

# 面向精准调控的负荷聚合商需求响应性能评价与 市场出清方法

刘小天<sup>1,2</sup>, 漆淘懿<sup>1,2</sup>, 惠红勋<sup>1,2</sup>

(1. 智慧城市物联网国家重点实验室(澳门大学), 澳门 999078; 2. 横琴粤澳深度合作区澳门大学高等研究院  
(横琴澳门大学高等研究院), 广东 珠海 519000)

**摘要:** 含高比例新能源的新型电力系统亟需增强灵活调节能力, 从而满足系统的安全稳定运行要求。海量负荷侧资源通过负荷聚合商的协调优化, 能够参与需求响应市场并提供可观的调节容量。然而, 在市场出清过程中, 负荷聚合商的响应精准度未能得到充分体现, 不仅阻碍了电力系统筛选优质的需求响应资源, 也难以激励负荷聚合商主动提升响应精准度。为此, 提出了一种面向精准调控的负荷聚合商性能评价和市场出清方法, 旨在为电力系统筛选优质的需求响应资源。首先, 基于响应偏差提出了考虑短期和长期影响的综合响应精准度指标, 以评估负荷聚合商的响应性能。然后, 设计了一种考虑综合响应精准度指标的市场出清方法和价格形成机制, 在市场出清过程中筛选高响应精准度的负荷聚合商。最后, 通过算例分析验证了所提方法的有效性, 其不仅提升了优质负荷聚合商在市场出清中的竞争力, 同时降低了电力系统实现精准负荷调控的总费用。

**关键词:** 负荷聚合商; 需求响应; 电力市场; 出清机制; 精准响应

## Demand response performance evaluation and market clearing method for load aggregator towards precision regulation

LIU Xiaotian<sup>1,2</sup>, QI Taoyi<sup>1,2</sup>, HUI Hongxun<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (University of Macau), Macau 999078, China;  
2. University of Macau Advanced Research Institute in Hengqin, Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** To meet the security and stability requirements of new power systems with high shares of renewable energy, it is essential to enhance system flexibility. Large-scale flexible loads can be aggregated and optimized by load aggregators (LAs) to participate in demand response (DR) markets and provide substantial regulation capacity. However, the response precision of LAs is not fully considered during market clearing, hindering the power system from effectively identifying high-quality flexible DR resources and failing to incentivize aggregators to improve their precision. To address this issue, this paper proposes a performance evaluation and market clearing method for LAs with an emphasis on precision regulation, aimed at enabling power systems to select high-quality DR resources. First, based on the deviations of LAs, a comprehensive response precision index that considers both short-term and long-term impacts is established to assess LAs' performance. Then, the comprehensive index is integrated into the market clearing method and price mechanism to prioritize aggregators with higher response precision in the clearing process. Finally, case studies are conducted to validate the effectiveness of the proposed method, demonstrating that LAs with high-quality performance gain a competitive edge in future market clearings, while simultaneously reducing the overall costs of the power system to achieve precise load regulation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52407075).

**Key words:** load aggregators; demand response; electricity markets; market clearing method; precision response

## 0 引言

随着“双碳”目标的持续推动, 中国正在经历

快速的能源转型, 能源结构发生了显著变化<sup>[1-3]</sup>。2024年中国新能源装机容量已经超过火电机组<sup>[4]</sup>, 其高间歇性和强波动性给电力系统的安全稳定运行带来了严峻挑战。传统机组的灵活性在维持电力系统稳定运行方面发挥了重要作用, 但其在能源结构中已不足40%的比重难以满足系统的动态调节需

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52407075); 澳门特别行政区科学技术发展基金项目资助(001/2024/SKL)

求<sup>[5]</sup>。海量负荷侧资源能够主动调节用电需求以应对新能源的不确定性,“荷随源动”将成为新型电力系统的一种重要运行方式。因此,开发和利用负荷侧资源以增强电力系统的动态调节能力迫在眉睫<sup>[6]</sup>。

需求响应通过激励消费者在电力高峰期调整其原有的用电行为来平衡电力供需,以保证电网安全稳定运行<sup>[7-10]</sup>。然而,数量庞大的负荷侧资源受限于较小的单体容量,难以直接参与需求响应<sup>[11]</sup>。负荷聚合商通过对各类负荷侧资源的聚合调控<sup>[12-13]</sup>,打破了负荷侧资源参与需求响应的壁垒<sup>[14]</sup>。例如,文献[15]提出了一种面向负荷聚合商的经济调度优化方法,通过多种负荷侧资源的协调管理降低了4.47%的运营成本。

随着中国电力市场改革的不断深化,需求响应市场化交易成为负荷侧资源调用的重要方式。当前需求响应市场的机制研究主要集中在价格机制设计、竞标机制设计以及出清方法设计上。价格机制通过价格变动来反映电力供需关系,传递市场信息<sup>[16-17]</sup>。设计与中国电力市场改革相互协同的价格机制,能够显著提高电力系统的运行效率和经济性<sup>[18]</sup>。竞标机制为负荷聚合商提供表达自身价格和容量预期的机会<sup>[19]</sup>,如文献[20]对建筑虚拟电厂参与需求响应的报量报价机制进行探讨,在持续激励建筑和虚拟电厂市场参与积极性的同时,保证了两者的可靠收益。合理的竞标机制为市场出清提供了决策依据,也为出清机制的发展夯实了基础<sup>[21]</sup>。

现有的出清方法研究主要集中在机制设计上,例如,文献[22]提出了传统调峰机组与第三方市场主体的联合出清市场机制,将传统调峰市场的出清价格向第三方市场主体传导,实现资源优化配置,为资源的进一步分配奠定基础。在此基础上,更多的资源特性也在市场出清机制中被考虑,文献[23]将储能的运行损耗计入市场出清机制中,设计了改进的等效循环寿命模型。随着研究的推进,基于评估后特性的出清策略开始出现。现已有考虑电能质量、可信容量等指标的出清方法<sup>[24-25]</sup>,但电能质量侧重于电能的物理特性,可信容量侧重于虚拟电厂在一定可接受概率下评价自身的调节潜力,暂未有指标在市场出清方法中关注到实际运行中的响应偏差。

