

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220034

## 面向多级市场出清的负荷聚合商联合交易策略

程松<sup>1</sup>, 周鑫<sup>1</sup>, 任景<sup>1</sup>, 原博<sup>1</sup>, 刘友波<sup>2</sup>, 王潇笛<sup>2</sup>

(1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610000)

**摘要:** 在以新能源为主体的新型电力系统发展模式下, 电网将面临灵活性资源严重不足的问题, 亟需引导用户侧可调控资源主动参与系统的平衡调节服务。提出一种考虑日前主能量市场、日前备用市场及实时平衡市场的多级市场衔接框架, 基于负荷聚合商引导终端用户参与至多级耦合市场的市场化调度中。在日前主能量市场与备用市场, 提出负荷聚合商可调节负荷状态感知模型及日前电能量与备用联合市场的竞价模型, 系统运营商实现日前主辅能量市场的阶段性出清。在实时平衡市场, 提出负荷聚合商基于用户侧富余可调节资源的实时平衡市场竞标模型, 系统运营商基于实际系统运行需求实现平衡资源的出清与备用资源的调度。最后基于 IEEE 30 节点系统验证了所提出市场框架可有效激励用户侧主动响应电网调控需求、降低系统供需不平衡风险。

**关键词:** 平衡市场; 负荷聚合商; 备用市场; 需求侧响应

### Bidding strategy for load aggregators in a multi-stage electricity market

CHENG Song<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>1</sup>, REN Jing<sup>1</sup>, YUAN Bo<sup>1</sup>, LIU Youbo<sup>2</sup>, WANG Xiaodi<sup>2</sup>

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** As the power system develops towards one with high penetration of renewable energy, the system flexible resources are seriously insufficient. It is urgent to guide the controllable resources of end-users to actively participate in the balance regulation service. This paper proposes a multi-stage electricity market clearing framework for day-ahead energy market, day-ahead reserve market and real-time balanced market, where load aggregators can aggregate end-users to join in the multi-stage coupled markets. In the day-ahead energy market and reserve market, the state perception model for flexible sources of load aggregators is established. Also, the bidding model of load aggregator and the market clearing model of system operator for the day-ahead energy and reserve market are put forward. In the real-time balanced market, a bidding model of load aggregator based on the surplus flexible resources of end-users is proposed. The system operator clears the real-time balance market and dispatches the collected flexible resources based on the actual system supply-demand demand. A modified IEEE 30 bus system is used to test the proposed market framework. The simulation results show that the proposed framework can effectively stimulate end-users to actively respond to the system operation demand, and to reduce the risk of system supply and demand imbalance.

This work is supported by the Science and Technology of State Grid Corporation of China (No. SGNW0000DKJ S2100269).

**Key words:** balance market; load aggregator; reserve market; demand response

## 0 引言

在“2030 碳达峰, 2060 碳中和”双碳背景下, 风电、光伏等新能源作为推动能源系统低碳转型、

建设新型电力系统的关键一环。预计到 2030 年, 我国风电、光伏总装机将达到 12 亿 kW 以上<sup>[1]</sup>, 当可再生能源在电力系统比例超过一定阈值时, 电网供需结构及其运行模式将会发生深刻变化, 呈现出灵活可靠资源稀缺化、供需平衡概率化、潮流双向化等新形态特征<sup>[2]</sup>, 系统平衡资源不足的问题将成为制约未来新能源高质量发展的关键瓶颈。为保

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGNW0000DKJ S2100269); 国家自然科学基金重点项目资助 (U2066209)

障新型电力系统的电力电量可靠供应和安全稳定运行,一是可充分挖掘系统需求侧灵活性资源,引导用户侧可调控资源参与至系统调度,以有效整合供需两侧的资源配置;二是可完善多层次市场机制设计,利用合理的市场竞争机制及激励手段引导源网荷协调控制<sup>[3]</sup>。

从系统灵活性资源挖掘层面来讲,仅凭借传统电源侧火发电机组的灵活调节能力已不足以支撑新型电力系统的调控需求<sup>[4]</sup>。用户侧可控资源潜在类型多、调节方式灵活、市场参与积极性高,可作为优质备用容量资源应对电力系统实时功率不平衡问题<sup>[5]</sup>。信息物理技术的发展为电网将负荷侧多元平衡资源纳入市场化调度体系提供了基础支撑,但考虑到末端柔性负荷响应行为的分散性及随机性,电网难以直接调控规模化的分布式用户,且现阶段尚未形成较为成熟的需求侧与电网灵活互动框架。负荷聚合商(load aggregator, LA)、虚拟电厂(virtual power plant, VPP)等聚合用户电能资源的新型市场主体,可为中小用户提供参与现货市场及辅助服务市场的平台<sup>[6]</sup>。文献[7]提出了 LA 基于可控负荷参与主能量市场竞标的鲁棒优化策略。文献[8]建立了面向电网调频服务的多 LA 市场竞标及电网经济调度模型。文献[9]提出了 LA 面向空调、热水器等温控负荷的调控框架及调控手段。文献[10]中 VPP 通过调控电动汽车与风电以参与日前主能量市场与备用市场,并建立了面向多级市场的联合竞标模型以实现优化竞价。文献[11-12]建立了考虑中长期市场与日前市场多重价格不确定性的 VPP 优化竞标模型。但现阶段负荷聚合商如何利用有效评估并整合分布式用户的集群响应容量,合理安排用户调度计划,高效参与多级市场以满足自身盈利需求是亟待解决的问题。

从市场机制设计层面来讲,电力现货市场按时间尺度可划分为日前、日内及实时市场。为反映系统实时供需平衡成本,英国、北欧和美国 PJM 市场在日前或实时市场引入基于实时调度的平衡市场<sup>[13]</sup>。调度机构基于实时供需缺额,利用平衡市场调用提前获取到的灵活性平衡资源,实现系统电力电量平衡与阻塞管理<sup>[14]</sup>。北欧日前现货市场通过引入灵活块交易的交易品种(小时交易、块交易、链交易等),引导市场主体基于实时能源需求及自身利益需求在集中平台上竞价投标<sup>[15]</sup>。美国加州独立系统运营商<sup>[16]</sup>与美国中部电力系统运营商<sup>[17]</sup>设计灵活调节服务(flexible ramping products, FRP)的交易品种,通过为灵活性服务提供者提供基于机会成本的经济激励,进一步利用价格信号挖掘市场多元主体的向上/向

下灵活调节潜力。在我国电力市场发展初期,引入实时平衡市场可有效衔接分散式的市场运营机制与系统化的集中调度体系,为实时电力交易与辅助服务定价提供价格信号发现依据<sup>[18-19]</sup>。然而,我国目前主能量市场仍按照电量交易和偏差考核结算,缺乏实时电力平衡的激励机制及平衡成本分摊机制<sup>[20]</sup>。

