

基于需求侧资源响应量配额转让的园区能源优化技术

李彬, 王枫桥, 唐天悦

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 为了充分挖掘和利用需求侧资源的互动响应能力, 优化园区资源配置并提升园区整体效益, 基于用户协同自治的行为提出了响应量配额转让机制, 并构建了主从博弈框架下的响应量核算模型。在该模型中, 聚合商作为领导者负责制定动态的配额转让电价, 引导用户协同; 用户作为跟随者, 根据聚合商发布的电价信号调整自身的用电及响应量策略。通过对主从博弈模型的设计与求解, 探索了能够促进用户间响应量共享的最优化分配策略, 模型通过迭代算法求解确保聚合商与用户之间的决策互动达到斯塔克伯格均衡点。结果表明, 通过合理的响应量配额转让激励机制和协同自治模式, 可在保障用户利益的同时实现园区能源系统的经济性与环保性双重目标。

关键词: 响应量核算; 配额转让机制; 用户协同自治; 主从博弈; 需求侧响应

Energy Optimization Technology for Parks Based on Demand-Side Resource Response Quantity Quota Transfer

LI Bin, WANG Fengqiao, TANG Tianyue

(School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to fully exploit and utilize the interactive response capability of demand-side resources, optimize the resource allocation of the park and enhance the overall efficiency of the park, this paper proposes a response quantity quota transfer mechanism based on the cooperative and autonomous behaviors of users, and constructs a response quantity accounting model under the framework of master-slave game. In this model, the aggregator as a leader is responsible for setting dynamic quota transfer tariffs and guiding the users to collaborate, and the users as followers adjust their own electricity consumption and response quantity strategies according to the tariff signals released by the aggregator. Through the design and solution of the master-slave game model, this paper explores the optimal allocation strategy that can promote the sharing of response quantity among users, and the model is solved by an iterative algorithm to ensure that the decision-making interaction between the aggregator and users reaches the Stackelberg equilibrium point. The results show that the dual goals of economy and environmental protection of the park energy system can be realized while protecting the interests of users through a reasonable incentive mechanism for the transfer of response quantity quotas and a collaborative autonomy model.

Key words: response volume accounting; quota transfer mechanisms; collaborative user autonomy; master-slave games; demand-side response

0 引言

为深入贯彻落实碳达峰、碳中和重大战略决策, 强化源网荷储一体化调控技术体系, 推进电力

系统向高比例可再生能源高效消纳、需求侧可调节负荷深度互动的方向转型升级, 在电力市场中, 负荷聚合商、虚拟电厂运营商代理工商业用户参与电网的各类型互动项目成为提升系统灵活性的关键主体^[1]。然而, 用户响应量的核算受外界环境因素影响较大, 由于缺乏有效的计算手段, 难以充分发挥海量需求侧资源的互动能力。实现用户响应量的准确核算能够为能源管理和市场运营提供科学依据,

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2402900)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2022YFB2402900).

因此如何优化园区内部的能源分配机制、提升清洁能源利用率已成为学术界和工业界共同关注的核心问题。近年来,随着智能电网信息化和数智化技术的发展,用户协同自治的理念逐渐兴起,为园区内部能源优化配置提供了新的解决思路。国家能源局印发的《2025年能源工作指导意见》明确提出了提升需求侧协同能力、推进虚拟电厂高质量发展的建设目标^[2],传统园区能源调度方式多依赖于集中式管理模式^[3],但该模式难以应对分布式能源系统中供需波动性强、用户行为多样化等挑战。在此基础上,基于博弈论的动态定价机制和容量配额转让模型成为研究热点^[4-7]。

传统的需求响应模型多集中于单一用户或单向调控策略^[8-9],难以适应园区复杂场景中多用户协同自治的需求,为此国内外研究学者针对园区内用户调控策略进行了研究,重点围绕园区容量配置^[10-12]、控制策略^[13-14]、资源规划^[15]等方面开展研究,文献[16]提出了一种考虑分布式储能资源管理及协同调控策略,实现提升分布式储能在电力系统中的调节、响应、调度能力,为后续储能参与新型电力系统建设及协同提供参考。文献[17]构建了虚拟储能与实体储能融合模型,基于分布鲁棒优化算法实现实体储能最优容量配置策略,保障主体利益最优。此外,现有研究对用户间响应量配额转让机制的设计尚不完善,特别是在清洁能源消纳和动态电价引导下的协同优化方面仍存在较大提升空间^[18-20],文献[21]提出一种基于斯塔克伯格-纳什博弈的低碳最优调度策略,设计了高耗能企业参与用电申报的碳配额激励机制。文献[22]提出了考虑电动汽车与政府的碳配额转让双层博弈模型,政府采取碳配额交换策略引导用户,解决了不受监管的碳信用交易。文献[23]构建了差分博弈模型,探讨基于集中式和分散式碳转让增量成本对碳配额分配的影响,差分博弈模型克服了传统方法存在时间滞后的缺点。上述文献的研究重点主要集中在碳配额领域,而对于负荷响应量的优化配置及用户间的协同互动机制却鲜有深入探讨,尽管主从博弈框架已被引入需求响应领域^[24],但其在促进用户间协同自治、探究响应量配额转让和提升环境效益方面的潜力尚未被充分挖掘。

因此,如何设计一种既能激励用户参与又能实现园区整体优化的响应量核算模型成为当前研究亟

需解决的关键问题。本文以园区内部响应量配额转让机制为研究对象,基于用户协同自治的理念提出了一种创新的响应量核算模型。该模型通过聚合商制定动态共享售购电价格策略,引导用户根据自身需求调整用电行为,从而实现园区整体能耗成本最小化及环境效益最大化的目标。