由于负荷固有的不确定性,需求响应偏差难以完全消除,负荷聚合商需要合理配置资源以消除响应偏差<sup>[26-27]</sup>。然而,不同精准度负荷聚合商的响应性能表现在市场出清时难以得到有效区分,阻碍了负荷聚合商优化响应性能、提高精准度的意愿。此外,市场出清方法作为实现资源优化配置的关键方

法,当前针对精准响应并结合市场出清方法的研究尚不充分<sup>[28-29]</sup>,筛选优质需求响应资源及激励负荷聚合商主动提高响应性能的过程面临挑战。

为了筛选拥有优质响应性能的负荷聚合商,同时激励负荷聚合商主动提升其响应性能,本文首先构建了基于负荷聚合商响应偏差的综合响应精准度指标,以评估负荷聚合商参与调控的响应性能;然后,将精准度指标与市场出清方法结合,实现了在市场出清过程中筛选出能够完成高精度需求响应的负荷聚合商,并保证该类负荷聚合商在市场出清时更有竞争力;最后,在算例分析中对比了响应精准度对负荷聚合商响应性能的敏感程度,证明了所提市场出清方法在筛选优质负荷聚合商和降低电网总费用方面的有效性。

## 1 负荷聚合商参与需求响应市场出清架构

需求响应的实施通常包括事前预测、需求确认、市场申报、市场出清、响应执行、响应评价和响应结算等环节。其中,响应评价和市场出清为需求响应的重要环节。但在现有需求响应市场中,响应评价环节为单一的容量评价,且与市场出清环节独立运行。

本文将单一的容量评价扩展为容量和响应精准度双重评价。在市场出清环节,电力系统利用响应精准度指标,在下一次市场出清时识别并选择负荷聚合商。

需求响应的实施需要多个主体的相互配合,本文中负荷聚合商参与需求响应市场的出清框架包括电力系统、负荷聚合商和用户3个主体,如图1所示。3个主体的职责分别如下:

电力系统通过分析没有进行需求响应和有序用电的历史负荷来确定基线负荷。然后对未来的电力负荷需求进行预测,以确定需求响应量。在市场出清后,电力系统对负荷聚合商参与需求响应的响应精准度进行评估,其以价格的形式反馈至出清环节中,保证拥有优质响应性能的负荷聚合商在市场出清时更有竞争力。

负荷聚合商通过整合多样化的灵活负荷资源,参与需求响应市场。在参与需求响应市场出清的过程中,负荷聚合商作为用户和电力系统的中间枢纽,向下调度用户负荷,并根据用户提供的调节能力提供收益;向上作为交易单元参与需求响应,获取响应补贴。

用户不仅是电力的消耗者,也是需求响应市场的重要参与者。用户利用空调、电动汽车、照明、电热装置等多种可调灵活负荷,通过负荷聚合商向

电网提供调节容量, 以获得需求响应收益。在电力需求高峰期, 不同的负荷资源根据自身响应特性, 以不同形式参与需求响应。例如, 电动汽车可通过改变自身的充电时段, 以转移充电时段的形式参与需求响应; 空调、照明等可通过调整自身的用电需求, 以削减负荷的形式参与需求响应。

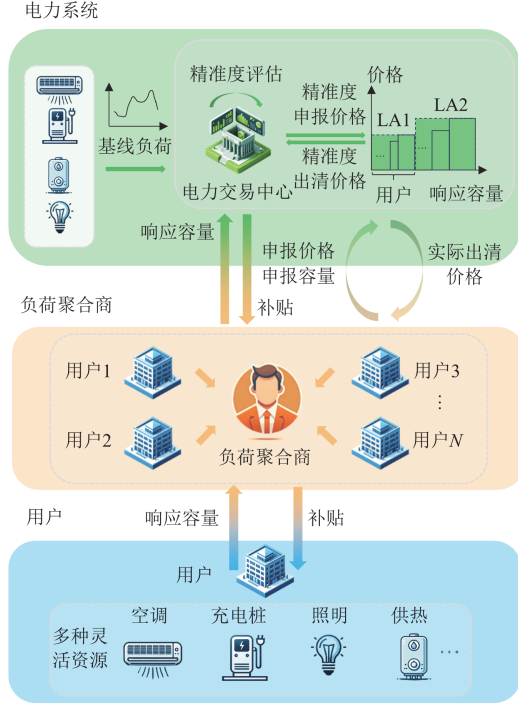


图1 含负荷聚合商的市场出清架构

Fig. 1 Market clearing architecture with LAs

各主体之间通过信息流和电力流的传递, 完成能量交换、精准度评估和收益结算。在市场出清环节中各司其职、相互协同, 精准实施需求响应。

## 2 负荷聚合商响应性能评估和市场出清方法研究

### 2.1 负荷聚合商响应容量评估

为确保需求响应实施效果, 同时为本文所提市场出清方法提供响应性能判断依据, 根据《广东省市场化需求响应实施细则》<sup>[30]</sup>和《江苏省电力需求响应实施细则》<sup>[31]</sup>, 本文评估了负荷聚合商参与需求响应的有效响应容量, 并在此基础上与偏差结合评估了响应精准度。

以 15 min 为一个时间步长, 在单位时间步长内, 实际响应容量  $Q_{act}^i$  由基线负荷  $Q_{base}^i$  与实际测量负荷  $Q_{mes}^i$  之差决定,  $i$  表示负荷聚合商序号。实际测量负荷指在实际运行过程中, 由电表等功率测量设备测量得到的负荷。

$$Q_{act}^i = Q_{base}^i - Q_{mes}^i \quad (1)$$

单位时间步长内有效响应容量  $Q_{eff}^i$  由实际响应容量  $Q_{act}^i$  根据响应类型不同结算而得。根据实际响应容量和中标响应容量  $Q_{bid}^i$  的差值, 分为不同响应类型, 并设置不同的有效响应容量结算机制, 如表1所示。当实际响应容量小于等于中标响应容量的80%时, 该次响应被视为无效响应; 当实际响应容量大于中标响应容量的120%时, 该次响应的有效响应容量按照申报容量的120%计算<sup>[31]</sup>。

表1 有效响应容量结算机制<sup>[31]</sup>

Table 1 Effective corresponding capacity settlement mechanism<sup>[31]</sup>

响应区间	响应类型	有效响应容量 $Q_{eff}^i$
$0 < Q_{act}^i \leq \mu_{low} Q_{bid}^i$	无效响应	0
$\mu_{low} Q_{bid}^i < Q_{act}^i \leq \mu_{up} Q_{bid}^i$	有效响应	$Q_{act}^i$
$\mu_{up} Q_{bid}^i < Q_{act}^i < \infty$	有效响应	$Q_{bid}^i \times k_{eff}$

