpp}}} G_{s-j} P_{j,t}^{\text{vpp}} - \sum_{i=1}^{N_s} G_{s-i} D_{i,t} \leq P_s^{\max} \quad (19)$$

式中: $P_s^{\min}$ 、 $P_s^{\max}$ 分别表示断面 s 的潮流传输极限值; G_{s-k} 表示火电机组 k 所在节点对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子; G_{s-i} 表示节点 i 对断面 s 的发电机输出功率转移分布因子。

2.2 深度调峰市场实时出清模型

2.2.1 目标函数

$$\min \left(\sum_{k=1}^{N_{\text{th}}} \sum_{n=1}^N \lambda_{k,n}^{\text{th}} P_{k,n}^{\text{th}} \tau + \sum_{j=1}^{N_{\text{vpp}}} \lambda_j^{\text{vpp}} P_j^{\text{vpp}} \tau \right) \quad (20)$$

式中: $\lambda_{k,n}^{\text{th}}$ 和 $P_{k,n}^{\text{th}}$ 分别表示火电机组 k 的第 n 段深度调峰报价和中标容量; λ_j^{vpp} 和 P_j^{vpp} 分别表示虚拟电厂 j 的调峰报价和中标容量。

2.2.2 约束条件

1) 深度调峰需求平衡约束。

火电机组和虚拟电厂总的实时中标容量需满足调峰需求:

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{th}}} \sum_{n=1}^N P_{k,n}^{\text{th}} + \sum_{j=1}^{N_{\text{vpp}}} P_j^{\text{vpp}} = R' \quad (21)$$

式中: R' 表示实时调峰需求。

2) 火电机组相关约束。

火电机组出力在经过实时调整后, 需满足调峰出力约束:

$$P'_{k,\min} \leq P'_k \leq P_{k,\min} \quad (22)$$

式中: P'_k 表示火电机组 k 经过深度调峰市场实时出清调整后的出力。

火电机组的实时出力与上一时段的出力之间应满足机组爬坡约束:

$$P'_{k-} - \Delta P_k^{\text{D}} \leq P'_k \leq \Delta P_k^{\text{U}} + P'_{k-} \quad (23)$$

式中: P'_{k-} 表示上一时段火电机组 k 的出力。

3) 虚拟电厂相关约束

虚拟电厂出力约束:

$$0 \leq P_{j,t}^{\text{vpp}} \leq P_{j,t,\max}^{\text{vpp}} - P_{j,t,\text{st}}^{\text{vpp}} \quad (24)$$

式中: $P_{j,t,\max}^{\text{vpp}}$ 和 $P_{j,t,\text{st}}^{\text{vpp}}$ 分别表示虚拟电厂 j 可实时提供的最大出力和基准曲线出力。

电能约束:

$$P_j^{\text{vpp}} \tau \leq Q_j^{\max} \quad (25)$$

式中: $Q_j^{\max}$ 表示虚拟电厂 j 在该时段可提供的最大调峰电量。

4) 安全约束。

线路潮流约束：

$$-P_l^{\max} \leq \sum_{k=1}^{N_{lh}} G_{l-k} P'_k - \sum_{j=1}^{N_{lvp}} G_{l-j} P_j^{vpp} - \sum_{i=1}^{N_l} G_{l-i} D_i \leq P_l^{\max} \quad (26)$$

式中： D_i 表示表示节点*i*实时的母线负荷值。

断面潮流约束：

$$P_s^{\min} \leq \sum_{k=1}^{N_{sh}} G_{s-k} P'_k - \sum_{j=1}^{N_{svp}} G_{s-j} P_j^{vpp} - \sum_{i=1}^{N_s} G_{s-i} D_i \leq P_s^{\max} \quad (27)$$

3 算例分析

在MATLAB中编写变量、约束条件以及优化目标函数程序，并使用CPLEX求解器求解。

3.1 调峰需求

假设某省在某典型日0:00–4:00都有调峰需求，需要通过深度调峰市场进行调节。该日电网系统调峰需求如表1所示。

表 1 某典型日0:00–4:00调峰需求

Table 1 Peak regulation demand from 0:00-4:00 on a typical day

时段	1	2	3	4
调峰需求/MW	300	320	340	350
时段	5	6	7	8
调峰需求/MW	370	400	450	500
时段	9	10	11	12
调峰需求/MW	500	500	500	480
时段	13	14	15	16
调峰需求/MW	440	400	350	300