1 考虑用户协同的响应量配额转让机制

1.1 响应量配额转让机制

园区聚合商和园区用户是机制下的利益共同体,在响应量共享过程中保持合作关系^[25],聚合商通过信息通信技术把电力系统产业链中的源、荷、储等部分有效地结合起来^[26-27],其对电网侧扮演用户角色,与电网进行售买电行为;对园区用户侧扮演服务提供商角色,统筹协调园区用户与电网之间售买电交易及用户之间协同互动的响应量配额转让交易。用户是独立的利益个体,不同用户之间存在利益竞争关系。该响应量共享模式如图1所示,能够同时使运营商与园区用户利益最大化,并且对于园区整体能达到供需平衡,提升新能源消纳率。

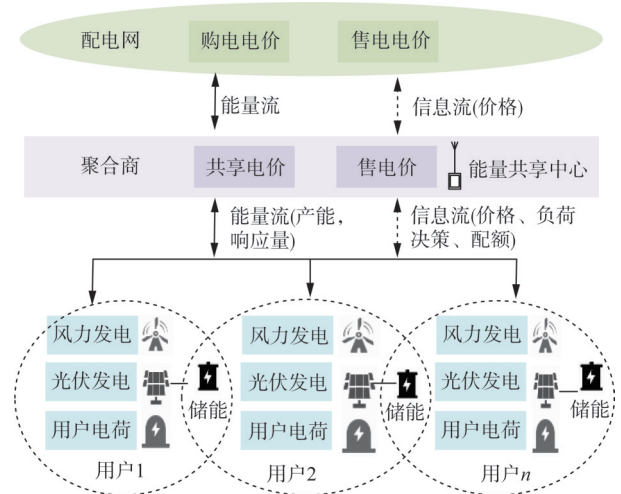


图1 园区响应量配额转让模式图

Fig. 1 Map of park response volume quota transfer model

在配额转让过程中,考虑响应量共享配置涉及两个决策主体,即以园区用户-用户配额转让交易为主的用户决策主体、以园区电网侧-聚合商-用户交易为主的聚合商决策主体。对于用户侧的主要诉求是快速消纳富余能源,对分布式光伏、储能、分散式风电、可控分布式电源(本文以电池储能为例)参与的用户响应进行优化并获得收益。聚合商作为

园区内用户与外部电网市场交易的枢纽维持整个园区的交易平衡,提供租用输电线路的选择,使区内用户能够基于配额转让机制选择负荷策略,通过净计量计划将剩余的能源注入电网。因此园区聚合商-用户配额转让模式应用背景设定为日前时间尺度,园区内采用动态电价,以快速响应用户需求。

1.2 园区内用户协同自治行为分析

上网电价计划为用户积极参与电力市场提供了一种机制,通过在需求高峰期接收电网电力,并在生产超过其容量时将剩余能源出售回电网^[28]。但缺点是用户获得的剩余电力补偿相对较低。用户协同发电类型资源与邻居进行交易,用户可以在区内交换额外的响应量,并且随市场波动而调整,通过用户侧本地互补的方式提升了能源系统的可靠性并降低了成本。

配额转让的响应量主要来源于用户光伏能源生产的电能或者负荷的可调节能力。配额转让机制中用户根据需求买入其他用户或卖出自身生产的清洁能源。园区中的多个不同用户提供报量,在首次博弈过程中,聚合商通过报量制定购售电价格,提供的价格对所有合作伙伴都是相同的。用户可根据接收的信息做出决策接受或拒绝配额转让、售电或买电。如果接受,则会向其他市场参与者公开,并由达成交易的用户-用户组成新的联盟。否则,每个用户将在下一轮中根据聚合商发布信息进行下一时段的交易。设定园区任意用户 n 在 t 时段消耗电能 $L_{n,t}$,生产总电能 $E_{n,t}$ 。当用户生产的能源大于消耗的电能,即 $E_{n,t} > L_{n,t}$ 时,用户 n 作为卖家将富余响应量卖给其他用户获得利润;当用户生产的能源小于消耗的电能,即 $E_{n,t} < L_{n,t}$ 时,用户 n 作为买家向园区运营商或其他用户购买电能以维持正常工业生产,用户通过多余的响应量或负荷容量不足情况下与其他用户完成配额转让。

在园区响应量配额转让模式中,聚合商是园区用户与配电网交易、用户-用户交汇枢纽。聚合商通过收取响应量配额转让租赁费用来实现自身收益最大。每一轮共享结束后,园区聚合商获得用户上传的响应量配额信息,参与外部电力市场以实现园区内部容量平衡,具体职能如下所示:当园区内总净负荷不小于0时,园区聚合商向配电网购买所需电能;园区总负荷为负时,园区聚合商向配电网出售多余容量。园区聚合商与园区用户组成了响应量