表1中:  $\mu_{low}$  为有效响应参考下限, 可取80%;  $\mu_{up}$  为有效响应参考上限, 可取120%;  $k_{eff}$  为有效响应容量惩罚因子, 可取120%。

### 2.2 负荷聚合商响应偏差和精准度评估

当负荷聚合商完成一次需求响应后, 电力系统对当次需求响应有效响应容量与申报容量之间的偏差容量  $C_{dev}^i$  进行评估, 其用于计算负荷聚合商的响应精准度, 如式(2)所示。

$$C_{dev}^i = C_{bid}^i \delta^i \quad (2)$$

式中:  $\delta^i$  为偏差;  $C_{bid}^i$  为中标响应容量, 即出清成功负荷聚合商的申报响应容量。

利用偏差可完成单次响应的精准度评估。然而, 单次响应精准度仅反映了负荷聚合商最近一次的响应情况, 受负荷聚合商固有的偶然性影响, 并不能充分展现负荷聚合商响应性能。因此, 为减少偶然性因素的影响, 充分反映响应性能, 本文构建了综合响应精准度, 其构建原理如图2所示。

1) 单次响应精准度指标  $S_{acc}^i$ : 由有效响应容量  $C_{eff}^i$  与中标响应容量  $C_{bid}^i$  之间的偏差计算得到, 有效响应容量为单次需求响应连续时间段内  $Q_{eff}^i$  之和, 如式(3)所示。同时, 由于初次参与市场出清的负荷聚合商没有历史数据, 为该类型负荷聚合商的精准度指标设置初始性能下限  $S_{acc,min}$ 。偏差  $\delta^i$  的计算如式(4)所示, 单次响应精准度指标  $S_{acc}^i$  的计算如式(5)所示。

$$C_{eff}^i = \sum Q_{eff}^i \quad (3)$$

$$\delta^i = \left| \frac{C_{\text{eff}}^i}{C_{\text{bid}}^i} - 1 \right| \quad (4)$$

$$S_{\text{acc}}^i = \begin{cases} S_{\text{acc,min}} & \text{if } n = 0 \\ \max(S_{\text{acc,min}}, (1 - \delta^i)) & \text{if } n > 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中：\$n\$ 为负荷聚合商参与市场出清的总次数。

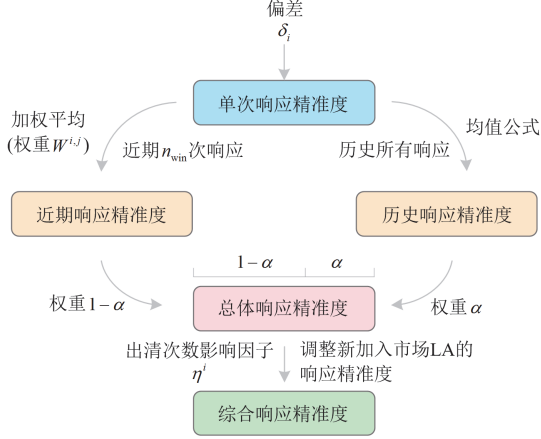


图2 综合响应精准度构建原理

Fig. 2 Principles of integrated response precision construction

2) 近期响应精准度指标  $S_{\text{acc,avg}}^i(n)$ ：为反映短期出清情况，设计随出清时刻实时更新的时间窗口函数，其长度为  $n_{\text{win}}$ 。以加权综合指数代表时间窗口下近期响应精准度指标，如式(6)所示。

$$S_{\text{acc,avg}}^i(n) = \frac{\sum_{j=1}^m W^{i,j} S_{\text{acc}}^{i,j}}{\sum_{j=1}^m W^{i,j}} \quad (6)$$

式中： $m$  为近期  $n_{\text{win}}$  次响应中负荷聚合商参与市场出清的次数； $S_{\text{acc}}^{i,j}$  为第  $i$  个负荷聚合商第  $j$  次响应的

单次响应精准度； $W^{i,j}$  为第  $i$  个负荷聚合商在时间窗口内第  $j$  次响应的权重。

在负荷聚合商参与市场出清时，距离该时间点较远的响应精准度指标对当前出清的影响相对较小，而较近的响应精准度指标对当前出清具有更大的影响， $W^{i,j}$  计算方式如式(7)所示。

$$W^{i,j} = \begin{cases} \gamma^{m-j} & \text{if } m \geq j \\ 1 & \text{if } m < j \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\gamma^{m-j}$  为时间折扣因子。

3) 历史响应精准度指标  $S_{\text{acc,cum}}^i(n)$ ：在评估长期出清情况时，为综合考虑历史每一次响应的精准度，本文设计了历史响应精准度指标。利用单次响应精准度平均值反映负荷聚合商的历史响应表现，如式(8)所示。

$$S_{\text{acc,cum}}^i(n) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S_{\text{acc}}^i(k) \quad (8)$$

4) 总体响应精准度指标  $S_{\text{acc,total}}^i(n)$ ：为同时平衡近期响应精准度的短期敏感性和历史响应精准度的长期稳定性，本文设计总体响应精准度指标，旨在更加全面且稳定地评估负荷聚合商响应精准度，如式(9)所示。

$$S_{\text{acc,total}}^i(n) = \alpha S_{\text{acc,cum}}^i(n) + (1 - \alpha) S_{\text{acc,avg}}^i(n) \quad (9)$$

式中： $\alpha$  为历史表现的权重，用于权衡历史响应精准度和近期响应精准度。

如图3所示，当负荷聚合商出现偏差过大的情况时，单次响应精准度出现较大波动，而总体响应精准度波动较小。同时，总体响应精准度指标在此后多次均低于单次响应精准度指标，说明其具有对历史响应情况的长期记忆。

