

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231673

不对称信息下新型储能容量租赁市场的博弈均衡分析

徐爽¹, 万靖¹, 崔世常², 方仍存¹, 文劲宇²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430000;

2. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 新型储能容量租赁由于低风险和高灵活性正成为一种受到广泛关注的商业模式。为解决能源社区内独立储能商和多个发用电一体产消者在不对称成本信息下的储能容量租赁问题, 先通过 Harsanyi 转换将不对称信息转化成完全信息。然后建立了储能商和产消者间的两阶段扩展式博弈模型。接着设计了基于统一价格机制的市场出清和结算规则。最后分析了统一价格机制下储能商和产消者两阶段完全信息扩展式博弈的子博弈精炼纳什均衡, 并通过 Brouwer 不动点定理证明了均衡的存在性。仿真研究表明, 储能容量租赁能显著降低产消者的用电成本和提高储能利用效率。而且基于统一价格机制的博弈均衡在寻找公平租赁价格、增加储能商利润、提高储能容量租赁规模以及提升社会福利等方面均优于基于歧视价格机制的博弈均衡。

关键词: 储能租赁; 产消者; 不对称信息; 扩展式博弈; 子博弈精炼纳什均衡

Game equilibrium analysis of energy storage leasing market with asymmetric information

XU Shuang¹, WAN Jing¹, CUI Shichang², FANG Rengcun¹, WEN Jinyu²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Energy storage capacity leasing is becoming a new business model. It has received a lot of attention because of its low risk and high flexibility. To solve the problem of energy storage capacity leasing between an independent energy storage operator and multiple prosumers who can simultaneously produce and consume energy in an energy community under asymmetric cost information, first, asymmetric information is transformed into complete information via the Harsanyi transformation. Second, a two-stage extensive game model between the energy storage operator and the prosumers is established. Third, market clearing and settlement rules based on a uniform price mechanism are designed. Finally, the subgame refinement Nash equilibrium of the extensive game with complete information between the operator and the prosumers under the uniform price mechanism is analyzed, and the existence of the equilibrium is proved by the Brouwer fixed point theorem. Simulation studies show that energy storage capacity leasing can significantly reduce the electricity cost of the prosumers and improve the efficiency of energy storage utilization. The game equilibrium of the uniform price mechanism is superior to that of the discriminatory price mechanism in finding fair energy storage capacity leasing prices, increasing the profits of the independent energy storage operator, increasing the scale of energy storage capacity transactions, and improving social welfare.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207108).

Key words: energy storage leasing; prosumers; asymmetric information; extensive game; subgame perfect Nash equilibrium

0 引言

随着电化学储能技术的持续发展^[1-3], 用户侧配

置新型储能的规模不断扩大。2022 年全球储能新增装机规模为 40.2 GW, 其中用户侧储能新增装机量为 7.1 GW, 同比增长约 155%^[4]。用户侧发用电一体产消者通过调用储能, 在新能源出力高峰时段和电价低谷时段存储电能, 在电价高峰时段释放电能, 从而促进新能源就地消纳、节省电费支出以及缓解

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207108); 国网湖北省电力有限公司科技项目资助(B31538238124)

电网的调峰压力^[5-6]。然而,产消者自建储能商业模式存在投资成本高、容量定制化难以及设备利用率低等问题^[7]。此外,同一区域内多个产消者投资公共储能设备并共享储能的模式,一方面可能存在容量分配不公平的问题,另一方面受限于预先分配的容量,又会引起灵活性不足等缺陷^[8]。为了克服上述问题和缺陷,由第三方投资建设新型储能,并向产消者租赁其储能容量的商业模式不失为一种有效的解决方案。

储能容量租赁市场中^[9],存在储能商和产消者多个利益主体,如何分析多方利益主体在市场中的策略性行为,提出合适的定价协调和容量分配机制,是保障储能容量租赁市场成功运行需要解决的关键问题之一。博弈论是研究多个决策主体的行为发生直接相互作用时,主体如何进行决策,以及这种决策如何达到均衡的问题^[10-12]。利用博弈论对储能服务进行定价和分配的研究主要分为基于合作博弈和基于非合作博弈两大类,其中非合作博弈又主要集中在静态拍卖和动态 Stackelberg 博弈。

文献[13]利用合作博弈模型协调两种情形下的储能共享,一种是分时电价政策下用户之间分享自建储能容量以降低整体用电成本;另一种是多个用户投资公共储能设备并合作调用以降低总成本,两种情形下均提出了基于核的成本分配方案。文献[14]通过合作博弈模型研究商业用户共享储能的规划、运行和成本分配问题,并利用核仁进行成本分配,以体现分配方案的稳定性和公平性。文献[15]利用合作博弈解决多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊问题,提出了基于线路功率损耗的改进 Shapley 值的成本分摊方法。合作博弈旨在激励独立的决策者共同行动,从而以更低的系统总成本或更高的社会总福利实现资源的高效分配。然而,在储能共享中,通常难以保证合作博弈模型存在激励所有用户参与合作的利益分配方案;另外,即使存在合理的利益分配方案,例如 Shapley 值和核仁,其计算复杂度会随着用户数量的增加而迅速增大^[16]。

拍卖是通过一系列明确的规则和竞价行为来决定资源价格和分配的市场机制,本质上是不完全信息条件下的静态非合作博弈。文献[17]综述了容量租赁市场中常见的拍卖机制及竞价策略,并给出了相关建议。文献[18]设计了一种新的双边拍卖机制以激励产消者披露其真实的储能需求,从而确定容量租赁价格;文献[19]采用组合拍卖协调产消者和储能商间的租赁,包括储能容量、充电功率、放电功率等多种类型储能资源的租赁。文献[20]采用组合拍卖机制允许产消者对不同时段内的储能需求

提交打包价,并结合遗传算法和粒子群优化算法提出了一种新的储能容量分配方法。

作为典型的动态非合作博弈,Stackelberg 博弈被广泛应用于储能容量租赁市场的两阶段定价。文献[21]采用 Stackelberg 博弈研究产消者与独立储能商间的储能容量租赁问题,其中储能运营商作为上层领导者通过调整储能充放电价格影响用户需求,而下层跟随者用户则通过策略性地调整储能容量需求和购售电计划来最大化其效用,从而达到储能商和产消者二者间的利益平衡。文献[22]中上层储能商通过设定充放电价格信号和与电网的交易量最大化其收益,而下层的零售商设计了激励用户上传真实信息的激励相容机制,并以能源社区总成本最小化为目标确定每个用户的充放电计划。文献[23]考虑不确定环境下储能商和微电网群之间的储能容量租赁,其中储能商调整储能容量租赁价格以追求最大利润,每个微电网则响应租赁价格,调整租赁容量方案及运行计划以最小化用电成本,并设计了基于启发式算法的分布式迭代方法求解所提的 Stackelberg 模型。文献[24]则考虑由售电商向园区提供储能增值服务,并收购其富余电量,其中分别以计及风险的售电商收益最大化和考虑电价弹性的园区用电成本最小化为目标,构建 Stackelberg 博弈模型,以确定售电商合约定价和储能配置策略。Stackelberg 博弈的均衡求解一般有两种方式,一种是将下层问题以 KKT 条件替代,将双层问题转化为单层问题求解;另一种是上下两层采用交互迭代的方法来求解。此外,文献[25]利用双层博弈解决多个综合能源微网的协同能量管理问题。文献[26]则通过动态演化博弈对多新能源场站联合投资低碳综合微网氢储能的行为进行演化策略分析。

上述文献存在以下几个方面的缺陷:首先,文献通常假设储能商和产消者之间的信息是对称的,现实中存在的不对称信息对储能容量租赁市场定价的影响值得研究;其次,在静态拍卖中,产消者只提交一组购买价格和需求量,该一价一量的报价格式可能难以反映产消者真实的需求表达;最后,在动态 Stackelberg 博弈中,通过上下层迭代方式求解均衡可能难以收敛到均衡解。

基于上述分析,本文通过建立两阶段扩展式博弈模型解决储能运营商和能源社区内产消者在不对称成本信息下的储能容量租赁问题,进而分析了储能商和产消者的均衡策略。首先,通过成本效用分析,构建了产消者对储能容量的需求函数,并通过效用函数的凹性说明需求函数的单调非增,与实际中产消者对储能容量的需求特性相吻合。其次,通