为有效响应高比例新能源电网快速变化的净负荷<sup>[21]</sup>,引导需求侧用户主动参与到电力系统供需平衡调节服务和灵活性服务中,本文通过构造完善的日前主能量市场、备用市场及实时平衡市场多级市场衔接框架及调度模型,实现面向多级耦合市场的优化运营。通过建立负荷聚合商灵活可调节负荷状态感知模型,实现对分散式用户可调节资源的实时感知与调控。在日前主能量市场与备用市场,提出负荷聚合商基于用户终端可调节资源禀赋参与日前电能量与备用市场的竞价模型,系统运营商基于市场主体竞标策略实现日前主辅联合市场的市场出清,以制定日前机组的调度计划。在实时平衡市场,统筹考虑日前出清结果,各负荷聚合商基于用户侧富余可调节资源参与日内实时平衡市场的竞标,系统运营商基于实际系统运行需求实现日内平衡资源的出清与备用资源的调度。最后通过采用 IEEE 30 节点系统数据进行实证分析,仿真结果表明所提模型框架可实现日前电能量市场、备用市场与实时平衡市场的紧密衔接,有效激励用户侧灵活性资源主动响应电网调控需求,促进新能源的消纳、降低系统电力电量不平衡风险。

## 1 市场框架

本文参考较为成熟的北欧电力市场日前市场框架及平衡市场开展模式,对多级市场的市场参与方式、市场出清模式、市场结算流程等基本市场规则约定如下<sup>[22]</sup>。

1) 市场框架及市场用户:本文多级市场包括日前主能量市场、日前备用市场及实时平衡市场,市场交易框架及交易流程如图 1 所示。市场用户包括负荷聚合商、电源侧机组及系统运营商。LA 与电源侧机组参与电力库集中式的竞价交易,系统运营商在主体竞标结束后进行市场出清并制定机组调度计划。

2) 日前主能量与备用市场竞标:LA 基于日前代理用户的负荷资源特性参与日前主能量市场(一天 24 个点)与备用市场(包括上、下备用)竞标(一天 24 个点)。其中,日前主能量市场与日前备用市场中标电量按市场出清价格结算(pay as bid)。日前主能量市场与备用市场由系统运营商单独组织交易、

联合出清。

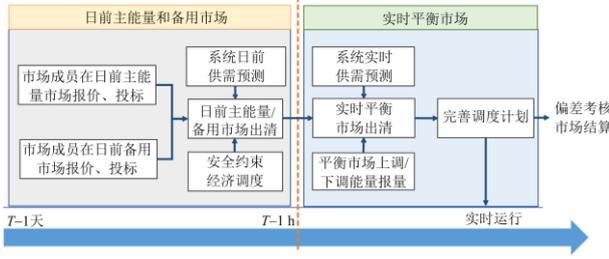


图 1 多级市场交易框架及交易流程

Fig. 1 Trading framework and flow of multi-stage markets

3) 实时平衡市场竞标：考虑到北欧的平衡服务品种较少，部分平衡调节资源可通过实时平衡市场获得。实时平衡市场提前 1 h 开展，市场成员基于日前市场出清结果，结合自身发电曲线或用电曲线在实时平衡市场中申报上、下电能调节量组合，竞标内容包括市场参与时段、上调量、下调量等信息。

4) 市场结算方式：采用北欧“主能量市场+备用市场+平衡市场”多级市场多类交易品种分开结算的模式，暂不考虑其他辅助服务品种交易<sup>[23]</sup>。

5) 负荷调控及偏差考核：LA 基于多级市场出清结果及系统运营商调度结果，实现用户侧分布式可控设备的滚动优化，避免市场偏差考核。

## 2 负荷聚合商负荷感知方法及其竞标策略

### 2.1 负荷聚合商灵活可调节负荷状态感知

#### 1) 负荷聚合商面向签约用户的最优调控策略

LA 在参与市场竞标前需准确评估签约用户的用能态势及可调节资源特性，其中签约用户的灵活可调节设备为洗衣机或电动汽车等灵活可响应设备。LA 通过调控可响应用户的调控设备，使得用户侧聚合资源在满足该 LA 调控需求时保证用户侧总用能成本最小，对于典型场景  $\omega \in \{1, L, \Omega\}$  任意时间点  $t \in \{1, L, T\}$ ，针对签约用户  $h \in \{1, L, H\}$  的可调控设备，LAN ( $n \in N$ ) 调控的目标函数可表述为

$$\min_{u_{n,i,h,t,\omega}} \sum_t \lambda_{n,t,\omega}^S \left( P_{n,h,t,\omega}^D + \sum_i P_{n,i,h,\omega} u_{n,i,h,t,\omega} \right) \quad \forall t, \omega, n \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=1}^T u_{n,i,h,t,\omega} \geq t_{n,i,h,\omega}^R \quad \forall i, h, t, \omega, n \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T |u_{n,i,h,t,\omega} - u_{n,i,h,t-1,\omega}| - 1 = K_i \quad \forall i, h, t, \omega, n \quad (3)$$

$$u_{n,i,h,t,\omega} \leq t_{n,i,h,t,\omega}^* \quad \forall i, h, t, \omega, n \quad (4)$$

$$t_{n,i,h,t,\omega}^* = \begin{cases} 1, & t \in [t_{n,i,h,\omega}^S, t_{n,i,h,\omega}^E] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad \forall i, h, t, \omega, n \quad (5)$$

式中： $N, H, I$  为负荷聚合商集合、负荷聚合商签约用户集合、签约用户可调控设备集合； $\lambda_{n,t,\omega}^S$  为在时间点  $t$  时 LAN 提供给终端用户的零售电价； $P_{n,h,t,\omega}^D$  为签约用户  $h$  在时间点  $t$  时不可调控负荷； $P_{n,i,h,\omega}$  为 LAN 的可调控设备  $i \in I$  的基础负荷率； $u_{n,i,h,t,\omega}$  为 0-1 变量，表示可调控设备  $i$  的调控状态， $u_{n,i,h,t,\omega} = 1$  代表可调控设备  $i$  在该时间点  $t$  处于开启状态。 $t_{n,i,h,\omega}^R$  为可调控设备  $i$  在调度时间段内的最少用能时长； $K_i$  为可调控设备  $i$  在调度时间段内的可启停总次数； $t_{n,i,h,\omega}^S, t_{n,i,h,\omega}^E$  分别为签约用户  $h$  可调控设备  $i$  规定的最早用能时间及最迟用能时间。 $t_{n,i,h,t,\omega}^* = 1$  代表着可调控设备  $i$  在用户规定的用能时段内可参与负荷聚合调控。因此，约束式(2)保证在调度时间段内每个用户对洗碗或电动汽车充电等可调控设备的基本需求仍能得到满足；约束式(3)保障了可调控设备的启停次数在设备约束范围内；约束式(4)、式(5)保障了负荷聚合商面向可调控设备的调控计划在用户设备规定的用能时段内。

#### 2) 签约用户的初始用能负荷感知

对负荷聚合商签约用户的初始负荷状态进行评估与感知，LAN 在时间点  $t$  签约用户的基准负荷可表述为

$$P_{n,t,\omega}^F = \sum_h \left( P_{n,h,t,\omega}^D + \sum_i P_{n,i,h,\omega} u_{n,i,h,t,\omega}^R \right) \quad \forall t, \omega, n \quad (6)$$

$$u_{n,i,h,t,\omega}^R = \begin{cases} 1, & t = t_{n,i,h,\omega}^D \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad \forall i, h, t, \omega, n \quad (7)$$