配额转让网络,提升了新能源消纳水平。

2 聚合商-用户响应量共享日前优化模型

2.1 园区内部响应量配额转让优化模型

聚合商园区内部用户容量由用户消耗负荷、光伏、风电产能以及储能系统组成,消耗的负荷 $L_{n,t}$ 主要为固定负荷 $L_{n,t}^{\text{pl}}$ 与响应量 $D_{n,t}$ 组成。与其他用户进行响应量转让时,由聚合商设置电价,主要由储能电站进行配额交易。与通过聚合商和电网侧进行交易相比,用户更倾向于通过园区内部交易实现整体响应量平衡,以削弱内部光伏、风电的间歇性与波动性对电网的影响并实现主体更大收益。因此,园区内部容量日前决策的目标函数为园区内部与电网交易值最小值,如式(1)所示。

$$\min W = \begin{cases} \sum_{t=0, n \in \phi}^T \delta_t^{\text{gb}} \sum_{n=0}^M (\tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}} - \tilde{L}_{n,t} - s_t), \\ \tilde{L}_{n,t} - \tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}} + s_t < 0 \\ \sum_{t=0, n \in \phi}^T \delta_t^{\text{gs}} \sum_{n=0}^M (\tilde{L}_{n,t} - \tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}} + s_t), \\ \tilde{L}_{n,t} - \tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}} + s_t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta_t^{\text{gb}} = \frac{P_t^{\text{gbmin}}}{P_t^{\text{gb}}} \quad (2)$$

$$\delta_t^{\text{gs}} = \frac{P_t^{\text{gs}}}{P_t^{\text{gsmax}}} \quad (3)$$

式中: n 为第 n 个用户; ϕ 表示整个园区用户集合; M 为整个园区用户数量; W 为整个园区净负荷容量; T 为用户决策周期; δ_t^{gb} 、 δ_t^{gs} 分别为园区向电网购、售电量权重系数,反映了用户通过聚合商向电网购售电意愿; P_t^{gb} 、 P_t^{gs} 分别为电网侧的购、售电价; P_t^{gsmax} 为电网侧售电价格最大值; P_t^{gbmin} 为电网侧购电价格最小值; $\tilde{L}_{n,t}$ 为园区内用户负荷预测值; $\tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}}$ 为园区内用户总产能; s_t 为储能系统充放电量,当 $s_t < 0$ 时储能系统放电, $s_t > 0$ 时储能系统充电。 $\tilde{L}_{n,t} - \tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}} + s_t < 0$ 时园区有富裕电量,聚合商向电网售电; $\tilde{L}_{n,t} - \tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}} + s_t > 0$ 时,园区当生产的电能不能满足负荷需要,聚合商向电网购电。

用户负荷响应量 $D_{n,t}$ 受到约束如式(4)所示, $D_{n,t \max}$ 、 $D_{n,t \min}$ 分别为 t 时刻用户负荷响应量最大值、最小值。

$$D_{n,t \min} \leq D_{n,t} \leq D_{n,t \max} \quad (4)$$

储能充放电量受到如下约束:

$$S_t = S_{t-1} + s_t \quad (5)$$

$$S_0 = S_T \quad (6)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (7)$$

式中： S_t 为储能系统在 t 时刻的存储电量，等于原始存储量加上这一时刻的充放电量； $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$ 分别为储能容量上下限。为确保在 $[0, T]$ 时段内园区容量清算，系统存储电能初始结束状态相等。电网购售电价约束情况如下。

$$P_t^{\text{gb}} \geq P_t^{\text{gbmin}} \quad (8)$$

$$P_t^{\text{gs}} \leq P_t^{\text{gsmax}} \quad (9)$$

当电网售电价格越高，园区向配电网售电权重系数越大，电网侧售电价格达到最大值 P_t^{gsmax} ，园区向电网购电量最小；当电网购电价格越低，园区向配电网购电权重系数越小，当购电价格达到最小值 P_t^{gbmin} ，园区向电网售电量最小。

园区用户的收益由工业生产中参与配额转让收益激励、响应量配额转让收益组成，其中不包含用户交易路径成本。每个园区用户参与响应量配额转让的目的均为收益最大化，目标函数如式(10)所示。

$$\max \sum_{t=0, n \in N}^T R_{n,t}^u \quad (10)$$

$$\sum_{n=0}^N R_{n \in N, t}^u = \begin{cases} \varepsilon \ln(1 + \Delta D_{n,t}) \cdot \Delta t - \varphi \tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}} \cdot \Delta t + p_t^{\text{us}} \Delta D_{n,t} \cdot \Delta t - L_{n,t}^{\text{pl}} P_t^{\text{gs}} \cdot \Delta t, & \Delta D_{n,t} \geq 0 \\ \varepsilon \ln(1 + \Delta D_{n,t}) \cdot \Delta t - \varphi \tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}} \cdot \Delta t - p_t^{\text{ub}} \Delta D_{n,t} \cdot \Delta t + -L_{n,t}^{\text{pl}} P_t^{\text{gs}} \cdot \Delta t, & \Delta D_{n,t} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta D_{n,t} = \tilde{D}_{n,t} - D_{n,t} \quad (12)$$

式中： N 为园区内参与响应量共享的用户集合； Δt 为用户在 t 时刻参与配额转让的时间步长， h ； $L_{n,t}^{\text{pl}}$ 为园区内部用户固定负荷； $R_{n,t}^u$ 为园区内用户 n 的收益； $\varepsilon \ln(1 + \Delta D_{n,t})$ 为用户参与响应配额奖励收益， $\varepsilon \ln(\cdot)$ 为用户响应意愿程度，此处表明用户参与配额转让奖励； φ 为用户单位时间生产电能所需的成本； P_t^{ub} 、 P_t^{us} 分别为聚合商设定用户与用户交易时的购、售电价； $\Delta D_{n,t}$ 为用户参与配额转让交易响应量； $\tilde{D}_{n,t}$ 为用户 n 预测响应量； $D_{n,t}$ 为用户实际响应量。 $\Delta D_{n,t} \geq 0$ 表示用户参与配额转让且有富余响应量可转让给其他用户获得收益， $\Delta D_{n,t} < 0$ 表示用户响应量额度不足需要参与园区能量配额转让购买其他用户额度。