过 Harsanyi 转换将不对称信息转化成完全信息, 并将储能商和产消者间的互动建模为两阶段扩展式博弈, 阶段 I 中, 产消者以期望剩余最大化为目标对不同价格下的储能容量需求量进行投标; 阶段 II 中, 储能商以利润最大化为目标选择出清价格。然后, 设计了基于统一价格机制的市场出清和结算规则, 并分析了该规则下储能商和产消者完全信息两阶段扩展式博弈的子博弈精炼纳什均衡, 并证明了均衡的存在性。最后, 算例分析表明储能容量租赁市场能显著降低产消者的用电成本和提高储能利用效率, 同时基于统一价格机制的两阶段博弈模型在寻找公平租赁价格、增加储能商利润、提高储能租赁规模以及提升社会福利等方面均优于歧视价格机制。

1 储能容量租赁市场模型

如图 1 所示, 能源社区中的 $N = |\mathcal{N}|$ 个产消者配备有光伏系统, 并具有以空调和电热水器为代表的柔性负荷。其中, \mathcal{N} 为产消者集合, n 为产消者索引。一个独立的储能商投资大型储能设备, 并向社区中所有产消者提供容量租赁服务。一方面, 产消者与主电网双向连接, 可以出售其过剩光伏发电到主电网, 获取额外收益, 或在电能不足时从主电网购电以平衡需求; 另一方面, 产消者也与储能设备双向相连, 旨在从储能商处租用储能容量来实现其过剩电能的存储或调用, 以节省电费支出。此外, 储能商和产消者间还存在双向的信息交互通道, 以实现交易层面的信息申报、市场出清和费用结算。

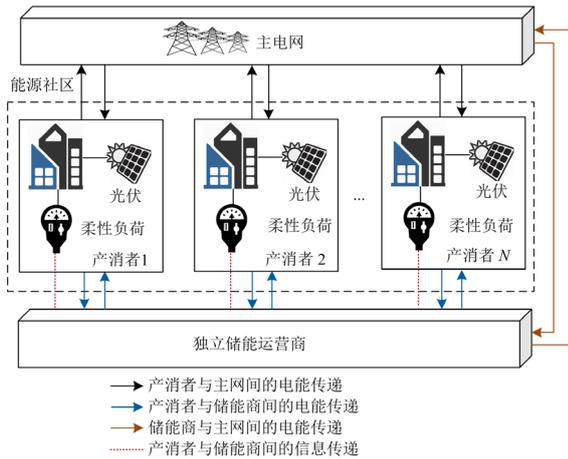


图 1 能源社区储能容量租赁示意图

Fig. 1 Diagram of energy storage leasing in energy community

为平衡储能商和产消者间的利益, 储能容量租赁市场通常存在参考价格。例如, 文献[27]中储能的年租赁费用标准为 260 元/kWh, 而文献[28]中设定其参考价格区间为 160~230 元/kWh。因此, 本文

假设储能容量日前租赁市场中存在由多个参考价格组成的价格目录, 用于协调储能运营商和产消者间的交易。为了简化分析, 先假设只存在两个外生的参考价格, 并记为 p_h 和 p_l , 其中 $p_h > p_l > 0$ 。下面分别对产消者需求以及不对称储能成本信息进行建模和描述。

1.1 产消者需求

同时具有可转移特性柔性负荷和光伏发电能力的产消者, 通过储能充放电来平衡其用电需求和光伏发电之间的跨时段不平衡, 进而降低用电成本。其中, 产消者的用电成本等于购电成本扣除向电网售电的收入。

若产消者 $n \in \mathcal{N}$ 配备了 q 单位的储能容量, 则其日前用电成本 $C_n(q)$ 为

$$C_n(q) = \min \sum_{t=1}^T (\lambda_t^b P_{n,t}^b - \lambda_t^s P_{n,t}^s) \Delta t \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t=1}^T P_{n,t}^f \Delta t = E_n^f \quad (2)$$

$$\underline{P}_{n,t}^f \leq P_{n,t}^f \leq \bar{P}_{n,t}^f \quad (3)$$

$$-R_n^D \leq P_{n,t}^f - P_{n,t-1}^f \leq R_n^U \quad (4)$$

$$0 \leq \sum_{t=1}^{\tau} \left(P_{n,t}^{\text{ch}} \eta^{\text{ch}} - \frac{P_{n,t}^{\text{dch}}}{\eta^{\text{dch}}} \right) \Delta t \leq q, \forall \tau \in \Gamma \quad (5)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{ch}} \leq P_{t,\text{max}}^{\text{ch}} \quad (6)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{dch}} \leq P_{t,\text{max}}^{\text{dch}} \quad (7)$$

$$P_{n,t}^b + P_{n,t}^{\text{pv}} + P_{n,t}^{\text{dch}} = P_{n,t}^f + P_{n,t}^{\text{ch}} + P_{n,t}^s \quad (8)$$

式中: $P_{n,t}^f$ 、 $P_{n,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{dch}}$ 、 $P_{n,t}^b$ 和 $P_{n,t}^s$ 均为产消者 n 在时段 t 的能源优化调度决策变量, $P_{n,t}^f$ 为柔性负荷、 $P_{n,t}^b$ 为从主电网输入电能功率、 $P_{n,t}^s$ 为馈电到主电网的功率、 $P_{n,t}^{\text{ch}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{dch}}$ 分别为储能充电功率和储能放电功率; $\Gamma = \{1, 2, \dots, T\}$ 表示运行时间段集合; t 和 τ 为时段索引; Δt 为时段 t 的时间间隔; $P_{n,t}^{\text{pv}}$ 为产消者 n 在时段 t 的预测光伏出力; λ_t^b 和 λ_t^s 分别表示从主电网购电和馈电到主电网的价格; $\bar{P}_{n,t}^f$ 和 $\underline{P}_{n,t}^f$ 分别为产消者 n 在时段 t 柔性负荷功率的上下限; R_n^U 和 R_n^D 分别为产消者 n 柔性负荷向上和向下爬坡速率的最大值; E_n^f 为柔性负荷总的用电量需求; η^{ch} 和 η^{dch} 分别表示储能的充放电效率; $P_{t,\text{max}}^{\text{ch}}$ 和 $P_{t,\text{max}}^{\text{dch}}$ 分别表示在时段 t 储能的充放电最大功率。

其中, 式(2)—式(4)为柔性负荷运行约束, 式(5)—式(7)为储能系统运行约束, 而式(8)为功率平衡约束。

个体理性产消者具有拟线性偏好,即产消者调用储能的效用可定义为调用储能产生的经济效益。基于此,产消者 $n \in \mathcal{N}$ 调用 q 单位储能容量的效用 $U_n(q)$ 为其通过调用储能带来的用电成本节省量,即为

$$U_n(q) = C_n(0) - C_n(q) \quad (9)$$

式中, $C_n(0)$ 为不调用储能时产消者 n 的用电成本。

引理1 效用函数 $U_n(q)$ 为凹函数。

证明:当产消者 n 调度 q 单位储能容量时,其日前调度计划的可行解集合为 $W_n(q) = \{x_n \triangleq [P_{n,t}^f, P_{n,t}^{ch}, P_{n,t}^{dch}, P_{n,t}^b, P_{n,t}^s] | \text{约束式(2)一式(8)成立}\}$ 。于是,对任意 $q_1 \geq 0, q_2 \geq 0$,以及 $0 \leq \theta \leq 1$,定义 $x_n^* = [P_{n,t}^{f,*}, P_{n,t}^{ch,*}, P_{n,t}^{dch,*}, P_{n,t}^{b,*}, P_{n,t}^{s,*}]$ 和 $x_n^{**} = [P_{n,t}^{f,**}, P_{n,t}^{ch,**}, P_{n,t}^{dch,**}, P_{n,t}^{b,**}, P_{n,t}^{s,**}]$ 分别表示储能容量为 q_1 和 q_2 时的日前最优调度计划,即 $x_n^* = \operatorname{argmin}_{x_n \in W_n(q_1)} C_n(q_1)$ 且 $x_n^{**} = \operatorname{argmin}_{x_n \in W_n(q_2)} C_n(q_2)$ 。