式中： $u_{n,i,h,t,\omega}^R$  为 0-1 变量， $u_{n,i,h,t,\omega}^R = 1$  代表可调控设备  $i$  在该时间点  $t$  的初始用能计划处于开启状态； $t_{n,i,h,\omega}^D$  为签约用户  $h$  可调控设备  $i$  的初始计划用能时刻点。

#### 3) 签约用户的可响应负荷评估

设在典型场景  $\omega$  中 LAN 的签约用户的响应比例为  $d_{n,\omega}$ ，则在场景  $\omega$  中响应用户数量为  $d_{n,\omega} H$ ，不响应用户数量为  $d_{n,\omega} (1-H)$ ，则 LAN 在时间点  $t$  聚合的负荷可表述为

$$P_{n,t,\omega}^T = P_{n,t,\omega}^{NN} + P_{n,t,\omega}^{FN} = \sum_{h \in H_{n,w}^N} \left( P_{n,h,t,\omega}^D + \sum_i P_{n,i,h,\omega} u_{n,i,h,t,\omega} \right) + \sum_{h \in H_{n,w}^C} \left( P_{n,h,t,\omega}^D + \sum_i P_{n,i,h,\omega} u_{n,i,h,t,\omega}^R \right) \quad \forall t, \omega, n \quad (8)$$

式中： $P_{n,t,\omega}^T$  为 LAN 签约用户的总负荷； $H_{n,w}^N$  为场

景 $\omega$ 中签约用户的不响应用户集; $P_{n,t,\omega}^{NN}$ 为签约用户的不响应负荷; $H_{n,w}^C$ 为场景 $\omega$ 中签约用户的响应用户集; $P_{n,t,\omega}^{FN}$ 为签约用户的可响应负荷。

## 2.2 负荷聚合商面向日前主能量市场及备用市场的竞价模型

LAN通过评估签约用户的可响应负荷,基于用户资源特性参与日前电能市场、日前备用市场与实时平衡市场竞标以实现收益最大化。LAN在日前市场竞标策略的目标函数可表述为

$$\max_{P_{n,t,\omega}^{bid}, r_{n,t,\omega}^{up}, r_{n,t,\omega}^{down}} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \pi_{\omega} \sum_t \left( \lambda_{n,t,w}^S P_{n,t,\omega}^T - \lambda_{n,t,w}^A P_{n,t,w}^{bid} + \lambda_{n,t,w}^{LAC} (r_{n,t,w}^{up} + r_{n,t,w}^{down}) - \lambda_{n,t,w}^P (P_{n,t,w}^{lm+} + P_{n,t,w}^{lm-}) \right) \quad (9)$$

$$\text{s.t. } P_{n,t,w}^{lm} = P_{n,t,\omega}^T - P_{n,t,w}^{bid} \quad \forall t, \omega, n \quad (10)$$

$$P_{n,t,w}^{lm} = P_{n,t,w}^{lm+} - P_{n,t,w}^{lm-} \quad \forall t, \omega, n \quad (11)$$

$$0 \leq r_{n,t,w}^{up} \leq r_{n,t,w}^{up,max} \quad \forall t, \omega, n \quad (12)$$

$$0 \leq r_{n,t,w}^{down} \leq r_{n,t,w}^{down,max} \quad \forall t, \omega, n \quad (13)$$

$$P_{n,t,\omega}^{NN} + \sum_{h \in H_{n,w}^C} P_{n,h,t,\omega}^D \leq P_{n,t,w}^{bid} + r_{n,t,w}^{up} \leq P_{n,t,\omega}^T \quad \forall t, \omega, n \quad (14)$$

$$0 \leq P_{n,t,\omega}^{NN} + \sum_{h \in H_{n,w}^C} P_{n,h,t,\omega}^D \leq P_{n,t,w}^{bid} - r_{n,t,w}^{down} \quad \forall t, \omega, n \quad (15)$$

式中: $\pi_{\omega}$ 为场景 $\omega$ 的概率; $\lambda_{n,t,w}^A$ 、 $\lambda_{n,t,w}^{LAC}$ 、 $\lambda_{n,t,w}^P$ 分别为LAN在依据历史数据预测日前主能量市场出清价格、日前备用市场出清价格、日内不平衡量的惩罚价格; $P_{n,t,\omega}^T$ 、 $P_{n,t,w}^{bid}$ 、 $P_{n,t,w}^{lm}$ 为LAN日前预测负荷需求、LAN在日前主能量市场的竞标量、实时平衡市场竞标量, $P_{n,t,w}^{lm+}$ 、 $P_{n,t,w}^{lm-} > 0$ , $P_{n,t,w}^{lm-}$ 表示LAN在日前主能量市场购买的电能较多,签约用户存在富余电能,可在实时平衡市场申报富余下调电能, $P_{n,t,w}^{lm+}$ 表示该LAN需从实时平衡市场申报富余上调电能; $r_{n,t,w}^{up}$ 、 $r_{n,t,w}^{down}$ 为LAN在备用市场竞标的上、下备用容量; $r_{n,t,w}^{up,max}$ 、 $r_{n,t,w}^{down,max}$ 为LAN在备用市场竞标的最大、最小容量。目标项中 $\lambda_{n,t,w}^P (P_{n,t,w}^{lm+} + P_{n,t,w}^{lm-})$ 为惩罚项,保证了LAN在日前市场的竞标量满足其大部分负荷电能需求,这也满足系统运营商的基本政策,即日前主能量市场申报量可大致反映实际负荷需求情况;约束式(14)、式(15)保证了LAN在日前市场竞标量可保证基本负荷需求并在可调控范围内。

LAN在日前主能量市场与备用市场的竞标模型可表述为一个与各段出力区间及能量价格有关的分段递减函数 $C_{n,t,w}^{LA} (P_{n,t,w}^{bid})$ ,如式(16)所示。

$$C_{n,t,w}^{LA} (P_{n,t,w}^{bid}) = P_{n,t,c+1}^{bid} + (P_{n,t,c}^{bid} - P_{n,t,c+1}^{bid}) \frac{\lambda_{n,t,c+1}^{bid} - \lambda_{n,t,w}^A}{\lambda_{n,t,c+1}^{bid} - \lambda_{n,t,c}^{bid}} \quad \forall t, \omega, n \quad (16)$$

设该竞价曲线包括 $C$ 段 $(P_{n,t,1}^{bid}, \lambda_{n,t,1}^{bid}), (P_{n,t,2}^{bid}, \lambda_{n,t,2}^{bid}), \dots, (P_{n,t,C}^{bid}, \lambda_{n,t,C}^{bid})$ ,其中 $\lambda_{n,t,1}^{bid} \leq \lambda_{n,t,2}^{bid} \leq \dots \leq \lambda_{n,t,C}^{bid}$ , $P_{n,t,1}^{bid} \geq P_{n,t,2}^{bid} \geq \dots \geq P_{n,t,C}^{bid}$ 。对应场景 $\omega$ ,最终获得的市场出清价格 $\lambda_{n,t,w}^A$ 将在区间 $(P_{n,t,c}^{bid}, P_{n,t,c+1}^{bid})$ 内,如图2所示。