为确保园区用户尽量能在区内通过配额转让保

证容量耗用平衡，聚合商设定的电价满足式(13)约束。

$$P_t^{\text{gb}} \leq P_t^{\text{ub}} \leq P_t^{\text{us}} \leq P_t^{\text{gs}} \quad (13)$$

由式(13)可知，对于每个时间周期 T ，园区聚合商设置的初始配额转让电价 P_t^{ub} 和 P_t^{us} 分别为 P_t^{gb} 和 P_t^{gs} 。随着园区配额转让购电价增大，作为卖方用户会选择尽可能减少耗能，从而增加可售响应量配额来增大收益。随着园区售电价降低，作为买方用户会选择减少自身实际响应量，从而购买园区其他用户更多转让响应量，但购买响应量会消耗储能成本增大，还会因为能源消纳不完导致能源浪费^[29]，以此制约用户购买过多，达到能源消耗平衡、提升新能源消纳率的目的。由于电力负荷受到式(4)的约束，买家减少负荷空间有限。因此，本文讨论的园区用户在 $[0, T]$ 时间段只能做出一个决策，购售电价身份不会转变。

2.2 园区聚合商响应量配额转让优化模型

对于园区聚合商来说，聚合商设定电价满足式(13)约束，聚合商根据园区用户优化结果协商区内配额转让行为，核算整体容量完成出清。聚合商目标函数如下。

$$\max U_t = R_t^g - C_t^s \quad (14)$$

式中： U_t 为 t 时刻运营商的收益，包含外部电网交易收益 R_t^g 和聚合商调用储能服务总成本 C_t^s ，如式(15)~(17)所示。

$$L_{\text{ac}} = \sum_{t=0}^T \sum_{n=1}^N (\tilde{L}_{n,t} - \tilde{D}_{n,t}) \quad (15)$$

$$R_t^g = \begin{cases} p_t^{\text{gs}} L_{\text{ac}} \cdot \Delta t, & L_{\text{ac}} \geq 0 \\ p_t^{\text{gb}} L_{\text{ac}} \cdot \Delta t, & L_{\text{ac}} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$C_t^s = \gamma |s_t| \cdot t \quad (17)$$

式中： L_{ac} 为 t 时刻园区实际负荷， $L_{\text{ac}} \geq 0$ 时，园区内用户上传负荷大于可调节负荷，此时聚合商向电网买电， $L_{\text{ac}} < 0$ 时，园区内部上报负荷小于可调节负荷，此时园区内部有多余响应量，因此聚合商向电网售电； C_t^s 为聚合商调用储能服务的总成本； γ 为调用储能服务的单位成本。

3 基于主从博弈的最优响应量核算模型

在响应量共享配额转让机制中，主要涉及到两类关键利益相关者：园区聚合商和园区用户。在每一个参与配额转让时刻 t ，聚合商通过调整园区内的响应量共享价格影响用户的收益情况，鼓励园区

内清洁能源的使用。与此同时,用户也可以通过改变自己的用电策略来对聚合商的利益产生影响。如果用户的能耗过高,将会导致聚合商不得不从外部市场购买更多的电能,从而对其经济效益造成负面影响。这种双方为了各自最大利益而相互作用的过程可以构建为一个斯塔克伯格主从博弈模型^[30],如式(18)所示,本文通过迭代算法求解。

$$\mathbf{G}^{\text{gu}} = \left\{ \begin{array}{l} \tilde{E}_{n,t}^{\text{gl}}, \tilde{L}_{n,t}^*, \tilde{D}_{n,t}^*, R_{n,t}^{\text{u}*}, \Delta D_{n,t}^* \\ P_t^{\text{gs}*}, P_t^{\text{us}*}, P_t^{\text{ub}*}, P_t^{\text{gb}*}, U_t^* \end{array} \right\} \quad (18)$$

式(18)所表示的斯塔克伯格均衡解, $\mathbf{G}^{\text{gu}}$ 表示一个向量,其中所有带上标星号(*)的变量均表示在所述模型达到均衡状态时该变量的最优值。此外,在实际操作过程中,该模型还考虑到了多方面的约束条件,比如响应量交易供需平衡、与外部电网交易量最小等,确保了整个系统运作的有效性和公平性。这样的机制设计不仅促进了清洁能源的应用与普及,也有利于推动节能减排的开展,对于构建更加绿色低碳的社会环境具有重要意义。

本文建立的配额转让下博弈框架如图2所示,构建的主从博弈框架下主要有两类利益主体:聚合商(领导者)与园区用户(跟随者),双方均以自身收益最大化为目标进行决策互动。具体流程和求解方法如下。

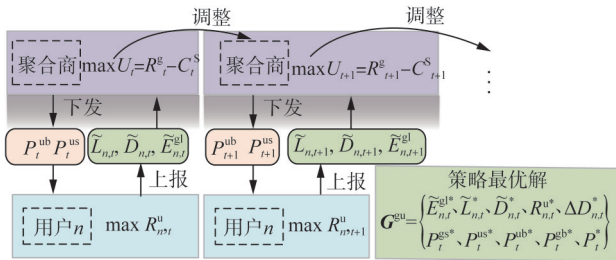


图2 配额转让下博弈框架图

Fig. 2 Framework diagram of the game under quota transfers

1) 初始化: 确定参与博弈的用户集合 ϕ 和聚合商; 初始化时间 t 和各用户的初始负荷策略 $\{\tilde{L}_{n,t}, \tilde{D}_{n,t}, E_{n,t}^{\text{gl}}\}$; 聚合商设定初始的购电价格、售电价格 $P_t^{\text{ub}}, P_t^{\text{us}}$ 。