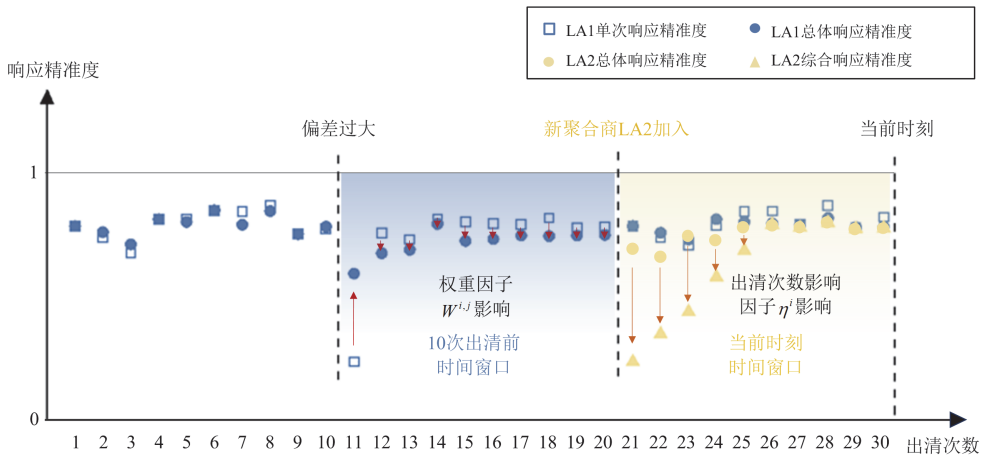


图3 响应精准度在不同情景下对负荷聚合商的影响

Fig. 3 Impacts of response precision on LAs under different scenarios



5) 综合响应精准度指标  $S_{acc,last}^i$  : 新参加需求响应负荷聚合商固有不确定性, 其初始参与出清的几次需求响应精准度指标参考价值有限。因此, 引入出清次数影响因子  $\eta^i$  以合理调整初期精准度指标的影响, 如图 3 中新负荷聚合商加入的情况所示, 计算方式如式(10)和式(11)所示。

$$S_{acc,last}^i(n) = \eta^i S_{acc,total}^i(n) \quad (10)$$

$$\eta^i = \begin{cases} \frac{n_{lim} + n}{2n_{lim}} & \text{if } 0 \leq n < n_{lim} \\ 1 & \text{if } n \geq n_{lim} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $n_{lim}$  为判断是否为初期响应的出清次数阈值。

### 2.3 考虑响应精准度的需求响应市场出清方法

负荷聚合商参与市场出清时, 需先将报价提交

至电力系统, 电力系统按照满足需求容量且负荷聚合商全量中标的原则开展市场出清, 以确定在当前市场条件下的最优供需匹配方案。本文中电力系统根据负荷聚合商申报价格从低到高进行排序, 当负荷聚合商申报容量总值达到出清容量时, 取当前负荷聚合商申报价格为出清价格, 此方法在下文中被称为常规出清模型。

在常规出清模型中, 负荷聚合商历史响应情况与当前出清无关联性, 其无需对历史响应的偏差负责, 不利于激励负荷聚合商主动提升其响应性能。本文在常规出清模型的基础上, 引入综合精准度指标作为附加价格, 使拥有优质响应性能的负荷聚合商在市场出清时更有竞争力, 以此激励负荷聚合商主动提升响应精准度。其运行机理如图 4 所示。

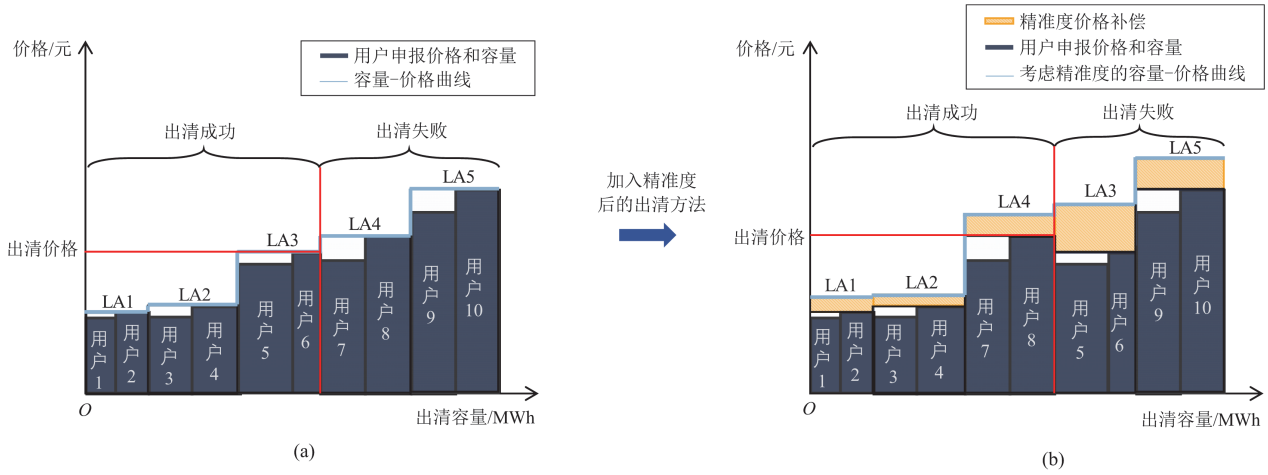


图 4 基于精准度出清价格的市场出清方法运行机理

Fig. 4 Operational mechanism of a market clearing method based on precision-driven clearing prices

本文出清模型基于申报价格  $\lambda_{bid}^i$ , 通过  $S_{acc,last}^i$  以反比的形式构建负荷聚合商精准度价格补偿  $\lambda_{add}^i$ , 如式(12)所示。精准度价格补偿越低, 出清时负荷聚合商竞争力越大。

$$\lambda_{add}^i = \lambda_{bid}^i (1 - S_{acc,last}^i(n)) k_{add} \quad (12)$$

式中:  $k_{add}$  为精准度价格补偿惩罚因子。

结合精准度价格补偿与负荷聚合商申报价格, 计算精准度申报价格  $\lambda_{ref,bid}^i$ , 其被电力系统视为参考过往响应精准度情况后的申报价格, 如式(13)所示。

$$\lambda_{ref,bid}^i = \lambda_{bid}^i + \lambda_{add}^i \quad (13)$$

电力系统将负荷聚合商精准度申报价格从低到高排序, 遵循常规出清模型的容量出清方式, 以确定精准度出清价格  $\lambda_{ref,cl}$ 。然而, 由于精准度出清价格相较于常规出清模型中的出清价格存在一定价格