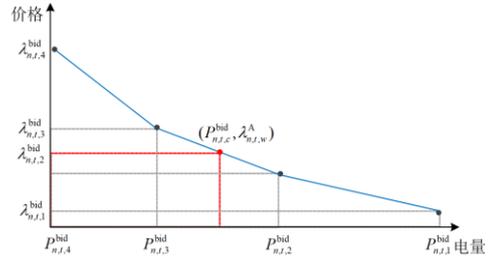


图2 负荷聚合商日前主能量市场竞标曲线  
Fig. 2 Bidding curve of load aggregator for day-ahead energy market

## 2.3 负荷聚合商面向日内平衡市场的竞价模型

在日前主能量市场与备用市场出清后,LAN基于日前中标量,基于签约用户富余可调节资源参与实时平衡上下电能调节市场,其目标函数可表述为

$$\max_{P_{n,t,w}^{lm+}, P_{n,t,w}^{lm-}, P_{n,t,w}^{div}, r_{n,t,w}^{up}, r_{n,t,w}^{down}} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \pi_{\omega} \sum_t \left( \lambda_{n,t,w}^S (P_{n,t,w}^{lm+} - P_{n,t,w}^{lm-}) + \lambda_{n,t,w}^B (P_{n,t,w}^{lm+} + P_{n,t,w}^{lm-}) - \lambda_{n,t,w}^{div} P_{n,t,w}^{div} \right) \quad (17)$$

$$\text{s.t. } P_{n,t,w}^{div} = P_{n,t,w}^{bid+} + P_{n,t,w}^{lm+} - P_{n,t,w}^{lm-} + r_{n,t,w}^{up} - r_{n,t,w}^{down} - P_{n,t,\omega}^T \quad \forall t, \omega, n \quad (18)$$

$$P_{n,t,w}^{lm+} \leq \max \left\{ (P_{n,t,\omega}^T - P_{n,t,w}^{bid+} - r_{n,t,w}^{up}), 0 \right\} \quad \forall t, \omega, n \quad (19)$$

$$P_{n,t,w}^{lm-} \leq \max \left\{ (P_{n,t,w}^{bid+} - r_{n,t,w}^{down} - P_{n,t,\omega}^{NN} - \sum_{h \in H_{n,w}^C} P_{n,h,t,\omega}^D), 0 \right\} \quad \forall t, \omega, n \quad (20)$$

式中: $\lambda_{n,t,w}^{div}$ 为LAN日内偏差电量的考核价格; $P_{n,t,w}^{div}$ 为LAN日内偏差量; $P_{n,t,w}^{bid+}$ 为日前负荷聚合在日前主能量市场竞标得到的电能; $\lambda_{n,t,w}^B$ 为该负荷聚合商参与平衡市场上调控、下调控的价格。式(19)、式(20)保证了LAN参与平衡市场上下调节电能竞标在负荷可调节范围内。

## 3 现货市场模型

### 3.1 日前主能量市场与备用市场出清

各市场主体在日前现货市场竞标完毕后,系统

运营商以最小化系统运行成本(含机组发电总成本及系统备用成本)为优化目标实现日前主能量市场与备用市场的联合出清,以制定日前机组调度计划。

$$\min_{\substack{P_{g,t,w}^G, r_{g,t,w}^{\text{up}}, r_{g,t,w}^{\text{down}}, \\ P_{n,t,w}^{\text{bid}}, r_{n,t,w}^{\text{up}}, r_{n,t,w}^{\text{down}}}} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \pi_{\omega} \sum_t \left( \sum_{g=1}^G \left( C_{g,t,w}^{\text{GS}} (P_{g,t,w}^G) + \lambda_{g,t,w}^{\text{GC}} (r_{g,t,w}^{\text{up}} + r_{g,t,w}^{\text{down}}) \right) - \sum_{n=1}^N \left( C_{n,t,w}^{\text{LA}} (P_{n,t,w}^{\text{bid}}) - \lambda_{n,t,w}^{\text{LAC}} (r_{n,t,w}^{\text{up}} + r_{n,t,w}^{\text{down}}) \right) \right) \quad \forall t, \omega \quad (21)$$

式中: 设共有  $G$  个传统机组参与日前市场竞价, 与负荷聚合商竞价模型  $C_{n,t,w}^{\text{LA}} (P_{n,t,w}^{\text{bid}})$  类似,  $C_{g,t,w}^{\text{GS}} (P_{g,t,w}^G)$  为传统机组  $g \in G$  申报的各段出力区间与其对应的竞标价格有关的多段线性递增函数;  $P_{g,t,w}^G$  为传统机组  $g$  日前在主能量市场的竞标出力;  $\lambda_{g,t,w}^{\text{GC}}$  为传统机组  $g$  申报的备用容量单位价格;  $r_{g,t,w}^{\text{up}}$ 、 $r_{g,t,w}^{\text{down}}$  为机组  $g$  提供的上、下备用容量。

#### 1) 节点平衡约束

$$P_{b,t,w}^G + P_{b,t,w}^{\text{re}} - \sum_{l|b \in o(l)} f_{l,t,w} + \sum_{l|b \in r(l)} f_{l,t,w} = P_{b,t,w}^{\text{bid}} + P_{b,t,w}^{\text{D0}} \quad \forall t, \omega, b \quad (22)$$

式中:  $P_{b,t,w}^{\text{D0}}$  为系统中非市场化用户的负荷需求(即非负荷聚合商签约用户, 具有刚性负荷);  $P_{b,t,w}^{\text{bid}}$  为节点  $b$  上 LA 的竞标负荷;  $P_{b,t,w}^G$  为日前节点  $b$  上的传统机组竞标出力;  $P_{b,t,w}^{\text{re}}$  为日前预测的新能源出力;  $f_{l,t,w}$  为输电线路  $l \in L$  上的线路潮流;  $b \in o(l)$  为节点  $b$  送端线路集合;  $b \in r(l)$  为节点  $b$  受端线路集合。

#### 2) 机组约束

$$G_g^{\text{min}} + r_{g,t,w}^{\text{down}} \leq P_{g,t,w}^G \leq G_g^{\text{max}} - r_{g,t,w}^{\text{up}} \quad \forall t, \omega, g \quad (23)$$

$$0 \leq r_{g,t,w}^{\text{up}} \leq R_{g,w}^{\text{RU}} \quad \forall t, \omega, g \quad (24)$$

$$0 \leq r_{g,t,w}^{\text{down}} \leq R_{g,w}^{\text{RD}} \quad \forall t, \omega, g \quad (25)$$

式中:  $G_g^{\text{max}}$ 、 $G_g^{\text{min}}$  为传统机组  $g$  的最大、最小出力;  $R_{g,w}^{\text{RU}}$ 、 $R_{g,w}^{\text{RD}}$  为传统机组  $g$  提供的最大上、下备用容量。