2) 用户响应: 用户基于发布的电价信息以及对 t 时刻前负荷量变化调整自己的负荷策略, 以自身收益为目标 $R_{n,t}^{\text{u}}$; 用户上报更新后的负荷决策 $\{L_{n,t+1}, \tilde{D}_{n,t+1}, \tilde{E}_{n,t+1}^{\text{gl}}\}$, 并决定是否参与园区配额转让交易, 将发电量、响应量上报给聚合商。

3) 聚合商优化: 聚合商根据用户的反馈信息重新计算并优化购售电价 $P_{t+1}^{\text{ub}}, P_{t+1}^{\text{us}}$, 以最大化自身的总利润 U_t 。

4) 聚合商将新的价格信息下发给用户, 并进入到下一决策周期。

5) 迭代收敛: 重复步骤2)、3)直到所有用户负荷策略不变, 聚合商价格策略也达到最优, 当所有参与配额交易的用户都无法通过单独改变自身策略扩大自身收益时, 即达到了斯塔克伯格均衡点^[30]。

4 实验结果分析

算例基于某园区用电数据, 以园区聚合商、5个园区用户与储能系统为研究对象, 检验了所提方法的有效性。本文设定园区电源为光伏、风机、燃气轮机发电等, 设置调度周期为一天 24 h 的发电量、用电量, 其中, 每组用户包括 4 台 0.5 MW 风力发电机、一个 1 MW 光伏电站、3 组铅蓄电池, 储能系统的额定容量为 8 000 kWh, 最大充放电量为 3 000 kWh, 初始存储电量设置为 900 kWh, 充放电效率为 95 %。

为进一步研究用户协同自治对园区用户、聚合商策略选择及效益影响, 探究其在容量核算方面的贡献, 本文设计了两个场景 Z1、Z2。在 Z1 场景下园区内有富余响应量或参加响应时通过聚合商与电网侧交易; 在场景 Z2 下园区用户协同自治即有富余响应量时优先与其他用户进行配额转让交易, 当整个园区内净负荷不为 0 时, 园区内部与电网侧进行交易, 在此基础上探究整个园区响应量核算结果及各主体收益情况。

4.1 参数设定

参考工商业分时电价与新能源上网电价, 外部市场的购、售电价格采用峰-谷-平电价机制如表 1 所示。外部电网购电电价最小值 P_t^{gbmin} 设定为 0.3 元/kWh, 售电价最大值 P_t^{gsmax} 设定为 0.907 元/kWh, 上网电价设定为 0.3 元/kWh, 园区内电价始终处于分时电价和上网电价之间。

表 2—3 定义了园区内 5 位用户的相关参数, 聚合商调用储能的服务费用 γ 为 0.084 元/kWh。 $P_{n,t\text{max}}, P_{n,t\text{min}}$ 分别为负荷响应量上、下限, $S_{\text{max}}, S_{\text{min}}$ 分别为储能系统容量上、下限。

图 3 为某典型日园区可再生能源的出力曲线。

表 1 分时电价表(外部电网设定)

Tab. 1 Time-of-use tariff table (external grid setting)

时段	元/kWh		
	峰(09:00—11:00) (15:00—22:00)	谷(00:00—07:00) (22:00—00:00)	平(07:00—09:00) (11:00—15:00)
购电价格	0.5	0.3	0.35
售电价格	0.907	0.325	0.6517

表 2 园区用户参数约束

Tab. 2 Campus user parameter constraints

用户	响应量上下限/kW		储能上下限/kWh	
	$D_{n,t \min}$	$D_{n,t \max}$	$S_{\min}$	$S_{\max}$
1	50	200	800	8 000
2	100	700	850	8 000
3	75	500	800	7 500
4	100	400	850	8 000
5	75	500	900	7 500

表 3 园区用户成本参数

Tab. 3 Cost parameters for campus users 元/kWh

用户	成本		
	φ	γ	ε
1	0.059 2		0.363 2
2	0.075 9		0.578 4
3	0.037 9	0.084	0.469 7
4	0.120 9		0.538 2
5	0.085 3		0.533 9

在该测试系统中,所有用户配备了分布式光伏发电装置,光伏产能时间段为07:00—19:00,最大发电时间段在10:00—15:00,园区内还部署了风力发电设施,风电出力分布在全天各个时段,风电的最大出力时间段并不固定,受风速变化的影响较大,其输出功率具有显著的随机性和波动性。

4.2 电价优化结果

基于以上参数,本文展示了外部电网与园区内部聚合商的均衡电价以及园区内用户协同自治激励电价,如图4—5所示。图4为场景Z1中园区聚合商设定的购售电价,图5为场景Z2园区聚合商设定的每小时动态电价。整体上看购电价格小于售电价格且两场景全时段买卖电价变化趋势基本一致,均在光伏高发时段11:00—14:00和负荷高峰期内保持较高价格,在其余时段维持较低价格。