补偿, 精准度出清价格不作为最终结算时的出清价格。电力系统根据上文提出的出清模型出清, 将出清成功的负荷聚合商以其申报价格重新排序, 视最大的申报价格为重排后出清价格  $\lambda_{act,cl}$ , 其运行机理如图 4 所示, 计算方式如式(14)所示。

$$\lambda_{act,cl} = \max_{i \in A_{suc}} \lambda_{bid}^i \quad (14)$$

式中:  $A_{suc}$  为出清成功负荷聚合商的集合。

为量化本文出清方法下负荷聚合商的偏差容量对电力系统运行的潜在影响, 以实际响应容量  $C_{act}^i$  与申报响应容量之间的方差  $\sigma^2$  作为偏差容量的度量指标, 如式(15)所示。

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{act}^i - C_{bid}^i)^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{dev}^i)^2}{N} \quad (15)$$

式中:  $N$  为负荷聚合商总数。

### 3 算例分析

#### 3.1 参数设置

为验证所提出清方法的有效性,本文通过算例仿真的形式分析了负荷聚合商的响应偏差、响应性能和电网总费用。由于用户申报容量和价格存在随机性,负荷聚合商申报容量和价格在每次参与市场时呈现不同。算例中设置 500 个用户,所有用户的申报容量均服从正态分布,正态分布的均值  $\mu$  服从随机均匀分布,其单位为 kWh。为保证负荷聚合商聚合用户的随机性,设定每个负荷聚合商由 3~20 个随机用户组成,共计 50 个负荷聚合商。负荷聚合商的申报价格服从随机均匀分布,负荷聚合商申报容量为其聚合所有用户申报容量之和。取偏差  $\delta^i$  的范围为  $[0, \delta_{\max}^i]$ ,  $\delta_{\max}^i$  表示第  $i$  个负荷聚合商的最大偏差。

偏差根据式(2)一式(4)计算,实际响应容量由偏差与申报响应容量之和来模拟。算例中完成 10 次出清,每次出清时申报容量和实际响应容量的均值如图 5 所示。图 5 将所有负荷聚合商视作统一整体,利用偏差表示实际响应容量的随机性。

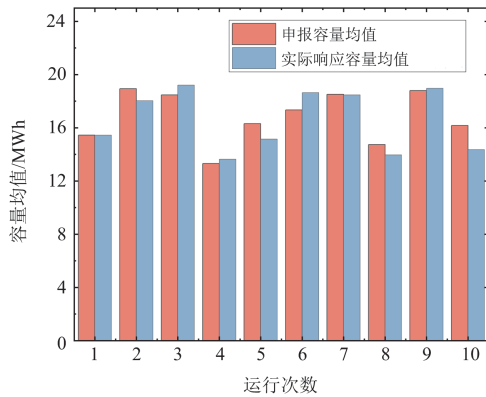


图 5 申报容量和实际响应容量的均值

Fig. 5 Average values of bidding capacity and actual response capacity

本文在算例中设定两个场景,场景 1 根据常规出清模型开展出清,场景 2 考虑响应精准度指标,以本文提到的出清方法开展出清,如表 2 所示。

表 2 两种出清场景参数描述

Table 2 Parameter descriptions of two clearing scenarios

	场景 1	场景 2
出清容量/MWh	300	300
出清依据	申报价格	精准度申报价格
精准度价格补偿	无	有
出清价格	出清价格	重排后的出清价格

#### 3.2 市场出清方法对比

图 6 展示了不同场景下出清成功负荷聚合商的方差。由图可知,场景 2 出清成功负荷聚合商的方差略低于场景 1 出清成功负荷聚合商的方差,且在方差较大时不同场景效果差异更大。尽管在每次响应过程中,负荷聚合商的申报容量和实际响应容量之间存在一定随机偏差,但在本文市场出清方法的限制下,方差平均下降了 6.0%,说明电力系统能在出清过程中筛选响应更为精准的负荷聚合商。

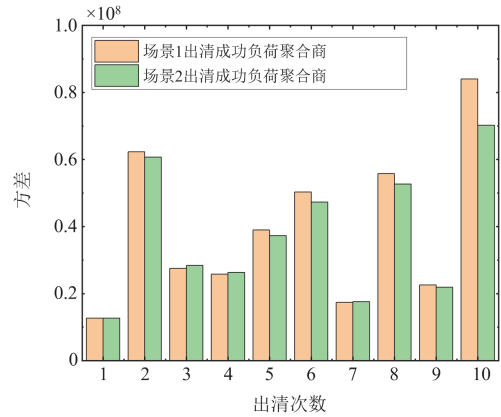


图 6 不同场景下出清成功负荷聚合商的方差

Fig. 6 Variance in clearing success of LAs across scenarios

为验证优质响应性能的负荷聚合商在市场出清时更有竞争力,在算例中设置 3 个负荷聚合商,它们的最大偏差  $\delta_{\max}$  分别为 0.2、0.4 和 0.6,代表 3 种不同响应性能的负荷聚合商,其 10 次市场出清后响应精准度指标规律如图 7 所示。随着最大偏差  $\delta_{\max}$  的减小,即响应性能的提高,响应精准度指标的值逐渐升高。说明优质响应性能的负荷聚合商的响应精准度指标也较高,在利用本文出清方法参与出清时更占优势;反之,电力系统也可利用精准度指标为依据,判断负荷聚合商的响应性能。这促使负荷聚合商通过主动提升自身响应性能来提升响应精准度,以增加其市场中标的机会。需要注意的是,图 7 的精准度指标为从小到大重排所得,图中出清次数仅为次数记录,不与实际出清情况对应。

由于出清价格直接影响电网收益,为了更准确地观察出清价格,将出清次数增加至 100,出清价格、重排后出清价格和精准度出清价格的分布规律如图 8 所示。场景 1 情景下生成的出清价格的均值和中位数(约为 1660 元/MWh),稍低于场景 2 情景下重排后出清价格的均值和中位数。说明所提出的方法略微提高了出清价格,意味着相比于场景 1 的方法,电力系统将支付更多的需求响应补贴费用。