#### 3) 备用约束

$$\sum_{g \in G} r_{g,t,w}^{\text{up}} + \sum_{n \in N} r_{n,t,w}^{\text{down}} \geq \phi^G \sum_{b \in B} P_{b,t,w}^{\text{re}} + \phi^D \sum_{b \in B} P_{b,t,w}^{\text{D0}} \quad \forall t, \omega, b \quad (26)$$

$$\sum_{g \in G} r_{g,t,w}^{\text{down}} + \sum_{n \in N} r_{n,t,w}^{\text{up}} \geq \phi^G \sum_{b \in B} P_{b,t,w}^{\text{re}} + \phi^D \sum_{b \in B} P_{b,t,w}^{\text{D0}} \quad \forall t, \omega, b \quad (27)$$

式中:  $\phi^G$ 、 $\phi^D$  为常数, 表征新能源、负荷的备用

率;  $B$  为节点集合。式(26)、式(27)保障了系统日前备用市场出清后系统的上、下备用容量裕度可满足系统的基础备用需求。

#### 4) 系统运行约束

基于 DC-OPF 求解, 暂不考虑系统无功约束, 系统运行安全约束涵盖节点电压约束(29), 线路容量约束(30)。

$$f_{l,t,w} = B_l (\theta_{o(l),t,w} - \theta_{r(l),t,w}) \quad \forall t, \omega, l \quad (28)$$

$$\theta^{\text{min}} \leq \theta_{b,t,w} \leq \theta^{\text{max}} \quad \forall t, \omega, l \quad (29)$$

$$F_l^{\text{max}} \leq f_{l,t,w} \leq F_l^{\text{min}} \quad \forall t, \omega, l \quad (30)$$

式中:  $F_l^{\text{max}}$  为输电线路  $l$  的最大容量;  $\theta_{b,t,w}$  为系统节点电压;  $\theta^{\text{min}}$ 、 $\theta^{\text{max}}$  分别为节点电压的极小、极大值。

### 3.2 实时平衡市场出清

在日内平衡市场中, 系统运营商通过调用日前备用市场中的市场成员提供的上/下备用容量及实时平衡市场提供的上调、下调电能平衡资源, 消除由新能源出力及刚性负荷需求不确定性所引起的系统净负荷偏差, 以保障系统实时电力电量的供需平衡。日内实时平衡市场在  $t$  时刻的出清模型可表述为

$$\min_{\substack{r_{g,t,w}^{\text{up,rt}}, r_{g,t,w}^{\text{down,rt}}, r_{n,t,w}^{\text{up,rt}}, r_{n,t,w}^{\text{down,rt}}, \\ d_{t,w}^{\text{load}}, d_{t,w}^{\text{re}}, P_{n,t,w}^{\text{lm}^+}, P_{n,t,w}^{\text{lm}^-}}} \sum_{\omega=1}^{\Omega} \pi_{\omega} \left( \sum_{g=1}^G \left( \lambda_{g,t,w}^{\text{GC}} (r_{g,t,w}^{\text{up,rt}} + r_{g,t,w}^{\text{down,rt}}) + \delta_{t,w} (d_{t,w}^{\text{load}} + d_{t,w}^{\text{re}}) \right) + \sum_{n=1}^N \left( \lambda_{n,t,w}^{\text{LAC}} (r_{n,t,w}^{\text{up,rt}} + r_{n,t,w}^{\text{down,rt}}) + \lambda_{n,t,w}^{\text{B}} (P_{n,t,w}^{\text{lm}^+, \text{rt}} + P_{n,t,w}^{\text{lm}^-, \text{rt}}) \right) \right) \quad \forall t, \omega \quad (31)$$

s.t. 式(28)—式(30)

$$\sum_{g=1}^G r_{g,t,w}^{\text{down,rt}} + \sum_{n=1}^N r_{n,t,w}^{\text{up,rt}} + \sum_{n=1}^N P_{n,t,w}^{\text{lm}^+} + d_{t,w}^{\text{re}} = L_{t,w}^{\text{De}^+} \quad \forall t, \omega \quad (32)$$

$$\sum_{g=1}^G r_{g,t,w}^{\text{up,rt}} + \sum_{n=1}^N r_{n,t,w}^{\text{down,rt}} + \sum_{n=1}^N P_{n,t,w}^{\text{lm}^-} + d_{t,w}^{\text{load}} = L_{t,w}^{\text{De}^-} \quad \forall t, \omega \quad (33)$$

$$0 \leq r_{g,t,w}^{\text{up,rt}} \leq r_{g,t,w}^{\text{up}}, 0 \leq r_{n,t,w}^{\text{up,rt}} \leq r_{n,t,w}^{\text{up}} \quad \forall t, \omega, g \quad (34)$$

$$0 \leq r_{g,t,w}^{\text{down,rt}} \leq r_{g,t,w}^{\text{down}}, 0 \leq r_{n,t,w}^{\text{down,rt}} \leq r_{n,t,w}^{\text{down}} \quad \forall t, \omega, n \quad (35)$$

$$0 \leq P_{n,t,w}^{\text{lm}^-, \text{rt}} \leq P_{n,t,w}^{\text{lm}^-}, 0 \leq P_{n,t,w}^{\text{lm}^+, \text{rt}} \leq P_{n,t,w}^{\text{lm}^+} \quad \forall t, \omega, n \quad (36)$$

式中:  $L_{t,w}^{\text{De}^+}$ 、 $L_{t,w}^{\text{De}^-}$  为在  $t$  时刻的净负荷偏差量,  $L_{t,w}^{\text{De}^+}$  代表系统新能源出力过多, 需调用平衡市场上调电量、备用市场机组下备用、备用市场需求侧上备用、以及新能源弃电等手段保障系统供需平衡,  $L_{t,w}^{\text{De}^-}$  代表系统实际负荷需求较多, 需调用平衡市场下调电量、备用市场机组上备用、备用市场需求侧下备用以及削减刚性负荷的手段保障系统供需平衡;  $d_{t,w}^{\text{load}}$

为系统削负荷量;  $d_{t,w}^{re}$  为系统新能源弃电量;  $r_{g,t,w}^{up,rt}$ 、 $r_{g,t,w}^{down,rt}$ 、 $r_{n,t,w}^{up,rt}$ 、 $r_{n,t,w}^{down,rt}$  分别为传统机组  $g$  与  $LAN$  在实时参与系统调控的上、下备用容量;  $P_{n,t,w}^{lm+,rt}$ 、 $P_{n,t,w}^{lm-,rt}$  为  $LAN$  在实时平衡市场中被系统实际调用的上调、下调电能;  $\delta_{t,w}$  为系统削负荷及新能源弃电单位成本。式(34)~式(36)保证了系统运营商调用的各市场主体提供的平衡资源在各市场用户的市场出清范围内。