由图4—5分析可知,风电、光伏产能主要集

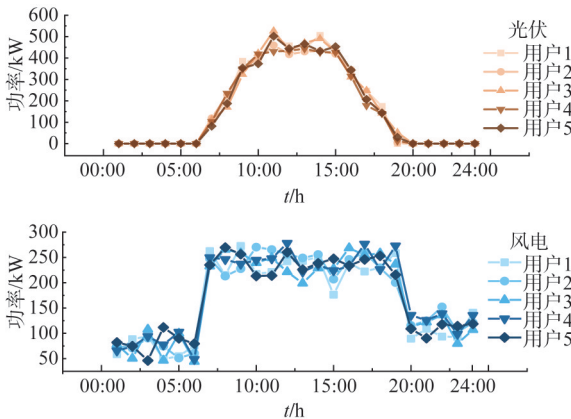


图 3 园区 5 个用户分布式电源出力曲线

Fig. 3 Distributed power output curve for 5 users in the park

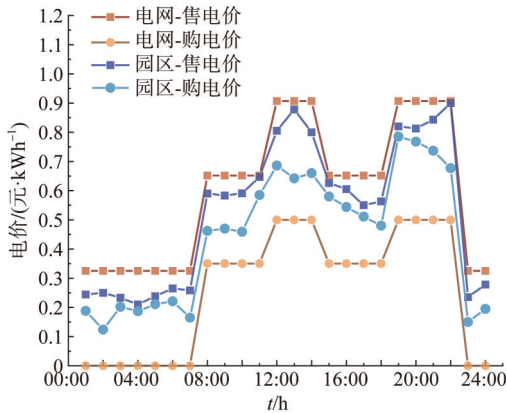


图 4 场景 Z1 实时电价图

Fig. 4 Scenario Z1 real-time electricity price graph

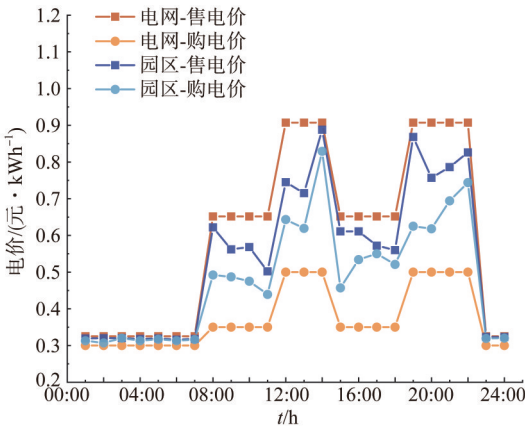


图 5 场景 Z2 实时电价图

Fig. 5 Scenario Z2 real-time electricity price graph

中在07:00—19:00时段内,在14:00点后,由于园区用户处于光伏发电高峰期,整体清洁能源富余,用户参与需求响应意愿大,响应量与其他时段相比较高,因此园区聚合商降低响应量配额转让电价引

导用户进行配额转让促进清洁能源消纳并获得较大收益,相较于场景Z1场景Z2售电价下降趋势较大,这是因为园区内部交易售电价降低后用户倾向购买其他用户意愿更高促进用户协同;在01:00—06:00与20:00—00:00时段内,清洁能源产能小,尤其在20:00此时清洁能源出力结束且正处于负荷高峰期,园区内部实时电价由最低急剧上升至最高,这是因为此时聚合商电价策略是通过提升电价促进用户转移用电时段,参与响应以缓解高峰时刻供电压力。

与场景Z1相比,Z2与Z1的购售电价波动趋势相近,但总体上受用户自治行为影响Z2的整体波动趋势较大,这是因为在负荷尖峰时刻园区价格受用户协同影响大,对Z2买家来说,场景Z2的共享机制更鼓励用户实现能源消纳,单位用电成本更低,园区整体收益更高。整体来看,聚合商对负荷的激励售电价始终低于电网电价,而购电价始终高于上网电价。这种情况下,无论是购电还是售电,基于自身利益考虑,用户都会选择优先在园区内部进行配额转让交易,实现园区内用户响应量核算。

4.3 用户策略结果分析

进一步分析用户协同自治下买卖家负荷策略,其中用户1配备了备用电源,用户2、3在清洁能源产能高峰期响应量卖家,其余时段为响应量买家,用户4、5为响应量互济者。图6比较了不同类别用户优化负荷策略及用户共享互济交易响应量。

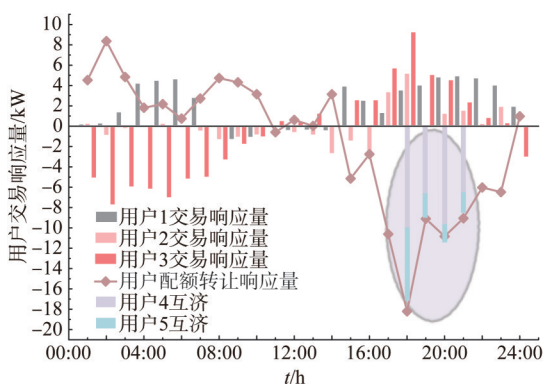


图6 场景Z2交易电量图

Fig. 6 Scenario Z2 transaction power graph

由图6可知,在08:00前园区产能较小时,用户1响应量交易为正交易即用户1可以参与响应且能转让自己的响应量配额。对卖家用户2、3来说,在用户负荷高峰时期08:00—20:00,受可调节负荷

约束光伏高发阶段买售电行为明显,在00:00—08:00时间段清洁能源出力较弱,用户2、3行为表现为负交易即需要参与响应量配额转让向园区其他用户购买响应量;在10:00—14:00时间段光伏、风电出力最大,用户2、3行为表现为内部容量平衡表现为不参与响应量配额转让交易;在14:00—22:00时间段光伏、风电出力累计到峰值,用户2、3行为表现为正交易即参与响应量配额转让向园区出售自己的响应量。