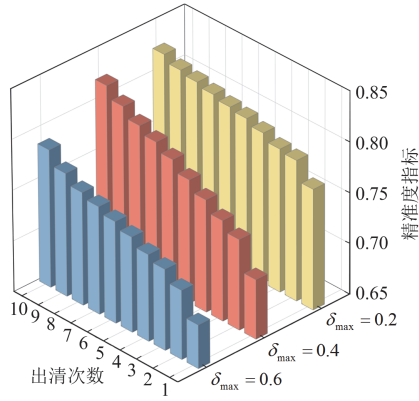


图7 不同响应性能负荷聚合商的响应精准度指标

Fig. 7 Response precision metrics for LAs with varying performance characteristics

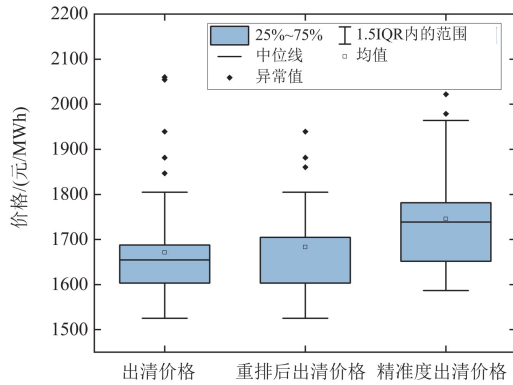


图8 不同出清方法的价格分布

Fig. 8 Distributions of clearing price using different methods

尽管本文所提方法产生了额外的补贴费用,但是更精准的响应有利于减少电网实时的调控费用。假设所有的响应偏差均需要电力系统调用实时的需求响应资源来消除,以此来评估电力系统的总费用。由下文计算可知,实时需求响应的费用远大于出清价格上涨产生的费用。因此,在实际场景中,采用本方法可以减少电网实施需求响应的总费用。

响应费用  $R_{\text{cost}}^i$  由连续时间段内负荷聚合商为电力系统需求响应提供的有效响应容量按出清价格  $\lambda_{\text{cl}}^i$  计算。完成一次市场出清后,响应费用  $R_{\text{cost}}^i$  计算方式如式(16)所示。

$$R_{\text{cost}}^i = C_{\text{eff}}^i \lambda_{\text{cl}}^i \quad (16)$$

将算例中多次出清时出清价格的均值作为日前响应价格,可计算得出电网总费用下降了1.13%。实时需求响应补贴、可调节负荷补贴和容量补贴计算方法分别如式(17)~式(19)所示,其他相关容量和价格如表3所示。

$$R_{\text{total}}^i = R_{\text{load}}^i + R_{\text{cap}}^i \quad (17)$$

$$R_{\text{load}}^i = \lambda_{\text{load}} C_{\text{eff}}^i \quad (18)$$

$$R_{\text{cap}}^i = \lambda_{\text{cap}} C_{\text{eff}}^i k_{\text{eva}} \quad (19)$$

式中:  $R_{\text{total}}^i$  为实时需求响应补贴;  $R_{\text{load}}^i$  为可调节负荷补贴;  $R_{\text{cap}}^i$  为容量补贴;  $\lambda_{\text{load}}$  为需求响应价格;  $\lambda_{\text{cap}}$  为容量补贴价格;  $k_{\text{eva}}$  为考核因子。

表3 不同场景下的电网总费用<sup>[31]</sup>Table 3 Total grid costs under different scenarios<sup>[31]</sup>

	场景 1	场景 2
实际响应容量/kWh	248 536	250 639
偏差容量/kWh	51 463	49 360
日前响应价格/(元/kWh)	1.66	1.67
实时响应价格/(元/kWh)	2	2
容量补贴/(元/kW)	10	10
考核系数	0.5	0.5
总费用/元	772 812	764 092

### 3.3 敏感性分析

为验证不同响应精准度指标在评估负荷聚合商响应行为方面的表现,在算例中加入了一组对比实验,模拟负荷聚合商在50次响应中的表现,并分别计算4种响应精准度。对4种精准度指标进行分析,针对长期响应失准和短期响应失准两种场景,分别计算4种响应精准度。

1) 长期失准。此场景模拟了负荷聚合商在面对外部环境持续变化、市场条件改变、模型偏差无法修正或者硬件和通信故障等原因时,其响应长期失准的情况。此场景中,负荷聚合商在前20次响应中响应性能较好,在20次响应后性能迅速下降至一定值并保持稳定。

2) 短期失准。此场景模拟了负荷聚合商在遭遇外部突发事件或内部短期策略调整失败的情况时,其响应能力短时间下降,并在一段时间后调整自身的响应性能回到原始状态的情况。此场景中,负荷聚合商在前20次响应中响应性能较好,在第21~25次响应中响应失准,之后负荷聚合商迅速调整,在第26次响应后,响应性能恢复到起始水平。

如图9所示,4种响应精准度的特点如下:(1) 单次响应精准度适合跟踪具体响应的即时情况,但其对每次响应的波动过于敏感,无法反映历史长期表现;(2) 近期响应精准度拥有快速跟踪近期响应的能力,但其容易受到短期波动的影响,缺乏对整体趋势的稳定评估;(3) 历史响应精准度虽然在长期表现上较为稳定,但对短期变化的反应较为迟缓,难以快速跟踪市场的短期波动;(4) 总体响应精准度平衡了近期响应精准度的短期敏感性和历史响应精准度