负荷聚合商与系统运营商在日前日内多级市场的竞标出清流程如图3所示。

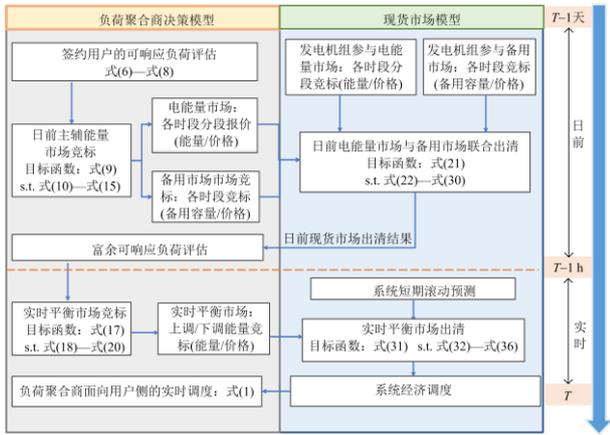


图3 日前日内市场竞标出清流程

Fig. 3 Flow chart for day-ahead/intra-day market bidding and clearing

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

基于改进的 IEEE 30 节点系统验证所构建框架的有效性,系统拓扑结构图如图 A1 所示。系统中 3 个负荷聚合商  $LA = \{LA1, LA2, LA3\}$  分别代理所在节点负荷,负荷聚合商基本参数及对应节点情况如表 A1 所示,设每个负荷聚合商在对应节点将向 1000 个具备灵活性响应能力的家庭用户提供电力;该系统配置 3 台传统机组  $G = \{G1, G2, G3\}$  与 3 台新能源机组(风机),各传统机组与新能源机组的基本参数及对应节点情况分别如表 A2、表 A3 所示,暂不考虑新能源机组参与市场。设  $T = 24$ ,日内平衡市场提前 1 h 开放,系统日前预测净负荷以及日前、实时电力价格如图 4 所示,其余价格参数如表 1 所示,取新能源备用率  $\phi^G = 0.02$ ,负荷备用率  $\phi^D = 0.01$ 。

在算例分析中,考虑以下两个场景:场景 1 为在日内新能源大发,如图 5(a)所示;场景 2 为在日内尖峰负荷突增,如图 5(b)所示。

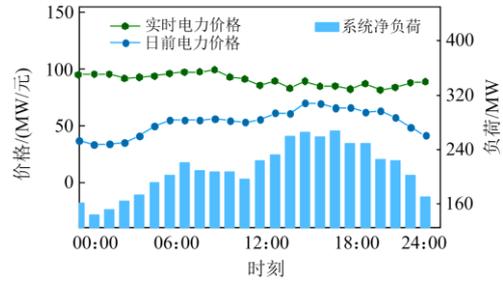


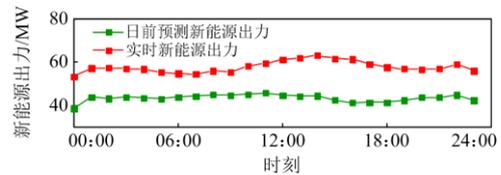
图4 系统日前预测净负荷及日前/实时电力价格

Fig. 4 Day-ahead prediction for net load and day-ahead/real-time electricity price

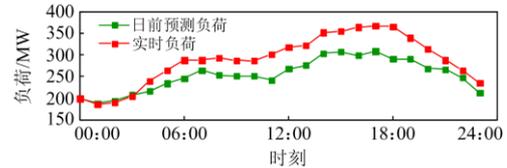
表 1 系统基本价格参数

Table 1 Parameter of system basic price

参数	$\lambda_{n,t,w}^p$	$\lambda_{n,t,w}^{div}$	$\delta_{t,w}$	$\lambda_{n,t,w}^s$
价格/(元/MWh)	100	300	500	$1.5\lambda_{n,t,w}^A$



(a) 新能源大发



(b) 负荷突增

图5 系统实时多场景

Fig. 5 System real-time multi-scenario

### 4.2 市场竞标结果

#### 4.2.1 日前市场中标结果

各负荷聚合商及传统机组在日前主能量市场和备用市场出清后的中标结果如图 6 所示。

在日前主能量市场中,由于各个负荷聚合商聚合用户的响应意愿、可控资源特性具有较大差异性,且各负荷聚合商在日前主能量市场分段竞标策略  $C_{n,t,w}^{LA}(P_{n,t,w}^{bid})$  不同,所以在主能量市场中各负荷聚合商竞标竞得量明显具有差异。同理,传统机组由于机组出力边际成本不同,在日前主能量市场竞价曲线不同,优质机组可争取到更多的出力空间,如图 6(a)所示。

在日前备用市场中,由于负荷高峰集中在下午至晚间时段,且该时段日前主能量市场历史出清价格偏高,因此该时段内负荷价格敏感性较高、可响应的负荷量较大,负荷聚合商可有效聚合较多可

调节资源参与备用市场,如图 6(b)所示。

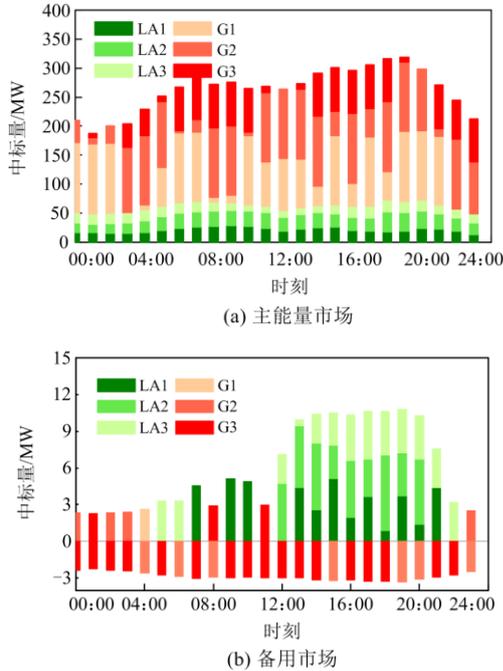


图 6 日前市场出清中标结果

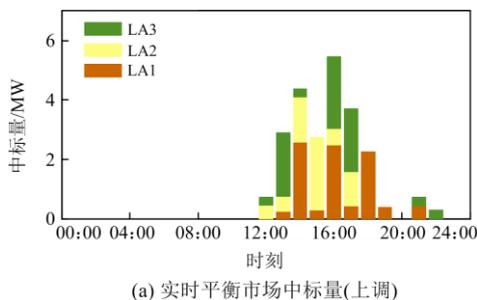
Fig. 6 Market clearing results for day ahead energy market

#### 4.2.2 各市场主体日内市场中标结果

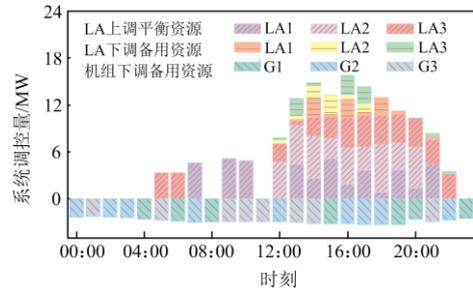
在传统机组日前调度计划既定的情况下,在部分极端场景下(如:系统供需缺额较大,超过系统日前备用容量),需进一步基于实时平衡市场挖掘各负荷聚合商的富余可调控平衡资源以维持系统电力电量平衡。

系统在不同场景下具有差异化的调节需求,如在日内新能源大发场景下(即场景 1),新能源日内实际出力较日前预测出力偏差较大且出力较多。系统运营商通过调用负荷聚合商在平衡市场中的上调平衡资源、在备用市场的上调备用容量以及传统机组在备用市场的下调备用容量,促进新能源的全面消纳,如图 7 所示。因此,各负荷聚合商在平衡市场内仅有中标的上调平衡资源,无中标的下调平衡资源,以最大化消纳新能源,如图 7(a)所示。