验证得到, $\theta x_n^* + (1-\theta)x_n^{**} \in W_n(\theta q_1 + (1-\theta)q_2)$ 。因此可得 $C_n(\theta q_1 + (1-\theta)q_2) \leq \sum_{t=1}^T (\lambda_t^b (\theta P_{n,t}^{b,*} + (1-\theta)P_{n,t}^{b,**}) - \lambda_t^s (\theta P_{n,t}^{s,*} + (1-\theta)P_{n,t}^{s,**})) \Delta t = \theta C_n(q_1) + (1-\theta)C_n(q_2)$ 。

于是, $C_n(q)$ 为凸函数,而由式(9)定义的效用函数 $U_n(q)$ 则为凹函数。

[证毕]。

效用函数的凹性反映了边际效用递减规律。产消者的效用函数 $U_n(q)$ 表示通过调用 q 单位储能容量带来的用电成本节省量,所以边际效用函数 $U'_n(q)$ 表示容量为 q 时新增一单位容量所带来的成本降低量,对应产消者可接受的最高租赁价格。于是,产消者对储能容量的需求函数 $D_n(p)$ 为

$$D_n(p) = \max \{U_n^{-1}(p), 0\} \quad (10)$$

式中, $U_n^{-1}(p)$ 为边际效用函数 $U'_n(q)$ 的逆函数。

图2展示了产消者的效用函数、边际效用函数以及需求函数。由边际效用递减规律可知,当产消者储能需求大于0时,需求量关于价格递减。当容量租赁价格过高时,产消者会选择将多余光伏发电直接上网,进而导致储能需求量下降至零。此外,注意到对每一个参与储能容量交易的产消者 n ,均有 $D_n(p_1) > 0$ 或 $p_1 < U'_n(0)$;否则, $D_n(p_1) \leq 0$ 或 $p_1 \geq U'_n(0)$ 表示产消者 n 可接受的最高租赁价格低于最低的市场参考出清价格。该情况下,产消者 n 没有动机租赁容量,将会退出储能容量交易市场。

1.2 不对称储能成本信息

本文考虑的场景是大型储能商为能源社区内多个小规模产消者提供储能服务。储能商的单位成本

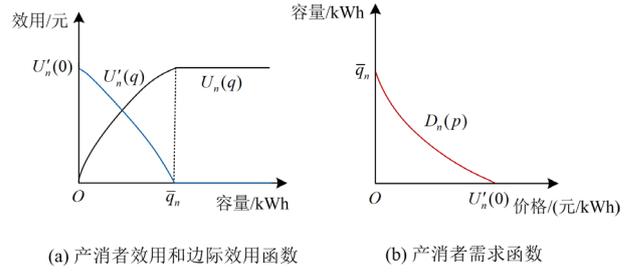


图2 产消者效用、边际效用、需求函数示意图

Fig. 2 Diagram of utility, marginal utility, and demand functions of prosumers

主要包括投资建设成本、运营维护支出、系统管理成本以及扣除安装设备时的税收抵免等。单位成本 β 的取值是储能商的私人信息,产消者无法获取 β 的具体取值。

上述不对称成本信息结构使得产消者对储能商的利润函数形式无法达成一致,此时博弈的特征是不确定的,无法进行均衡分析和求解。Harsanyi转换通过引入第三方局中人“自然”,由“自然”首先行动,按照某一概率分布指定博弈中不完全的信息,且这一概率分布为公共知识,于是将不对称信息博弈转化成完全信息博弈^[29]。基于Harsanyi转换,产消者虽不知 β 的取值,但可以从公开的储能行业数据报告中获悉关于 β 的先验分布 $G(\beta)$,且 $G(\beta)$ 为共同知识。

假设储能成本先验分布函数 $G(\beta)$ 在区间 $[0, \bar{\beta}]$ 上严格递增,其中 $G(0) = 0$, $G(\bar{\beta}) = 1$,且 $\bar{\beta} > p_l$ 。该假设表明产消者认为储能成本取值在0到 $\bar{\beta}$ 之间,且监管机构设置的最低参考价格不高于储能成本可能取的最大值。进一步地,记 $G(\beta)$ 连续的密度函数为 $g(\beta) = G'(\beta)$ 。

注意到,上述关于储能成本先验分布 $G(\beta)$ 的假设可间接排除对称信息情形。对称信息下,即产消者也知道 β 的取值时, $G(\beta)$ 为取值0和1的阶梯函数,且在 β 处的取值会直接从0跳到1。

2 储能商与产消者两阶段扩展式博弈的均衡分析

为实现储能容量的合理定价和公平分配,将储能容量交易市场中独立储能商和能源社区中多个产消者间的互动建模为两阶段博弈。然后,提出了基于统一价格机制的市场出清和结算规则,并分析了该规则下储能商和产消者的均衡策略。最后,将两参考价格情形下的结论推广到任意多个参考价格,

以提高模型的实用性。

2.1 两阶段扩展式博弈模型描述

储能商与产消者间的两阶段博弈如图3所示。阶段 I 中, 每个产消者依据其需求函数 $D_n(p)$ 和储能成本先验分布 $G(\beta)$, 以产消者剩余最大化为目标提交投标 (x_n, y_n) , 其中 x_n 和 y_n 分别为产消者 n 在高价 p_h 和低价 p_l 时的储能容量需求量, 且 $0 \leq x_n < y_n$ 。

阶段 II 中, 储能商基于产消者的投标 $\sum_{n=1}^N x_n$ 和 $\sum_{n=1}^N y_n$, 再结合储能成本 β , 以利润最大化为目标选择以高价 p_h 或低价 p_l 出清, 或取消交易。

独立的第三方储能商以利润最大化为目标, 选择以较高的参考价格 p_h 或较低的参考价格 p_l 进行市场出清。当单位成本过高导致两个出清价格都不能产生正的利润时, 储能商也可以选择退出市场。

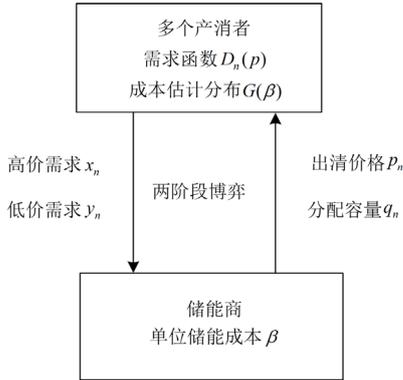


图3 储能商与产消者间的两阶段博弈

Fig. 3 Two-stage game between the energy storage operator and prosumers

采用统一价格机制进行储能容量租赁市场的出清和结算, 具体规则为: 若储能商选择高价 p_h 出清, 则产消者 n 获得 x_n 单位容量, 并向储能商支付 $p_h x_n$; 若储能商选择低价 p_l 出清, 则产消者 n 将获得 y_n 单位容量, 并向储能商支付 $p_l y_n$; 若储能商选择退出市场, 则取消交易, 产消者支付为 0。

根据上述基于统一价格机制的市场出清和结算规则, 产消者 $n \in \mathcal{N}$ 在高价 p_h 和低价 p_l 下的期望剩余 $H_n(x_n)$ 、 $L_n(y_n)$ 分别表示为

$$H_n(x_n) = U_n(x_n) - p_h x_n = \int_0^{x_n} D_n^{-1}(q) dq - p_h x_n \quad (11)$$

$$L_n(y_n) = U_n(y_n) - p_l y_n = \int_0^{y_n} D_n^{-1}(q) dq - p_l y_n \quad (12)$$

储能商和产消者间的两阶段博弈本质上为两阶段扩展式博弈, 其中 Harsanyi 转换将不对称成本信

息转化成了完全信息, 于是可以对博弈进行求解。以下先给出扩展式博弈的解子博弈精炼纳什均衡的定义。

在扩展式博弈中, 参与人 m 的一个纯策略 π_m 是从其信息集到行动集的一个映射关系, 可将所有参与人的策略组合用向量 $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_M)$ 来表示, 其中 M 为参与扩展式博弈的总人数。为排除不可置信的威胁(均衡路径上的非理性行为), 子博弈精炼纳什均衡(subgame perfect nash equilibrium, SPNE)被广泛考虑为扩展式博弈的解。记 $\Delta(x)$ 为扩展式博弈中开始于决策节点 x 的子博弈。给定策略组合 π , 记 $v_m(\pi | x)$ 为参与人 m 从子博弈 $\Delta(x)$ 获得的回报。