的长期稳定性, 在 4 个评估指标中表现最全面。

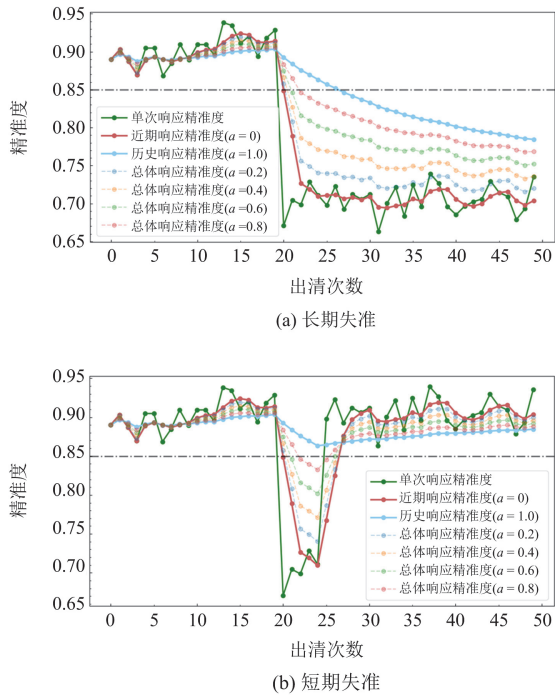


图 9 不同权重因子下的精度变化趋势

Fig. 9 Trend of precision variation under different weight factors

综上, 算例对每个负荷聚合商的申报容量和价格进行仿真, 并建立了负荷聚合商常规出清模型和基于精度出清价格的出清模型; 对带有随机偏差的实际响应情况进行仿真分析, 本文所提方法的平均偏差和方差略低于常规出清模型, 证明了电力系统能在出清过程中筛选响应更精准的负荷聚合商; 通过对不同响应性能负荷聚合商的个体分析, 验证了优质响应性能的负荷聚合商具有高精度指标, 其在应用本文出清方法时具有更大的竞争力; 通过多次出清模拟, 得到出清价格分布, 并计算电网总费用, 证明了所提方法能有效减少电网总费用; 最后, 分析 4 种响应精度对响应性能变化的敏感程度, 证明了总体响应精度指标同时平衡了短期和长期影响, 表现最为全面。

## 4 结论

在参与需求响应过程中, 为筛选优质的响应资源, 提升需求响应实施的精准程度, 本文提出面向精准响应的市场出清方法。本文首先评估负荷聚合商的有效响应容量, 进而构建考虑短期和长期表现的综合响应精度指标, 并分析不同精度指标对响应性能变化的敏感程度; 基于响应精度指标提出了负荷聚合商市场出清策略, 并明确了精度价

格补偿和精度出清价格的计算方法, 对偏差和精度指标进行了评估计算。在应用本文所提考虑响应精度指标的市场出清方法后, 负荷聚合商申报容量与实际响应容量之间的方差下降了 6.0%, 电力系统获得在出清时筛选拥有优质响应性能负荷聚合商的能力, 同时需求响应总费用下降了 1.13%。

需要指出的是, 本文主要针对需求响应出清机制进行研究, 对电力市场申报容量和价格策略没有深入探讨。后续工作可继续探索基于多次响应的精度的响应机制, 根据精度指标对负荷聚合商进行标签分类, 并进一步探讨响应精度指标的意义。

## 参考文献

- [1] 彭道刚, 税纪钧, 王丹豪, 等. “双碳”背景下虚拟电厂研究综述[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 602-615.  
PENG Daogang, SHUI Jijun, WANG Danhao, et al. Review of virtual power plant under the background of “dual carbon”[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 602-615.
- [2] 王仲, 马思明, 王婷婷, 等. 工业园区碳排放核算与“双碳”转型路径研究[J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 191-199.  
WANG Zhong, MA Siming, WANG Tingting, et al. Research on carbon emission accounting and the “dual carbon” transformation path of industrial parks[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(5): 191-199.
- [3] 唐巍, 王照琪, 张璐. 绿色低碳能源转型背景下的新型乡村能源体系形态特征与关键技术[J]. 供用电, 2024, 41(8): 88-99.  
TANG Wei, WANG Zhaoqi, ZHANG Lu. Morphological characteristics and key technologies of new-type rural energy system under low-carbon energy transformation[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(8): 88-99.
- [4] 缴翼飞, 林润. 新能源发电装机规模或首超煤电[N]. 21 世纪经济报道, 2024-03-27(006).  
JIAO Yifei, LIN Run. New energy power generation installed capacity may exceed coal power for the first time[N]. 21st Century Business Herald, 2024-03-27(006).
- [5] 中国电力企业联合会. 中电联发布《2023~2024 年度全国电力供需形势分析预测报告》[J]. 中国电力企业管理, 2024(6): 6-7.  
China Electricity Council. China Electric Power Union released “National Electricity Supply and Demand Situation Analysis Forecast Report from 2023 to 2024”[J]. China Power Enterprise Management, 2024(6): 6-7.
- [6] 朱兰, 董凯旋, 唐陇军, 等. 计及同步机惯性与储能虚拟惯性价值的电能、惯性及一次调频联合优化出清模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7543-7555.



- ZHU Lan, DONG Kaixuan, TANG Longjun, et al. Joint optimal clearing model for electric energy, inertia and primary frequency response considering synchronous inertia and energy storage virtual inertia values[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(19): 7543-7555.
- [7] ZHOU Xiaoyu, LIU Xiaofeng, LIU Huai, et al. Optimal dispatching strategy for residential demand response considering load participation[J]. *Global Energy Interconnection*, 2024, 7(1): 38-47.
- [8] JI Zhenya, LIU Xiaofeng, TANG Difei. Game-theoretic applications for decision-making behavior on the energy demand side: a systematic review[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(2): 1-20.
- [9] 徐慧慧, 田云飞, 缪猛, 等. 计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J]. *智慧电力*, 2023, 51(8): 1-7.
- XU Huihui, TIAN Yunfei, MIAO Meng, et al. Low carbon economy dispatch of virtual power plants considering carbon trading and demand response[J]. *Smart Power*, 2023, 51(8): 1-7.
- [10] 侯慧, 何梓姻, 侯婷婷, 等. 大规模车网互动需求响应策略及潜力评估综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(14): 177-187.
- HOU Hui, HE Ziyin, HOU Tingting, et al. A review of demand response strategies and potential evaluation for large-scale vehicle to grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(14): 177-187.
- [11] 袁峰, 纪业, 顾刘婷. 用户侧灵活可控资源的协同响应研究[J]. *自动化应用*, 2024, 65(8): 61-63.
- YUAN Feng, JI Ye, GU Liuting. Research on collaborative response for demand side flexible and controllable resources[J]. *Automation Application*, 2024, 65(8): 61-63.
- [12] 宋天琦, 吕志鹏, 宋振浩, 等. 虚拟电厂规模化灵活资源聚合调控框架研究与思考[J]. *中国电力*, 2024, 57(1): 2-8.
- SONG Tianqi, LÜ Zhipeng, SONG Zhenhao, et al. Research and thinking on the aggregation and dispatching control framework of virtual power plant's large scale flexible resources[J]. *Electric Power*, 2024, 57(1): 2-8.
- [13] 杨悦, 宋良泰. 考虑用户需求响应的空调负荷日前-实时聚合调控[J]. *全球能源互联网*, 2023, 6(5): 529-537.
- YANG Yue, SONG Liangtai. Day ahead and real time aggregate regulation of air conditioning load on demand response[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2023, 6(5): 529-537.
- [14] 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 Dunnan, 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.
- [15] 苟凯杰, 吕鸣阳, 高悦, 等. 风-光-储和需求响应协同的虚拟电厂日前经济调度优化[J]. *广东电力*, 2024, 37(2): 18-24.
- GOU Kaijie, LÜ Mingyang, GAO Yue, et al. Day-ahead economic dispatch optimization of virtual power plant based on wind-photovoltaic-energy storage and demand response synergy[J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(2): 18-24.
- [16] 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, 189.
- 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, 189.
- [17] 徐爽, 万靖, 崔世常, 等. 不对称信息下新型储能容量租赁市场的博弈均衡分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(13): 13-24.
- XU Shuang, WAN Jing, CUI Shichang, et al. Game equilibrium analysis of energy storage leasing market with asymmetric information[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(13): 13-24.
- [18] 张华祥. 中国电力行业价格形成机制与改革模式研究[D]. 上海: 复旦大学, 2014.
- ZHANG Huaxiang. Study on the price forming mechanism and reform mode of electricity industry in China[D]. Shanghai: Fudan University, 2014.
- [19] 赵冬梅, 郭育村, 郑亚锐. 考虑需求响应的虚拟电厂两阶段市场竞标模型[J]. *现代电力*, 2023, 40(2): 182-191.
- ZHAO Dongmei, GUO Yucun, ZHENG Yarui. Two-stage market bidding model of virtual power plant considering demand response[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(2): 182-191.
- [20] 漆淘懿, 惠红勋, 叶承晋, 等. 建筑虚拟电厂参与需求响应市场的报量报价机制设计[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(18): 14-24.
- QI Taoyi, HUI Hongxun, YE Chengjin, et al. Bidding mechanism design for building virtual power plant to participate in demand response markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(18): 14-24.
- [21] 李孟阳, 李国杰, 汪可友, 等. 考虑需求响应及调频性能变化的虚拟电厂日前投标策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 13-25.
- LI Mengyang, LI Guojie, WANG Keyou, et al. Day-ahead bidding strategy for virtual power plant considering demand response and frequency regulation performance variation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023,