在日内负荷突增场景下(即场景 2),系统刚性负



(a) 实时平衡市场中标量(上调)

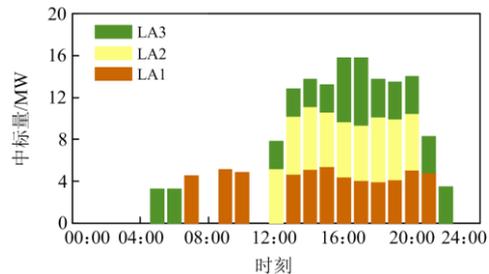


(b) 实时备用资源调用情况

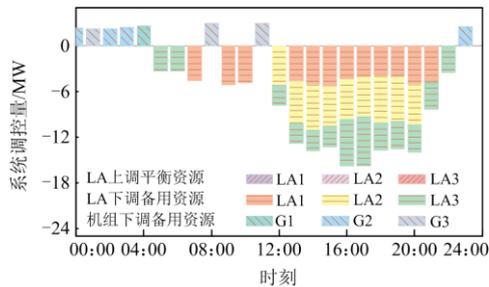
图 7 场景 1 下系统平衡资源及备用容量调用情况

Fig. 7 Regulation status for balance and reserve resource under scenario 1

荷日内实际需求较日前预测需求突增,系统电量缺额较大。系统运营商通过调用负荷聚合商在平衡市场中的下调平衡资源、在备用市场的下调备用容量传统机组在备用市场的上调备用容量,以保障电力系统的供需平衡,如图 8 所示。因此,各负荷聚合商在平衡市场内仅有中标的下调平衡资源,无中标的上调平衡资源,以避免系统削减刚性负荷,如图 8(a)所示。



(a) 日内平衡市场中标量(下调)



(b) 实时备用资源调用情况

图 8 场景 2 下系统备用容量调用情况

Fig. 8 Regulation status for balance and reserve resource under scenario 2

#### 4.3 市场主体收益对比

3 位负荷聚合商及其签约用户的收益如表 2 所示。由表 2 可得,各负荷聚合商聚合其签约用户参与多级市场后的市场经济效益显著提升,在场景 1

下3位负荷聚合商参与日前及平衡市场收益分别提升3.0%、6.5%及11.9%，各负荷聚合商签约用户的用能成本分别降低10.6%、2.6%、4.7%；在场景2下3位负荷聚合商参与日前及平衡市场收益分别提升16.5%、13.4%、25.1%，其签约用户的用能成本分别降低12.7%、4.5%、7.6%。当日系统总运行结果如表3所示，开展实时平衡市场可有效聚合负荷聚合商的富余可调节平衡资源参与市场调控，有助于大幅减少系统新能源弃电量/削负荷量以及系统运行成本。其中，场景1下在开展平衡市场情况下新能源弃电量降低15.3%、系统运行成本降低6.2%；场景2下在开展平衡市场情况下负荷削减量降低11.0%、系统运行成本降低19.3%。

表2 市场主体参与收益

Table 2 Revenue of market participants

场景	市场主体	元		
		不参与市场收益	参与日前市场收益	参与日前及平衡市场收益
场景1	LA1	15 675.9	15 457.9	16 147.3
	LA2	17 774.3	17 988.6	18 934.2
	LA3	11 568.4	12 152.3	12 948.6
	签约用户	-47 028.3	-47 341.8	-42 054.7
	签约用户	-53 321.1	-53 008.8	-51 915.34
	签约用户	-34 703.1	-35 492.9	-33 080.5
场景2	LA1	15 675.9	15 457.9	18 261.5
	LA2	17 774.3	17 988.6	20 162.3
	LA3	11 568.4	12 152.3	14 476.3
	签约用户	-47 028.3	-47 341.8	-41 034.6
	签约用户	-53 321.1	-53 008.8	-50 914.7
	签约用户	-34 703.1	-35 492.9	-32 070.8

表3 系统运行结果

Table 3 System operation results

场景	系统新能源弃电量或削负荷量/MWh		系统运行费用/元	
	无平衡市场	有平衡市场	无平衡市场	有平衡市场
场景1 (弃电量)	153.58	130.01	169 117.5	158 620.9
场景2 (削负荷量)	528.27	470.40	414 955.9	335 060.2

由表2与表3可得，所提出的日前日内多级市场框架可为负荷聚合商、终端用户与系统运营商提供一个多方共赢的市场平台，保障各市场主体的经

济收益及电力系统低成本运行。

#### 4.4 负荷聚合商调度结果

在即场景2下，各负荷聚合商典型签约用户的设备调控曲线如图9所示。由于系统电力供应缺额较大，系统运营商通过调用负荷聚合商在平衡市场与备用市场中的下调资源，以避免削减系统刚性负荷。由图6可知，负荷聚合商在日前备用市场中标种类基本为上备用，无法为系统提供下备用；负荷聚合商在实时平衡市场中标的下调电能集中在下午至夜间。因此各负荷聚合商为响应系统调控需求，基于可调控用户设备的用能属性，实现对用户设备的调度，如图9所示。

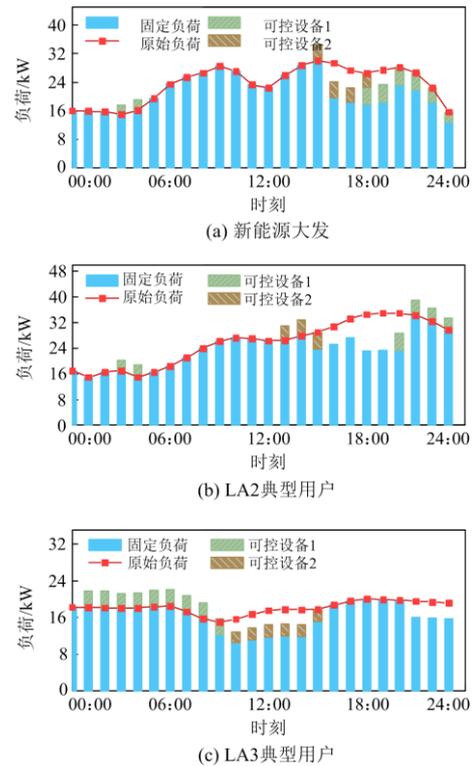


图9 用户侧设备调控模式

Fig. 9 Control scheme for end-users' device

其中典型用户可调控设备1为洗衣机等可实现离散用能的家用设备；可调控设备2为电动汽车等需在固定时间段内连续用能的设备。由图9可知，用户可控设备皆尽量避开下午与傍晚用电高峰，选择其余时段用能，积极参与至负荷聚合商的调控中。

## 5 结论

为深度挖掘用户侧灵活可响应调节资源，保障电力系统的实时供需平衡。本文通过构造完善的前主能量市场、备用市场及实时平衡市场的多级市场衔接框架，从负荷聚合商面向多级市场的市场竞