定义1: 扩展式博弈的策略组合 π^* 是一个 SPNE, 当且仅当对于每个参与人 m 及其策略 π_m 、以及每个子博弈 $\Delta(x)$, 均有 $v_m(\pi^* | x) \geq v_m(\pi_m, \pi_{-m}^* | x)$, 其中, $\pi_{-m}^* = (\pi_1^*, \dots, \pi_{m-1}^*, \pi_{m+1}^*, \dots, \pi_M^*)$ 。

SPNE 是对 Nash 均衡的精炼和改进, 它对所有子博弈(包括原博弈)均构成 Nash 均衡, 且 SPNE 的求解常采用逆向递推方法。

2.2 扩展式博弈均衡分析

采用基于逆向递推的均衡分析方法, 即先求解第 II 阶段中储能商的均衡策略, 再给定储能商的最优反应, 分析第 I 阶段中产消者的均衡投标策略。

命题 1 考虑储能商与产消者间储能容量租赁的两阶段扩展式博弈, 储能商在阶段 II 的均衡策略

$$s^*(\beta, \sum_{n=1}^N x_n, \sum_{n=1}^N y_n) \text{ 为}$$

$$s^*(\beta, \sum_{n=1}^N x_n, \sum_{n=1}^N y_n) = \begin{cases} p_l, & 0 \leq \beta \leq \beta' \\ p_h, & \beta' < \beta \leq p_h \\ \text{取消交易}, & \beta > p_h \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{式中, } \beta' = \frac{p_l \sum_{n=1}^N y_n - p_h \sum_{n=1}^N x_n}{\sum_{n=1}^N y_n - \sum_{n=1}^N x_n}。$$

证明: 当 $\beta > p_h$ 时, 储能容量交易不会给储能商带来正利润, 此时储能商的最优决策是取消交易。当 $\beta \leq p_h$ 时, 当且仅当高价 p_h 产生的利润更高时, 储能商才会选择以高价进行市场出清, 也即

$$(p_h - \beta) \sum_{n=1}^N x_n > (p_l - \beta) \sum_{n=1}^N y_n \quad (14)$$

$$\text{式(14)等价于 } \beta > \beta' = \frac{p_l \sum_{n=1}^N y_n - p_h \sum_{n=1}^N x_n}{\sum_{n=1}^N y_n - \sum_{n=1}^N x_n}。 \text{ 当}$$

$\beta' < \beta \leq p_h$ 时, 储能商将选择高价 p_h 。同理可得, 当 $0 \leq \beta \leq \beta'$ 时, 储能商将选择以低价 p_l 进行市场出清。

[证毕]。

命题 1 表明, 当储能商的单位成本高于最高出清价 p_h 时, 储能交易无利可图, 此时储能商将取消交易并退出市场。在单位成本低于最高出清价的情形下, 若单位成本还低于阈值 β' , 则储能商将选择低价出清, 通过提高容量租赁规模来增加利润; 否则, 选择高价出清。此时, 阈值 β' 取决于产消者的投标。引理 2 进一步分析了阈值 β' 的性质。

引理 2 (1) $\frac{\partial \beta'}{\partial x_n} < 0$ 且 $\frac{\partial \beta'}{\partial y_n} \geq 0$, 当且仅当

$$\sum_{n=1}^N x_n = 0 \text{ 时 } \frac{\partial \beta'}{\partial y_n} = 0。$$

(2) $0 < \beta' \leq p_l$, 当且仅当 $\sum_{n=1}^N x_n = 0$ 时 $\beta' = p_l$ 。

证明: β' 分别对 x_n 和 y_n 求偏导, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial \beta'}{\partial x_n} = -\frac{(p_h - p_l) \sum_{n=1}^N y_n}{\left(\sum_{n=1}^N y_n - \sum_{n=1}^N x_n\right)^2} \\ \frac{\partial \beta'}{\partial y_n} = \frac{(p_h - p_l) \sum_{n=1}^N x_n}{\left(\sum_{n=1}^N y_n - \sum_{n=1}^N x_n\right)^2} \end{cases} \quad (15)$$

(1) 由 $0 \leq x_n < y_n$ 可得 $\frac{\partial \beta'}{\partial x_n} < 0$ 且 $\frac{\partial \beta'}{\partial y_n} \geq 0$ 。此

外, 从式(15)还可看出, 当且仅当 $\sum_{n=1}^N x_n = 0$ 时 $\frac{\partial \beta'}{\partial y_n} = 0$ 。

(2) 由命题 1 中 β' 的定义可知

$$\beta' = p_l - \frac{(p_h - p_l) \sum_{n=1}^N x_n}{\sum_{n=1}^N y_n - \sum_{n=1}^N x_n} \leq p_l \quad (16)$$

由式(16)可知, 当且仅当 $\sum_{n=1}^N x_n = 0$ 时 $\beta' = p_l$ 。

以下通过反证法证明 $\beta' > 0$ 。假设 $\beta' \leq 0$, 那么由 β' 的定义可知, $p_l \sum_{n=1}^N y_n \leq p_h \sum_{n=1}^N x_n$ 。再结合命题 1 可知, 储能商在 $\beta > p_h$ 时会取消交易, 在 $0 \leq \beta \leq p_h$ 时会选择高价 p_h 进行市场出清, 这意味

着储能商不可能选择以低价 p_l 进行市场出清。在这种情形下, 产消者期望剩余最大化问题为

$$\max_{0 \leq x_n < y_n} G(p_h)H_n(x_n) \quad (17)$$

由式(17)可知, y_n 的取值对产消者的目标函数无影响, 所以产消者 n 向储能商提交任意满足约束条件 $p_l \sum_{n=1}^N y_n \leq p_h \sum_{n=1}^N x_n$ 的投标 y_n 均不会影响其期望剩余。此时, 该约束等价于 $y_n \leq \hat{y}$, 其中 $\hat{y} = \frac{p_h \sum_{n=1}^N x_n - \sum_{i \neq n} y_i}{p_l}$ 。

然而, 如果产消者 n 增加 y_n 使得 $y_n > \hat{y}$, 则由引理 2(1)可知 $\beta' > 0$, 于是由 $G(\beta)$ 的严格递增性可知 $G(\beta') > 0$ 。此时, 产消者 n 的期望剩余最大化问题变为

$$\max_{0 \leq x_n < y_n} (G(p_h) - G(\beta'))H_n(x_n) + G(\beta')L_n(y_n) \quad (18)$$

因为 $L_n(y_n) - H_n(x_n) > 0$ (引理 3 将证明), 所以优化问题式(18)的目标函数值大于问题式(17)。因此, 当 $\beta' \leq 0$ 时, 产消者 n 有动机增加 y_n 使得 $\beta' > 0$, 以实现更高的期望剩余。

[证毕]。

引理 2(1)表明, 当产消者增加高价需求或者降低低价需求时, 阈值 β' 降低, 此时储能商更有可能选择以高价格进行市场出清, 与直觉相符合。引理 2(2)中的 $0 < \beta' \leq p_l$ 则说明命题 1 中储能商的均衡策略定义明确, 并且高价 p_h 和低价 p_l 均有可能被储能商选择。

命题 2 考虑储能商与产消者间储能容量租赁的两阶段扩展式博弈, 产消者 $n \in \mathcal{N}$ 在第 I 阶段的最优投标满足式(19)。

$$\begin{cases} x_n = D_n \left(p_h + \frac{\partial \beta'}{\partial x_n} (H_n(x_n) - L_n(y_n)) \frac{g(\beta')}{G(p_h) - G(\beta')} \right) \\ y_n = D_n \left(p_l + \frac{\partial \beta'}{\partial y_n} (H_n(x_n) - L_n(y_n)) \frac{g(\beta')}{G(p_h)} \right) \end{cases} \quad (19)$$