以19:00为例,用户1、2、3在园区交易响应量分别为4.1 kW、-0.12 kW、5.13 kW,即用户2需要0.12响应量,用户1、3给用户20.12 kW响应量,满足用户2后还剩余9.11的响应量,因此园区配额转让响应量为9.11 kW,用户4、5参与互济共补,用户4的响应量分别为6.9 kW、2.2 kW,共计9.11 kW,实现了园区多用户点到点响应量核算,提高了互动灵活性。

在主从博弈框架下,园区聚合商通过配额转让机制与动态博弈策略系统性挖掘用户侧需求响应潜力以提升新能源消纳能力。具体而言,聚合商首先通过配额定价引导用户调整负荷策略,同时整合响应意愿较低或需求感知能力弱的分散用户,依托配额转让机制提升其参与度,从而实现对分散资源的聚合。随着配额交易市场的活跃度提升,参与交易的园区与用户规模扩大,分布式资源(如光伏、储能设备)的整合容量显著增加。例如,午间光伏出力高峰时段聚合商可将用户群中尚未响应的部分通过交易机制实时匹配至其他用户群消纳,在降低弃光率的同时提高整体消纳效率。将本文提出的场景Z2下基于用户协同自治交易的新能源消纳量与场景Z1不参与协同自治的消纳量进行比较,对比结果如图7所示,在光伏出力07:00—19:00时段,新能源消纳量较高,场景Z2的消纳量为38.42 MWh,比场景Z1提升2.05%。

以园区用户1、2、3交易分析,在场景Z1下,园区内用户不参与配额共享,即通过聚合商与外部电网交易,交易收益情况如图8所示,累计一天交易12 474元,在场景Z2下,园区内用户参与配额共享,即在园区内部完成响应量核算,收益情况如图9所示,累计一天交易58 383元,在Z2场景下用户收益高于Z1场景45 909元,具体收益详见表4。

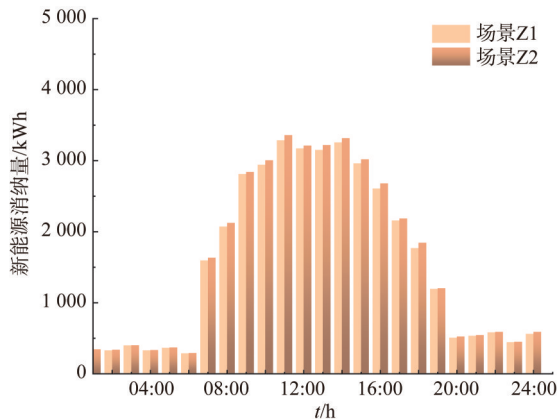


图7 新能源消纳量对比图

Fig. 7 New energy consumption comparison graph

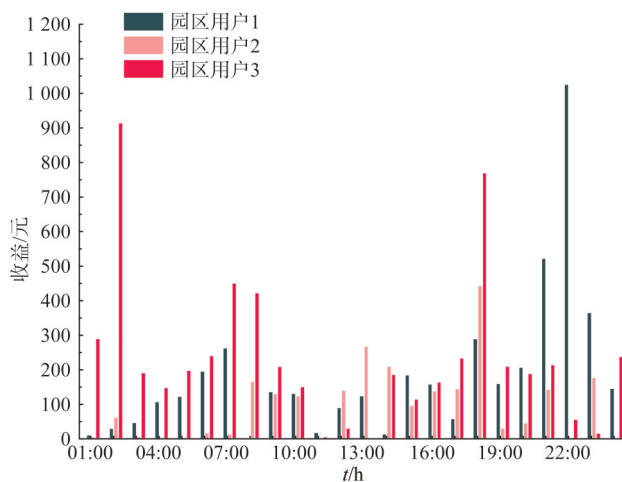


图8 场景Z1用户收益图

Fig. 8 Scenario Z1 user benefits picture

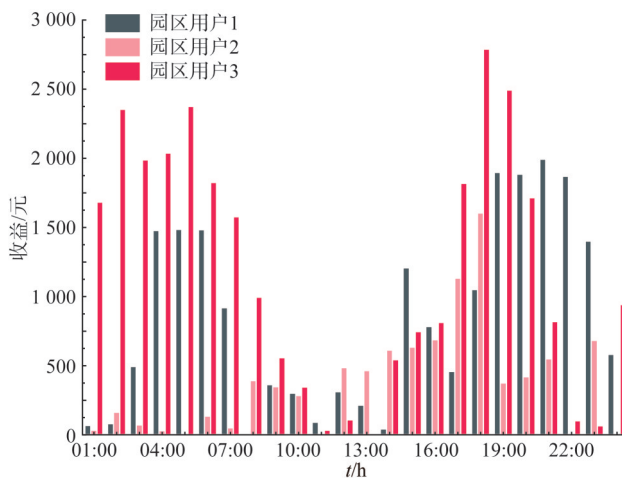


图9 场景Z2用户收益图

Fig. 9 Scenario Z2 user benefits picture

Z1、Z2场景下聚合商和用户总体收益情况如图10所示，聚合商和用户收益最高值均在15:00

表4 园区各用户收益

时间	用户1		用户2		用户3	
	Z1	Z2	Z1	Z2	Z1	Z2
1	12	69	6	33	291	1 684
2	31	80	63	163	915	2 354
3	48	495	7	72	192	1 989
4	108	1 478	2	29	149	2 038
5	124	1 486	0	5	199	2 376
6	197	1 485	18	137	242	1 826
7	264	920	15	52	452	1 578
8	0	0	167	392	424	996
9	137	363	131	348	210	559
10	132	300	125	285	152	346
11	19	91	0	0	7	33
12	91	312	142	487	32	109
13	125	215	269	464	0	0
14	15	43	211	613	187	543
15	186	1 207	98	634	116	748
16	159	784	140	688	165	813
17	59	458	146	1 134	235	1 819
18	290	1 050	444	1 606	771	2 790
19	161	1 899	32	377	211	2 494
20	208	1 886	47	421	190	1 716
21	523	1 994	144	550	215	820
22	1027	1 872	0	0	57	103
23	366	1 402	178	683	17	65
24	147	0	239	581	0	943