3.2 火电机组和虚拟电厂报价

参与深度调峰市场的火电机组共5台，其报价信息如附录A表A1所示，共有3个虚拟电厂参与报价，其报价信息如表2所示。

表 2 虚拟电厂报价信息

Table 2 Bidding information of virtual power plants

机组	申报容量/MW	申报价格/(元·(MWh) ⁻¹)
VPP1	50	215
VPP2	70	220
VPP3	80	310

日前预出清结果如表3所示。

表 3 各机组中标容量

Table 3 Winning bid capacity of each unit

MW

时段	火1	火2	火3	火4	火5	VPP1	VPP2	VPP3
1	0	30	40	50	60	50	70	0
2	10	40	40	50	60	50	70	0
3	30	40	40	50	60	50	70	0
4	30	40	40	50	60	50	70	10
5	30	40	40	50	60	50	70	30
6	30	40	40	50	60	50	70	60
7	30	40	40	50	90	50	70	80
8	30	45	60	75	90	50	70	80
9	30	45	60	75	90	50	70	80
10	30	45	60	75	90	50	70	80
11	30	45	60	75	90	50	70	80
12	30	40	45	75	90	50	70	80
13	30	40	40	50	80	50	70	80
14	30	40	40	50	60	50	70	60
15	30	40	40	50	60	50	70	10
16	0	30	40	50	60	50	70	0

假设实时调峰需求发生变化，2:00–3:00调峰需求大幅上升，如表4所示。

表 4 某典型日2:00–3:00实时调峰需求

Table 4 Real-time peak regulation demand from 2:00-3:00 on a typical day

时段	9	10	11	12
调峰需求/MW	550	600	580	540

3.3 数据分析

在相应时段，各机组的中标容量会发生变化，实时中标容量如表5所示。

表 5 2:00–3:00各机组中标容量

Table 5 Winning bid capacity of each unit from 2:00-3:00

MW

时段	火1	火2	火3	火4	火5	VPP1	VPP2	VPP3
9	45	80	60	75	90	50	70	80
10	60	80	60	100	100	50	70	80
11	50	80	60	100	90	50	70	80
12	45	70	60	75	90	50	70	80

除了9-12时段外，其余时段的中标容量与日前预出清结果相同。因此，只需要在调峰需求发生变化的

时段,进行实时出清,其余时段可以采用日前预出清结果。

按照各机组实际报价进行结算,各时段总调峰费用如表6所示。

表6 各时段总调峰费用

Table 6 Total peak regulation cost of each 15 minutes

时段	1	2	3	4
调峰费用/元	16 537.5	17 700	18 875	19 650
时段	5	6	7	8
调峰费用/元	21 200	23 525	27 512.5	31 675
时段	9	10	11	12
调峰费用/元	31 675	31 675	31 675	29 993.75
时段	13	14	15	16
调峰费用/元	26 687.5	23 525	19 650	16 537.5

通过市场出清结果可以得到,该典型日各虚拟电厂总收益分别为43 000元、61 600元、56 575元。

通过分析出清结果可以发现,VPP3由于调峰报价较高,按照报价由低到高的顺序进行出清时,其中标的调峰容量较少,而报价较低的VPP1和VPP2会被优先调用。通过分析各虚拟电厂的收益可以发现,虽然VPP3的申报容量和价格较高,但是其中标容量相对VPP1和VPP2较低,反而总体收益较低。另外,由于火电机组出力较低时深度调峰成本较高,第二档报价由于普遍高于第一档报价,会在第一档的深度调峰容量全部被调用之后才会被调用。

如果采用分开单独竞价而不是同台平等竞价模式,假设虚拟电厂所承担的调峰容量为总调峰需求的30%,则市场出清各机组中标容量如附录A表A2所示,各时段的总调峰费用如表7所示。

表7 分开单独竞价模式各时段总调峰费用

Table 7 Total peak regulation cost under two independent market modes

时段	1	2	3	4
调峰费用/元	16 587.5	17 830	19 297.5	20 031.25
时段	5	6	7	8
调峰费用/元	21 510	23 743.75	27 862.5	32 431.25
时段	9	10	11	12
调峰费用/元	32 431.25	32 431.25	32 431.25	29 886.25
时段	13	14	15	16
调峰费用/元	27 035	23 743.75	20 031.25	16 587.5

通过对比分析表6和表7可以发现,虚拟电厂和火电机组同台平等竞价模式下各时段的调峰费用普遍低于分开单独竞价模式下的费用,这是因为后者火电和虚拟电厂之间的调峰容量分配比例不是最优,部分价格较低的虚拟电厂调峰容量没有被调用。

4 总结

新能源大规模并网的背景下,火电机组承担了很大的调峰压力,需求侧资源参与调峰是未来的发展趋势之一。虚拟电厂的发展为需求侧资源参与调峰提供了可行路径。本文主要从交易组织、交易流程、交易结算3个方面,分日前预出清和实时出清2个时间尺度设计了市场机制,提出了火电机组和虚拟电厂同台平等参与深度调峰的市场模式,建立了相应的出清模型。通过算例分析验证了所提模型的合理性,并与分开单独竞价模式进行对比,体现出同台平等竞价模式在提高调峰经济性方面的优越性。