证明: 给定储能商的均衡策略 $s^*(\beta, \sum_{n=1}^N x_n, \sum_{n=1}^N y_n)$ 以及其他产消者在高价和低价时的总投标 $\sum_{i \neq n} x_i$ 和 $\sum_{i \neq n} y_i$, 下一步考虑产消者 n 的最优投标。产消者 n 报 (x_n, y_n) 来最大化由式(18)定义的期望剩余。式(18)中目标函数关于 x_n 和 y_n 的一阶最优条件分别为

$$\begin{cases} (G(p_h) - G(\beta')) \frac{dH_n(x_n)}{dx_n} = g(\beta') \frac{\partial \beta'}{\partial x_n} (H_n(x_n) - L_n(y_n)) \\ G(\beta') \frac{dL_n(y_n)}{dy_n} = g(\beta') \frac{\partial \beta'}{\partial y_n} (H_n(x_n) - L_n(y_n)) \end{cases} \quad (20)$$

由式(11)和式(12)可得

$$\begin{cases} \frac{dH_n(x_n)}{dx_n} = D_n^{-1}(x_n) - p_h \\ \frac{dL_n(y_n)}{dy_n} = D_n^{-1}(y_n) - p_l \end{cases} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)并化简可得, 产消者 n 的最优投标 (x_n, y_n) 满足式(19)。

[证毕]。

命题 2 表明, 当储能商和产消者两阶段扩展式博弈的 SPNE 存在时, 产消者一侧的均衡投标需满足式(19)中定义的 $2N$ 个方程组。然而, 如果均衡不存在, 则无法描述储能容量租赁市场稳定的状态, 并对容量租赁市场的交易结果进行评估。引理 3 将为证明均衡存在性奠定基础。

引理 3 产消者高价下的均衡期望回报严格低于低价下的期望回报: 对任意的 $n \in \mathcal{N}$ 和 $0 \leq x_n < y_n$, 均有 $H_n(x_n) < L_n(y_n)$ 。

证明: 首先, 可观察到对任意的 $a > 0$, 有 $H_n(0) = 0$ 、 $L_n(0^+) = 0$ 以及 $H_n(a) < L_n(a)$ 。其次, 由 $L_n(a)$ 的定义可知, $L_n(a)$ 在区间 $[0, D_n(p_l)]$ 上递增, 而在 $(D_n(p_l), +\infty)$ 上递减。于是, 当 $y_n \leq D_n(p_l)$ 时, 有 $H_n(x_n) < L_n(x_n) \leq L_n(y_n)$ 成立; 而当 $y_n > D_n(p_l)$ 时, 则 $\frac{dL_n(y_n)}{dy_n} < 0$ 成立, 再根据式(20)中第

二行等式左右两边有相同的符号, 所以有 $H_n(x_n) < L_n(x_n)$ 。综上可得, 对任意的 $0 \leq x_n < y_n$, 均有 $H_n(x_n) < L_n(y_n)$ 成立。

[证毕]。

结合命题 2 和引理 3 可知, $x_n \leq D_n(p_h)$ 且 $y_n \geq D_n(p_l)$, 这意味着产消者在高价时会低报其真实需求, 而在低价时会高报其真实需求, 而这一投标行为会增加储能商选择低价出清的可能性, 进而对产消者有利。以下证明储能商和产消者储能容量租赁的两阶段博弈存在 SPNE。

命题 3 储能商与产消者间储能容量租赁的两阶段扩展式博弈存在 SPNE。

证明: 采用逆向递推方法。阶段 II 中, 储能商的均衡策略 $s^*(\beta, \sum_{n=1}^N x_n, \sum_{n=1}^N y_n)$ 可由命题 1 直接显示

表出。再给定 s^* , 考虑阶段 I。记 $z_n = (x_n, y_n)$ 为产消者 n 的投标, 同时记 $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_N)$ 为所有产消者的投标。根据命题 2, 所有产消者的最优投标 \mathbf{z}^* 即为式(19)中 $2N$ 个方程的解。

记集合 $A = \prod_{n=1}^N [0, D_n(p_h)] \times [D_n(p_l), D_n(0)]$ 。显然, 集合 A 为 $2N$ 维实数集 \mathbf{R}^{2N} 中的紧凸集, 再定义函数 $f(\mathbf{z}) = (\overline{D}_1(\mathbf{z}), \overline{D}_2(\mathbf{z}), \dots, \overline{D}_N(\mathbf{z}))$, 其中

$\overline{D}_n(\mathbf{z}) = (D_n(\alpha_n(\mathbf{z})), D_n(\gamma_n(\mathbf{z})))$, $\alpha_n(\mathbf{z})$ 和 $\gamma_n(\mathbf{z})$ 为

$$\begin{cases} \alpha_n(\mathbf{z}) = p_h + \frac{\partial \beta'}{\partial x_n} (H_n(x_n) - L_n(y_n)) \frac{g(\beta')}{G(p_h) - G(\beta')} \\ \gamma_n(\mathbf{z}) = p_l + \frac{\partial \beta'}{\partial y_n} (H_n(x_n) - L_n(y_n)) \frac{g(\beta')}{G(p_h)} \end{cases} \quad (22)$$

由 $D_n(p)$ 、 $\alpha_n(\mathbf{z})$ 和 $\gamma_n(\mathbf{z})$ 的连续性可知, $f(\mathbf{z})$ 关于 \mathbf{z} 连续。又根据命题 2 和引理 3 可得, $0 \leq D_n(\alpha_n(\mathbf{z})) \leq D_n(p_h)$ 且 $D_n(p_l) \leq D_n(\gamma_n(\mathbf{z})) \leq D_n(0)$ 。这意味着 $f(\mathbf{z})$ 的值域也为 A 。进一步地, 将 $f(\mathbf{z})$ 的定义域限制在 A 上, 于是可知 $f(\mathbf{z})$ 为一个将紧凸集 A 映射到自身的连续函数。于是, 由 Brouwer 不动点定理可知, 存在 $\mathbf{z}^* \in A$, 使得 $f(\mathbf{z}^*) = \mathbf{z}^*$ 。因此, \mathbf{z}^* 即为产消者在阶段 I 中的均衡投标。于是, 产消者在阶段 I 按 \mathbf{z}^* 投标, 随后储能商在阶段 II 中依据 $s^*(\beta, \sum_{n=1}^N x_n^*, \sum_{n=1}^N y_n^*)$ 选择出清价, 该策略构成储能容量租赁两阶段扩展式博弈的 SPNE。

[证毕]。

命题 2 和命题 3 表明, 统一价格机制下的两阶段博弈中, 储能商的均衡策略依赖于产消者的投标, 而每个产消者的均衡策略则取决于其需求函数和其他产消者的投标, 即同时存在上层储能商和多个产消者间的博弈, 以及下层能源社区内多个产消者内部的博弈。

2.3 多参考价格下的均衡分析

为体现两阶段扩展式博弈模型的一般性, 将两个参考价格推广到任意多个。假设储能容量租赁市场上存在 $k > 2$ 个参考价格, 分别记为 p_1, p_2, \dots, p_k , 且满足 $p_1 > p_2 > \dots > p_k \geq 0$ 。首先, 每个产消者 $n \in \mathcal{N}$ 向储能商提交投标 $(x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^k)$ 并满足 $0 \leq x_n^1 < x_n^2 < \dots < x_n^k$, 其中 x_n^i 表示参考出清价格为 p_i 时产消者 n 的储能容量需求量。基于所有产消者提交的投标, 储能商选择一个参考价格进行市场出清, 并按照统一价格机制完成结算。当储能商选择

价格 p_i 时, 产消者 n 的剩余 $M_n^i(x_n^i)$ 为

$$M_n^i(x_n^i) = U_n(x_n^i) - p_i x_n^i = \int_0^{x_n^i} D_n^{-1}(q) dq - p_i x_n^i \quad (23)$$