- 51(3): 13-25.
- [22] 高洪超, 王宣元, 邱小燕, 等. 新型电力系统环境下的虚拟电厂辅助调峰市场机制及其商业模式设计[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 376-385.  
GAO Hongchao, WANG Xuanyuan, QIU Xiaoyan, et al. Ramping energy market mechanism and its business model of virtual power plants oriented to new power system[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2023, 44(3): 376-385.
- [23] 陈泽宇, 陈艳波. 计及循环寿命和电能质量-调频市场出清的储能自调度策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(14): 28-41.  
CHEN Zeyu, CHEN Yanbo. Self-scheduling strategy of energy storage considering cycle life and clearing of electric power energy-frequency regulation market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 28-41.
- [24] 刘娜, 武占军, 郭灵杰, 等. 引入电能质量保险机制的日前电能市场打分出清决策[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2151-2164.  
LIU Na, WU Zhanjun, GUO Lingjie, et al. Day-ahead electricity energy market score clearing decision introducing power quality insurance mechanism[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2151-2164.
- [25] 冯迎春, 范洁, 王阳, 等. 考虑虚拟电厂可信容量的新能源电力系统容量市场出清模型[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(1): 36-41.  
FENG Yingchun, FAN Jie, WANG Yang, et al. A capacity market clearing model for renewable energy power system considering unforced capacity of virtual power plant[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(1): 36-41.
- [26] LI Kangping, WANG Yuxi, ZHANG Ning, et al. Precision and accuracy co-optimization-based demand response baseline load estimation using bidirectional data[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(1): 266-276.
- [27] 张子昊, 包涛, 王鹏宇, 等. 基于多阶段决策的需求侧聚合响应策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(9): 1-9.  
ZHANG Zihao, BAO Tao, WANG Pengyu, et al. Demand side aggregation response strategy based on multi-stage decision[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(9): 1-9.
- [28] 喻小宝, 谭忠富, 马佳乐, 等. 计及需求响应的售电公司正偏差电量考核优化模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 120-128.  
YU Xiaobao, TAN Zhongfu, MA Jiale, et al. Optimal model for positive deviation penalty of power retailers considering demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 120-128.
- [29] 郭曼兰, 陈皓勇, 张聪, 等. 偏差电量考核机制下售电公司的最优经营策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 17-25.  
GUO Manlan, CHEN Haoyong, ZHANG Cong, et al. Optimal marketing strategy of retailers under energy deviation penalty[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 17-25.
- [30] 广东电力交易中心. 广东省市场化需求响应实施细则(试行稿)[EB/OL]. (2022-05-13)[2024-07-21]. <https://pm.gd.csg.cn/portal/#/home/informationNotice/detail?id=8077&noticeTypeId=31>.  
Guangdong Power Trading Center. Implementation rules for market-oriented demand response in Guangdong province (trial draft) [EB/OL]. (2022-05-13) [2024-03-10]. <https://pm.gd.csg.cn/portal/#/home/informationNotice/detail?id=8077&noticeTypeId=31>.
- [31] 江苏省发展改革委. 江苏省电力需求响应实施细则[EB/OL]. (2024-06-13) [2024-07-21]. [https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2024/6/21/art\\_51007\\_11276655.html](https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2024/6/21/art_51007_11276655.html)  
Development and Reform Commission of Jiangsu Province. Jiangsu Province Electricity Demand Response Implementation Rules[EB/OL]. (2024-06-13) [2024-07-21]. [https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2024/6/21/art\\_51007\\_11276655.html](https://fzggw.jiangsu.gov.cn/art/2024/6/21/art_51007_11276655.html)

收稿日期: 2024-08-30; 修回日期: 2024-12-21

作者简介:

刘小天(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为硬件在环技术, 负荷侧资源调度, 储能控制等; E-mail: mc35323@connect.um.edu.mo

漆淘懿(1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力需求侧管理、需求响应市场机制、建筑能源建模与控制等; E-mail: taoyi.qi@connect.um.edu.mo

惠红勋(1992—), 男, 通信作者, 博士, 助理教授, 博士生导师, 研究方向为灵活负荷资源的建模、控制、优化和市场策略等。E-mail: hongxunhui@um.edu.mo

(编辑 周金梅)