标策略出发,提出了多级耦合市场的市场出清方法及调度模型。算例进一步验证了所构建的市场框架有效性。

1) 通过建立面向负荷聚合商的用户可调控负荷感知模型,实现对分布式用户平衡资源的实时感知与精准调控,并进一步提出基于聚合资源参与多级市场的竞价模型,辅助负荷聚合商高效参与现货市场。

2) 通过构建实时平衡市场,可基于负荷聚合商有效聚合用户侧灵活平衡资源,激励用户侧调整可控设备的用能计划以响应电网调控需求,在新能源富余时为新能源消纳提供更多的上调空间,在系统缺电时为系统提供更多的下调空间。

3) 为负荷聚合商、终端用户及系统运营商提供一个互利共赢的市场交易平台,可有效协调多元主体市场化的利益关系,保障电力市场健康发展。

然而,本文暂未考虑系统无功约束对市场出清模型的影响,未来将进一步探索更多种类的无功补偿服务及其价格机制,以完善本文所提出的市场框架。

附录A

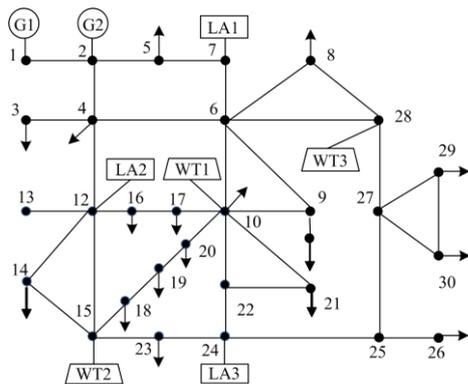


图 A1 改进的 IEEE30 节点系统及接入节点

Fig. A1 Modified IEEE30 bus system and access nodes

表 A1 负荷聚合商参数设置及接入节点

Table A1 Parameter setting of load aggregators and access nodes

市场主体	LA1	LA2	LA3
$d_{n,w}/\%$	30	40	25
$\lambda_{n,r,c}^{bid}$	[30, 50, 70, 90]	[25, 50, 75, 100]	[35, 50, 65, 80]
接入节点	7	12	24

表 A2 火电机组参数设置及接入节点

Table A2 Parameter setting of thermal units and access nodes

市场主体	G1	G2	G3
$P^{max}/MW$	120	120	75
接入节点	1	2	22

表 A3 新能源机组参数设置及接入节点

Table A3 Parameter setting of wind turbine and access nodes

市场主体	WT1	WT2	WT3
$P^{max}/MW$	120	80	80
接入节点	10	15	28

参考文献

[1] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.

[2] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1-8.  
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, et al. Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1-8.

[3] 孙可, 兰洲, 林振智, 等. 国际典型电力市场阻塞管理机制及其对中国的启示研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 170-178.  
SUN Ke, LAN Zhou, LIN Zhenzhi, et al. Transmission congestion management mechanism of typical international power markets and possible guidance for China's power market[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 170-178.

[4] 唐杰, 吕林, 叶勇, 等. 多时间尺度下主动配电网源-储-荷协调经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 53-64.  
TANG Jie, LÜ Lin, YE Yong, et al. Source-storage-load coordinated economic dispatch of an active distribution network under multiple time scales[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 53-64.

[5] 丁一, 惠红勋, 林振智, 等. 面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 2-9.  
DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 2-9.

[6] BRUNINX K, PANDŽIĆ H, LE CADRE H, et al. On the interaction between aggregators, electricity markets and residential demand response providers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(2): 840-853.

[7] YANG H, ZHANG S, QIU D, et al. Distributionally robust optimal bidding of controllable load aggregators in the electricity market[J]. IEEE Transactions on Power

- Systems, 2018, 33(1): 1089-1091.
- [8] HU J, CAO J, GUERRERO J M, et al. Improving frequency stability based on distributed control of multiple load aggregators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1553-1567.
- [9] 程林, 万宇翔, 张放, 等. 基于负荷聚合商业业务的空调服务运作模式及控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 8-16.  
CHENG Lin, WAN Yuxiang, ZHANG Fang, et al. Operation mode and control strategy for air-conditioning service based on business of load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 8-16.
- [10] 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.
- [11] PANDŽIĆ H, KUZLE I, CAPUDER T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization[J]. Applied Energy, 2013, 101: 134-141.
- [12] 余爽, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑不确定性因素的虚拟电厂竞标模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 43-49.  
YU Shuang, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 43-49.
- [13] 邹鹏, 陈启鑫, 夏清, 等. 国外电力现货市场建设的逻辑分析及对中国的启示与建议[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 18-27.  
ZOU Peng, CHEN Qixin, XIA Qing, et al. Logical analysis of electricity spot market design in foreign countries and enlightenment and policy suggestions for China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 18-27.
- [14] 贺宜恒, 周明, 武昭原, 等. 国外典型电力平衡市场的运作模式及其对中国的启示[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3520-3528.  
HE Yiheng, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Study on operation mechanism of foreign representative balancing markets and its enlightenment for China[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3520-3528.
- [15] 张馨瑜, 陈启鑫, 葛睿, 等. 考虑灵活块交易的电力现货市场出清模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 35-41.  
ZHANG Xinyu, CHEN Qixin, GE Rui, et al. Clearing model of electricity spot market considering flexible block orders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 35-41.
- [16] California Independent System Operator. Addendum-draft final technical appendix-flexible ramping product[R]. 2016.
- [17] MISO. Ramp product questions and answers[EB/OL]. [2016-03-31]. <https://www.misoenergy.org/Library/Repository/Communication%20Material/Strategic%20Initiatives/Ramp%20Product%20Questions%20and%20Answers.pdf>.
- [18] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.  
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [19] 江涵, 岳程燕, 严兴煜, 等. 高比例可再生能源系统惯量约束对灵活性分析的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 44-51.  
JIANG Han, YUE Chengyan, YAN Xingyu, et al. Influence of system inertia on flexibility resource analysis for an interconnection system with a high proportion of intermittent renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 44-51.
- [20] 薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 19-28.  
XUE Chen, REN Jing, MA Xiaowei, et al. Mechanism of peak regulation auxiliary electricity market in the presence of high-penetration renewable energy and its practice in northwest China[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 19-28.
- [21] MING Hao, XIA Bainan, LEE K Y, et al. Prediction and assessment of demand response potential with coupon incentives in highly renewable power systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 14-27.
- [22] Survey on ancillary services procurement, balancing market design 2016[EB/OL]. <https://docstore.entsoe.eu/publications/market-reports/ancillary-services-survey/Pages/default.aspx>.
- [23] 汪宁渤, 马明, 强同波, 等. 高比例新能源电力系统的发展机遇、挑战及对策[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 29-35, 50.  
WANG Ningbo, MA Ming, QIANG Tongbo, et al. High-penetration new energy power system development: challenges, opportunities and countermeasures[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 29-35, 50.

收稿日期: 2022-01-08; 修回日期: 2022-05-06

作者简介:

程松(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度、电力通信调度运行及检修管理; E-mail: 2399212921@qq.com

刘友波(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统数据科学与人工智能技术, 售电市场与能效。E-mail: liuyoubo@scu.edu.cn

(编辑 周金梅)