最后, 采用类似于两参考价格情形下的均衡分析方法, 给出任意多个参考价格情形下储能商和能源社区内产消者之间两阶段扩展式博弈的 SPNE。

命题 4 若储能容量租赁市场存在 $k > 2$ 个参考价格, 则储能商与产消者间储能容量租赁两阶段扩展式博弈的 SPNE 如下。

(1) 阶段 I 中, 任意产消者的均衡投标为

$$\left\{ \begin{aligned} x_n^{1*} &= D_n(p_1 + \frac{(p_1 - p_2) \sum_{n=1}^N x_n^2 (M_n^2(x_n^2) - M_n^1(x_n^1)) g(\beta_{2,1})}{(\sum_{n=1}^N x_n^2 - \sum_{n=1}^N x_n^1)^2 (G(\beta_{2,1}) - G(\beta_{2,1}))}) \\ x_n^{i*} &= D_n(p_i + \frac{(p_i - p_{i+1}) \sum_{n=1}^N x_n^{i+1} (M_n^{i+1}(x_n^{i+1}) - M_n^i(x_n^i)) g(\beta_{i+1,i})}{(\sum_{n=1}^N x_n^{i+1} - \sum_{n=1}^N x_n^i)^2 (G(\beta_{i,i-1}) - G(\beta_{i+1,i}))}) \\ &\quad \frac{(p_{i-1} - p_i) \sum_{n=1}^N x_n^{i-1} (M_n^i(x_n^i) - M_n^{i-1}(x_n^{i-1})) g(\beta_{i,i-1})}{(\sum_{n=1}^N x_n^i - \sum_{n=1}^N x_n^{i-1})^2 (G(\beta_{i,i-1}) - G(\beta_{i+1,i}))}), \forall i, 1 < i < k \\ x_n^{k*} &= D_n(p_k - \frac{(p_{k-1} - p_k) \sum_{n=1}^N x_n^{k-1} (M_n^k(x_n^k) - M_n^{k-1}(x_n^{k-1})) g(\beta_{k,k-1})}{(\sum_{n=1}^N x_n^k - \sum_{n=1}^N x_n^{k-1})^2 G(\beta_{k,k-1})}) \end{aligned} \right. \quad (24)$$

$$\text{其中, } \beta_{i+1,i} = \frac{p_{i+1} \sum_{n=1}^N x_n^{i+1} - p_i \sum_{n=1}^N x_n^i}{\sum_{n=1}^N x_n^{i+1} - \sum_{n=1}^N x_n^i}.$$

(2) 阶段 II 中, 储能商的均衡策略 $s_k^*(\beta)$,

$$\sum_{n=1}^N x_n^1, \sum_{n=1}^N x_n^2, \dots, \sum_{n=1}^N x_n^k \text{ 为}$$

$$s_k^*(\beta, \sum_{n=1}^N x_n^1, \sum_{n=1}^N x_n^2, \dots, \sum_{n=1}^N x_n^k) = \begin{cases} p_k, & \beta \leq \beta_{k,k-1} \\ p_i, & \beta_{i+1,i} \leq \beta < \beta_{i,i-1}, \forall i, 1 < i < k \\ p_1, & \beta_{2,1} \leq \beta < p_1 \\ \text{取消交易,} & \beta \geq p_1 \end{cases} \quad (25)$$

3 仿真分析

3.1 基础数据

考虑一个包含 20 个产消者的能源社区。每个产消者都配备了光伏系统, 产消者 1—10 具有固定负荷, 而产消者 11—20 具有柔性负荷。产消者日用电量负荷和光伏出力数据来自文献[30], 典型负荷和光伏出力曲线如图 4 所示。分时电价如表 1 所示, 上网电价为 0.041 欧元/kWh^[31]。

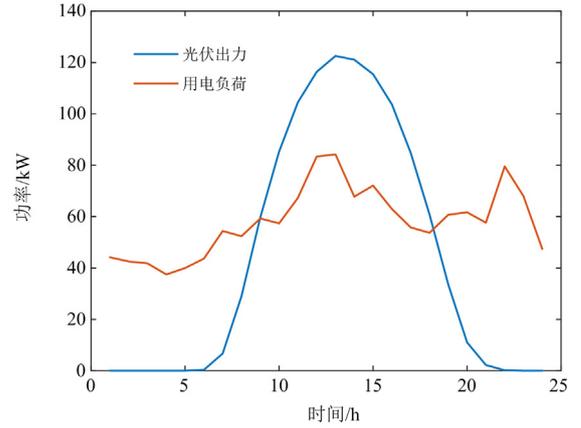


图 4 产消者日前典型用电负荷和光伏出力曲线

Fig. 4 Daily electricity load and PV output curves of prosumer

表 1 分时电价

Table 1 Time-of-use electricity price

时间段	价格/(欧元/kWh)
03:00—07:00	0.074
07:00—09:00; 23:00—02:00	0.084
09:00—11:00; 13:00—19:00; 21:00—23:00	0.13
11:00—13:00; 19:00—21:00	0.16

独立储能商投资了容量为 10 MWh 的锂电池, 其中电池的充放电功率上限为 1.5 MW, 充电和放电的效率均为 0.95。储能商优先为能源社区内的产消者提供储能服务, 剩余的容量则为电网提供服务。基于上述公开的信息, 每个产消者计算其租用储能产生的效用。由于原始效用函数难以给出表达式, 采用二次函数 $\hat{U}_n(q) = a_n q^2 + b_n q$ 进行拟合, 再根据式(10)可得到分段线性需求函数 $D_n(p) = \max\{\frac{p - b_n}{2a_n}, 0\}$ 。为

便于分析且不失一般性, 从产消者 1—10 以及产消者 11—20 中任意选取两个产消者, 即产消者 6 和产消者 15, 作为具有固定负荷和柔性负荷两种类型产消者的代表, 图 5 描述了其初始效用曲线、拟合后的效用函数以及需求函数。由图 5 可以看出: 柔性负荷和储能均能参与需求响应, 并提高产消者对分布式光伏的消纳能力, 降低其用电成本。相较于具有柔性负荷的产消者 15, 具有固定负荷的产消者 6 无法调控负荷, 只能通过租用储能容量降低用电成本, 于是相同价格下对储能容量的需求更高。

容量为 10 MWh 的磷酸铁锂电池的单位储能成本为 0.0525 欧元/kWh^[32], 这一数据为储能商的私人信息。假设产消者对储能商成本的估计是无偏估计, 且服从高斯分布 $N(\beta, \sigma^2)$, 为避免不合理的成本估计, 令标准差取值为 $\sigma = \beta / 2 = 0.0234$, 这表

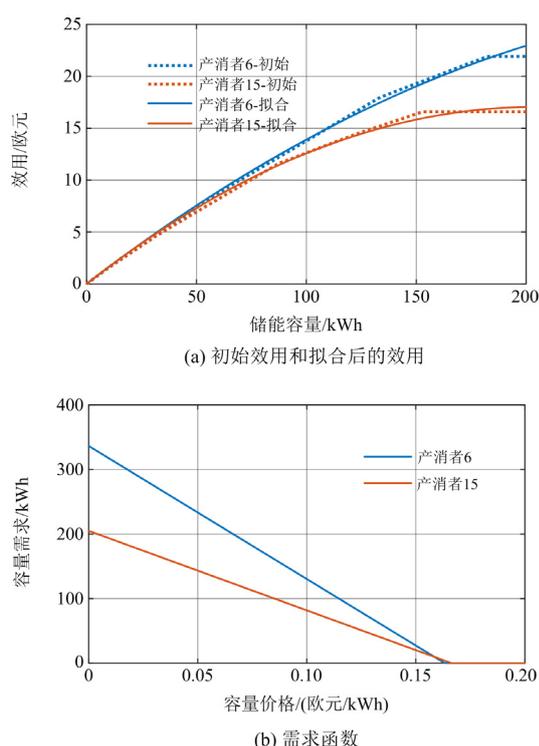


图5 产消者6和产消者15的私人信息示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the private information of Prosumer 6 and Prosumer 15

明产消者估计储能成本位于区间(0,0.105)的概率大于0.95。储能容量租赁市场的最高限价和最低限价分别为0.1欧元/kWh和0.05欧元/kWh,并在最低限价和最高限价之间均匀生成6个容量租赁市场出清参考价格 $p_i = 0.1 - 0.01(i-1)$, $i = 1, 2, \dots, 6$ 。

3.2 算例结果分析

本文对比分析以下3种情形以验证所提模型的有效性。情形1:不存在储能容量租赁;情形2:基于歧视价格机制和两阶段扩展式博弈的储能容量租赁;情形3:基于统一价格机制和两阶段扩展式博弈的储能容量租赁。歧视价格机制下,根据产消者的投标,储能商对不同产消者执行差异化的容量租赁价格。