本文下一步将深化研究虚拟电厂内部如何实现协同最优经济控制、惩罚机制、利益分配等问题。

参考文献

- [1] 菅学辉,张利,杨立滨,等.高比例风电并网下基于卡尔多改进的深度调峰机制[J].电力系统自动化,2018,42(8): 110-118.
JIAN Xuehui, ZHANG Li, YANG Libin, et al. Deep-peak regulation mechanism based on kaldor improvement under high-penetration wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 110-118(in Chinese).
- [2] 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).
- [3] 王蓓蓓,刘小聪,李扬.面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J].中国电机工程学报,2013,33(22): 35-44.
WANG Beibei, LIU Xiacong, LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 35-44(in Chinese).
- [4] 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): 27-34.
XU Tanghai, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. High

- penetration of renewable energy power planning considering coordination of source-load-storage multi-type flexible resources[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(1): 27-34(in Chinese).
- [5] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9(in Chinese).
- [6] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111(in Chinese).
- [7] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 92-102.
YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 92-102(in Chinese).
- [8] 何奇琳, 艾芊. 售电侧放开环境下含需求响应虚拟电厂的电力市场竞价策略[J]. 电力建设, 2019, 40(2): 1-10.
HE Qilin, AI Qian. Bidding strategy of electricity market including virtual power plant considering demand response under retail power market deregulation[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 1-10(in Chinese).
- [9] 王宣元, 刘敦楠, 刘蓁, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3175-3183.
WANG Xuanyuan, LIU Dunnann, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous Internet of Things[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183(in Chinese).
- [10] 李旭东, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2460-2470.
LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Three-stage combined peak regulation strategy for nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2460-2470(in Chinese).
- [11] 胡健, 秦玉杰, 焦提操, 等. 泛在电力物联网环境下考虑碳排放权约束的VPP理性调峰模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 49-57.
HU Jian, QIN Yujie, JIAO Ticao, et al. Rational peak shaving model of VPP considering carbon emission rights constraints in ubiquitous power Internet of Things environment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 49-57(in Chinese).
- [12] 华东能源监管局. 上海电力调峰辅助服务市场运营规则(试行)[S]. 2020.
- [13] 应志玮, 余涛, 黄宇鹏, 等. 上海虚拟电厂运营市场出清的研究与实现[J]. 电力学报, 2020, 35(2): 129-134.
YING Zhiwei, YU Tao, HUANG Yupeng, et al. Research on clearing the operation market of Shanghai virtual power plant[J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(2): 129-134(in Chinese).
- [14] 山西能源监管办. 山西省电力辅助服务市场实施细则(模拟运行稿)[S]. 2018.
- [15] 胡朝阳, 毕晓亮, 王珂, 等. 促进负备用跨省调剂的华东电力调峰辅助服务市场设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 175-182.
HU Zhaoyang, BI Xiaoliang, WANG Ke, et al. Design of peak regulation auxiliary service market for East China power grid to promote inter-provincial sharing of negative reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 175-182(in Chinese).
- [16] 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.
LI Jialong, CHEN Yuguo, 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(in Chinese).
- [17] 徐帆, 葛朝强, 吴鑫, 等. 区域电网省间调峰辅助服务的市场机制与出清模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16): 109-120.
XU Fan, GE Zhaoqiang, WU Xin, et al. Market mechanism and clearing model of inter-provincial peak regulation ancillary service for regional power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 109-120(in Chinese).

收稿日期: 2020-06-02; 修回日期: 2020-08-10.



赵晋泉

作者简介:

赵晋泉(1972), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统优化运行、电压稳定分析与控制、电力市场。通信作者, E-mail: zhaojinquan@hhu.edu.cn。

杨余华(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场, E-mail: 770329526@qq.com。

(责任编辑 张宇)

附录A 报价信息和中标容量

表 A1 火电机组报价信息

Table A1 Bidding information of thermal power units

火电机组	机组容量/MW	第一档		第二档		第三档	
		调峰报价 /(元·(MWh) ⁻¹)	调峰容量/MW	调峰报价 /(元·(MWh) ⁻¹)	调峰容量/MW	调峰报价 /(元·(MWh) ⁻¹)	调峰容量 /MW
火1	300	235	30	355	15	450	10
火2	400	230	40	340	20	430	20
火3	400	225	40	335	20	470	30
火4	500	220	50	330	25	440	30
火5	600	215	60	325	30	455	40

表 A2 分别单独竞价时各机组中标容量

Table A2 Winning bid capacity of each unit under two independent market modes

时段	MW							
	火1	火2	火3	火4	火5	VPP1	VPP2	VPP3
1	20	40	40	50	60	50	40	0
2	30	40	40	50	64	50	46	0
3	30	40	40	50	78	50	52	0
4	30	40	40	50	85	50	55	0
5	30	40	40	59	90	50	61	0
6	30	40	45	75	90	50	70	0
7	30	60	60	75	90	50	70	15
8	45	80	60	75	90	50	70	30
9	45	80	60	75	90	50	70	30
10	45	80	60	75	90	50	70	30
11	45	80	60	75	90	50	70	30
12	45	66	60	75	90	50	70	24
13	30	53	60	75	90	50	70	12
14	30	40	45	75	90	50	70	0
15	30	40	40	50	85	50	55	0
16	20	40	40	50	60	50	40	0