图6显示了3种情形下每个产消者的用电成本。由图6可以看出:与不参与储能容量租赁市场相比,每个产消者均通过储能租赁节省了用电成本。特别地,具有固定负荷的产消者1—10由于租用了较多的容量来储存多余的光伏发电和低价时的电能,从而避免了在电价昂贵的高峰时段从电网购电,因此其成本降低较为显著。

能源社区某时间段的净需求是所有产消者从电网输入电量与向电网输出电量的差值,图7显示了能

源社区每个时间段的净需求。由图7可以看出,储能容量租赁可以有效地将能源社区的电能购买从中间电价时段08:00—09:00转移到低价时段04:00—05:00。此外,当光伏发电量在12:00—19:00比较充足时,情形2和情形3下输出到电网的过剩光伏发电量会减少。这一结果源于产消者会将其过剩的光伏发电充电到储能设备中,并在20:00—24:00放电以满足其部分负荷。值得注意的是,净需求仍存在负值,这意味着产消者租赁的容量有限,难以消纳所有多余的光伏发电。结合图6和图7可以看出,基于统一价格机制和两阶段扩展式博弈的储能容量租赁,可以通过减少光伏发电和电力需求之间的跨期不平衡量将高价时的负荷转移到低价区间,从而节省了产消者的用电成本。

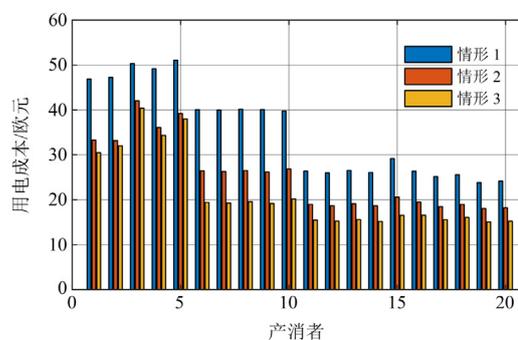


图6 产消者在3种情形下的日用电量成本

Fig. 6 Daily electricity costs of prosumers under three scenarios

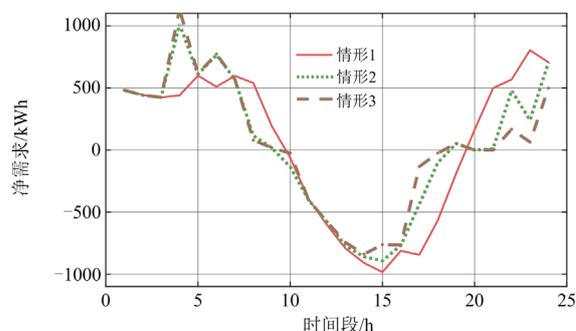


图7 能源社区在3种情形下的净需求曲线

Fig. 7 Net demand curves of energy community under three scenarios

上述用电成本分析没有考虑产消者租用储能的支付。表2显示了两种定价机制下基于两阶段扩展式博弈的储能容量租赁市场中,每个产消者的容量分配、效用、租赁价格以及扣除成本后的剩余。从表2可以看出:1)与情形2相比,情形3中每个产消者均租用了更多储能,产生的效用也更高,然而产消者的支付也更高,导致情形3下产消者的剩余

略低于情形 2，但差异并不显著；2) 与产消者 11—20 相比，产消者 1—10 从储能租赁中获取的剩余更高；3) 情形 2 中产消者租用储能的价格不同，而情形 3 则产生了统一的租赁价格，这表明统一价格机制能形成一个反映不对称成本信息下供需关系的公平租赁价格。为进一步比较情形 2 中歧视价格机制和情形 3 中统一价格机制的均衡结果，表 3 显示了两种定价机制下，能源社区内储能容量租赁总量、产消者总剩余、储能商利润以及由储能商利润和产消者总剩余之和组成的社会福利。从表 3 可以看出，虽然情形 3 下能源社区内所有产消者总剩余低于情

表 2 情形 2 和情形 3 下产消者层面的均衡结果

Table 2 Equilibrium results of Scenario 2 and Scenario 3 on the level of prosumers

产消者	情形 2			情形 3		
	效用/欧元	价格/(欧元/kWh)	剩余/欧元	效用/欧元	价格/(欧元/kWh)	剩余/欧元
1	13.644	0.078	7.401	15.838	0.090	6.684
2	13.483	0.079	7.392	15.451	0.090	6.745
⋮						
9	14.056	0.073	6.750	20.730	0.090	5.611
10	13.093	0.073	6.283	19.299	0.090	5.226
11	7.834	0.074	3.821	10.644	0.090	3.235
12	7.742	0.074	3.779	10.493	0.090	3.201
⋮						
19	5.750	0.072	2.751	8.327	0.090	2.298
20	5.911	0.073	2.835	8.462	0.090	2.374

表 4 两种定价机制在不同成本估计精度下的均衡结果

Table 4 Equilibrium results of two pricing mechanisms under different cost estimation precision

	$\sigma = \beta/2$		$\sigma = \beta/4$		$\sigma = \beta/16$	
	情形 2	情形 3	情形 2	情形 3	情形 2	情形 3
出清价格/(欧元/kWh)	0.07	0.09	0.07	0.10	0.06	0.06
租赁总量/kWh	1354.88	2087.19	1544.93	1718.37	2665.70	2665.70
储能商利润/欧元	29.07	78.27	27.32	81.62	19.99	19.99
产消者总剩余/欧元	98.62	84.09	111.55	66.12	153.80	153.80

最后，社会福利是监管机构选择参考价格的一个重要依据。图 8 显示了参考价格水平对社会福利的影响。从图 8 可以看出：随着参考价格水平的提高，储能商利润增加，产消者剩余降低，总的社会福利也会降低。另外，两端的价格区间体现了储能商和产消者的利益差距和矛盾，中间的价格区间既能平衡利益冲突，也不会对福利造成太大损失，可作为合理的价格区间。

4 结论

为解决独立储能运营商和能源社区内多产消者

表 3 情形 2 和情形 3 下能源社区层面的均衡结果

Table 3 Equilibrium results of Scenario 2 and Scenario 3 on the level of the energy community

	情形 2	情形 3
容量租赁总量/kWh	1354.88	2087.19
产消者总剩余/欧元	98.62	84.09
储能商利润/欧元	29.07	78.27
社会福利/欧元	127.69	162.36

形 2，但统一价格机制在促进容量租赁规模、增加储能商利润以及提升社会福利等方面显著优于歧视价格机制。

高斯分布 $N(\beta, \sigma^2)$ 的标准差 σ 可以度量产消者成本估计的准确性。 σ 越小估计精度越高，而 $\sigma = 0$ 对应了对称成本信息的情况。本文用充分小的 σ ，即 $\sigma = \beta/16$ 来近似对称成本信息的情形。表 4 给出了两种定价机制在不同成本估计精度下的均衡结果。从表 4 可以看出：1) 在不对称信息环境下 ($\sigma = \beta/2$ 和 $\sigma = \beta/4$)，统一价格机制中储能商的利润、产消者的容量租赁量以及均衡出清价均高于歧视价格机制；2) 在对称成本信息下，两机制产生相同的均衡结果，均衡特征是储能商选择以最低价格出清；3) 两种信息环境中，储能商在不对称成本信息下的利润更高，而产消者在对称成本信息下的剩余更高。因此，储能商有动机或理由将其私人成本保密，这合理化了本文关于不对称成本信息的假设，产消者则无法强制要求储能商公开披露其真实的成本信息。

在不对称信息下储能容量租赁的合理定价和有效分配问题，本文提出了一种基于统一价格机制的两阶段扩展式博弈模型，分析了储能商和产消者的均衡策略。通过算例仿真得出以下结论：

1) 储能容量租赁能显著节省产消者的用电成本，具有固定负荷的产消者比具有柔性负荷的产消者对储能容量的需求更高；

2) 基于统一价格机制的市场出清和结算规则在寻找公平租赁价格、增加储能商利润、提高储能容量租赁规模以及提升社会福利等方面均优于歧视价格机制；

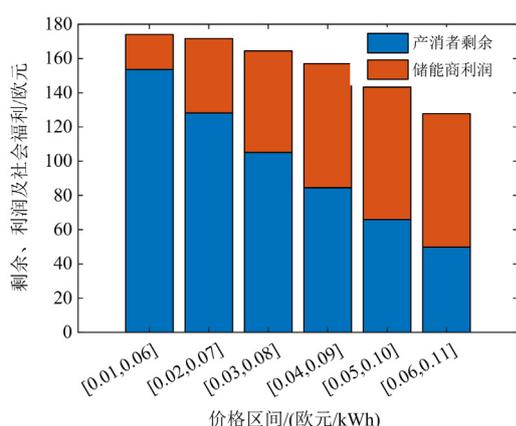


图8 不同参考价格水平下的储能商利润、产消者剩余和社会福利

Fig. 8 Profit of energy storage operator, surplus of prosumers, and social welfare under different levels of reference prices

3) 不对称成本信息有利于增加储能商的利润, 因此储能商有动机通过隐藏关于储能的部分私人信息而获利, 未来在储能等资源的定价和交易中, 需要考虑市场中存在的不对称信息对交易结果的影响。

参考文献

- [1] 郝婷, 樊小朝, 王维庆, 等. 阶梯式碳交易下考虑源荷不确定性的储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 101-112.
HAO Ting, FAN Xiaochao, WANG Weiqing, et al. Optimal configuration of energy storage considering the source-load uncertainty under ladder-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 101-112.
- [2] 宋少群, 熊嘉丽, 张伟骏, 等. 电化学储能参与调频市场的贡献评估方法[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 87-95.
SONG Shaoqun, XIONG Jiali, ZHANG Weijun, et al. A method to evaluate the contribution of electrochemical energy storage participating in frequency regulation market[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 87-95.
- [3] 齐步洋, 卓振宇, 杜尔顺, 等. 考虑储能装置寿命的电网侧规模化电化学储能规划与评估方法[J]. 中国电力, 2023, 56(8): 1-9, 47.
QI Buyang, ZHUO Zhenyu, DU Ershun, et al. Planning and assessment method of large-scale electrochemical energy storage in power grids considering battery aging[J]. Electric Power, 2023, 56(8): 1-9, 47.
- [4] 中国户储产业发展白皮书[R]. 北京: 中国化学与物理电源行业协会储能应用分会(CESA), 2023.
White paper on China household energy storage industry development[R]. Beijing: Energy Storage Application Branch of China Industrial Association of Power Sources (CESA), 2023.
- [5] 江昇, 文书礼, 朱淼, 等. 基于场景线性化重塑的用户侧储能容量高效规划方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 30-37.
JIANG Sheng, WEN Shuli, ZHU Miao, et al. Efficient planning method for demand-side energy storage capacity based on scenario linearization reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 30-37.
- [6] 刘秋华, 杨圣城, 刘鑫. 分布式储能商业模式分析与展望[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(1): 67-73.
LIU Qiu-hua, YANG Sheng-cheng, LIU Xin. Analysis and prospect of distributed energy storage business modes[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(1): 67-73.
- [7] 闫东翔, 陈玥. 共享储能商业模式和定价机制研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 178-191.
YAN Dongxiang, CHEN Yue. Review on business model and pricing mechanism for shared energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 178-191.
- [8] DAI R, ESMAEILBEIGI R, CHARKHGARD H. The utilization of shared energy storage in energy systems: a comprehensive review[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3163-3174.
- [9] 张翔, 廖海君, 周振宇, 等. 含规模化 5G 基站租赁共享储能的配电网混合博弈优化调度[J]. 电测与仪表, 2023, 60(5): 23-32.
ZHANG Xiang, LIAO Haijun, ZHOU Zhenyu, et al. Hybrid game optimal dispatching for distribution network with large-scale 5G base station leasing shared energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 23-32.
- [10] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2011.
- [11] 朱斌, 汪一帆, 孙钢. 基于博弈论的智能电网与需求侧交互管理策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 129-136.
ZHU Bin, WANG Yifan, SUN Gang. Game theory based interactive management strategy between smart grid and demand side[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 129-136.
- [12] 徐钰航, 赵峰, 高锋阳. 基于博弈论的电动汽车轮毂电机热源损耗优化[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 34-40.
XU Yuhang, ZHAO Feng, GAO Fengyang. Optimal design of in-wheel motor loss based on game theory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 34-40.
- [13] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4): 4379-4390.

- [14] YANG Y, HU G Q, SPANOS C J. Optimal sharing and fair cost allocation of community energy storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4185-4194.
- [15] 李咸善, 解仕杰, 方子健, 等. 多微电网共享储能优化配置及其成本分摊[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 44-51.
LI Xianshan, XIE Shijie, FANG Zijian, et al. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 44-51.
- [16] BENEDEK M, FLIEGE J, NGUYEN T. Finding and verifying the nucleolus of cooperative games[J]. Mathematical Programming, 2021, 190: 135-170.
- [17] LIN J, PIPATTANASOMPORN M, RAHMAN S. Comparative analysis of auction mechanisms and bidding strategies for P2P solar transactive energy markets[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113687.
- [18] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, et al. Energy storage sharing in smart grid: a modified auction-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1462-1475.
- [19] ZHONG W, XIE K, LIU Y, et al. Multi-resource allocation of shared energy storage: a distributed combinatorial auction approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4105-4115.
- [20] ZAIDI B H, BHATTI D M S, ULLAH I. Combinatorial auctions for energy storage sharing amongst the households[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 19(1): 291-301.
- [21] FLEISCHHACKER A, AUER H, LETTNER G, et al. Sharing solar PV and energy storage in apartment buildings: resource allocation and pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3963-3973.
- [22] MEDIWATHTHE C P, SHAW M, HALGAMUGE S, et al. An incentive-compatible energy trading framework for neighborhood area networks with shared energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 467-476.
- [23] 陈曦, 付文龙, 张海荣, 等. 考虑新能源发电不确定性的含微电网群共享储能优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 219-236.
CHEN Xi, FU Wenlong, ZHANG Hairong, et al. Optimal dispatching strategy of shared energy storage and multi-microgrid considering the uncertainty of new energy generation[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 219-236.
- [24] 许梓荣, 刘友波, 殷科, 等. 基于主从博弈的售电商储能增值服务模式及其策略模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 154-165.
XU Zirong, LIU Youbo, YIN Ke, et al. Value-added service mode and its strategy model of energy storage for electricity retailers based on Stackelberg game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 154-165.
- [25] 孙文杰, 武家辉, 张强. 基于双层博弈的配电网与多综合能源微网协调优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 26-38.
SUN Wenjie, WU Jiahui, ZHANG Qiang. Coordinated optimization of a distribution network and multi-integrated energy microgrid based on a double-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 26-38.
- [26] 赵海岭, 王维庆, 李笑竹, 等. 发电侧多主体投资低碳综合微网氢储能的演化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 49-62.
ZHAO Hailing, WANG Weiqing, LI Xiaozhu, et al. Evolution strategy of low carbon integrated microgrid hydrogen energy storage with multi-agents investment on the power generation side[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 49-62.
- [27] 河南省“十四五”新型储能实施方案[R]. 郑州: 河南省发展和改革委员会, 2022.
- [28] 加快推动广西新型储能示范项目建设的实施意见[R]. 南宁: 广西壮族自治区发展和改革委员会, 2023.
- [29] MASCHLER M, SOLAN E, ZAMIR S. Game theory[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [30] LEZAMA F, SOARES J, HERNANDEZ-LEAL P, et al. Local energy markets: paving the path toward fully transactive energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 4081-4088.
- [31] Applied Science, 2020, 10(20): 7366.
- [32] PNNL. Energy storage cost and performance database[EB/OL]. <https://www.pnnl.gov/ESGC-cost-performance>.

收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-03-25

作者简介:

徐爽(1994—), 女, 博士后, 研究方向为博弈论、电力市场与虚拟电厂; E-mail: 775103442@qq.com

崔世常(1994—), 男, 通信作者, 博士后, 研究方向为分布式智能电网优化与需求响应、电力系统规划。E-mail: shichang_cui@hust.edu.cn

(编辑 许威)