—22:00时间段，这是因为在这个时间段光伏、风电出力累计最高，响应意愿高，因此园区聚合商和用户收益最大。在Z2场景下，用户协同自治，收益明显高于场景1，这是因为园区内配额转让交易价格低，用户更愿意在园区内参与配额转让，并且通过点对点交易流程简化了交易流程，促进用户响应需求。聚合商在Z1场景下累计一天收益为69 570元，聚合商在Z2场景下累计一天收益为70 328元，高于Z1场景785元，聚合商收益能在保持高于原收益情况下，降低园区交易价格及用户互动成本，促进更多用户参与协同，用户响应意愿高。

5 结论

本文采用主从博弈框架系统，复现园区用户协同的响应量配额转让优化过程，通过分析电价变化

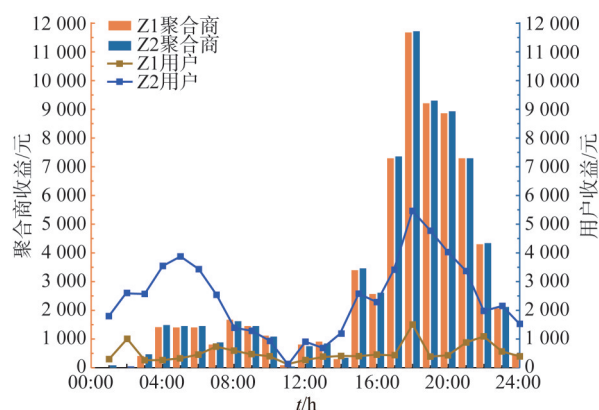


图10 场景Z1、Z2收益对比图

Fig. 10 Comparison of scenario Z1 and Z2 returns

趋势与用户协同行为指出用户自治行为对负荷尖峰时刻价格波动的影响是导致园区内部电价波动的主要原因,并且分析了用户参与配额转让对整个园区收益影响。本文提出了一种园区用户协同的响应量配额转让优化方法,将用户协同自治行为纳入主从博弈框架中动态优化园区内电价,从而使用户、聚合商做出最优决策,完成整个园区的内部响应量核算。

该方法利用了信息交互及时性,采用循环迭代模式进行价格激励与决策优化计算,并使用即时信息交互获取最终结果。仿真试验验证了用户协同的配额转让机制提升了清洁能源消纳,实现了经济性提升与环保性的双重突破。在探索更复杂的多主体协同优化策略方面可以继续开展深入研究以进一步完善需求侧互动行为建模及响应量核算方法。

参考文献

- [1] KIM H J, HWANG S J, KIM S Y. An IGDT-WDRCC based optimal bidding strategy of VPP aggregators in new energy market considering multiple uncertainties [J]. Energy, 2024 (313): 133712.1 - 133712.13.
- [2] 张晓会, 王丹彤. 基于《2025年能源工作指导意见》的思考 [J]. 电池, 2025, 55(3): 561 - 564.
ZHANG Xiaohui, WANG Dantong. Thoughts based on the guidance on energy work in 2025 [J]. Battery Bimonthly, 2025, 55(3): 561 - 564.
- [3] 王奖, 邓丰强, 张勇军, 等. 园区能源互联网的规划与运行研究综述 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 24 - 32, 55.
WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, et al. Review on planning and operation research of park energy internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 24 - 32, 55.
- [4] 董军, 方琳怡, 姚文璐, 等. 基于主从博弈的综合能源系统多能定价及调度优化 [J]. 浙江电力, 2024, 43(9): 19 - 28.
DONG Jun, FANG Linyi, YAO Wenlu, et al. Stackelberg

- game-based multi-energy pricing and dispatch optimization for inte-grated energy systems [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(9): 19 - 28.
- [5] 李东东, 尤杨, 周波. 基于信息间隙决策理论的售电公司参与多市场的优化决策 [J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4778 - 4788.
LI Dongdong, YOU Yang, ZHOU Bo. IGDT-based decision-making optimization of electricity retailers under multi-market [J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4778 - 4788.
- [6] LIANG Z, MU L. Multi-agent low-carbon optimal dispatch of regional integrated energy system based on mixed game theory [J]. Energy, 2024(295): 130953.1 - 130953.16.
- [7] 聂永辉, 李宗错. 基于纳什谈判和主从博弈的多园区综合能源系统优化调度 [J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 37 - 43, 104.
NIE Yonghui, LI Zongkai. Optimal scheduling of multi-park integrated energy system based on nash negotiation and master-slave game [J]. Smart Power, 2024, 52(5): 37 - 43, 104.
- [8] WAN H, GONG Y, WANG S, et al. Generic load regulation strategy for enhancing energy efficiency of chiller plants [J]. Building Simulation, 2024, 17(8): 1273 - 1287.
- [9] 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.
- [10] 刘晓君. 可再生能源接入下发电系统容量配置方法研究 [J]. 电气技术与经济, 2025, (1): 60 - 62, 65.
LIU Xiaojun. Research on capacity allocation methods for power generation systems under renewable energy integration [J]. Electrical Equipment and Economy, 2025, (1): 60 - 62, 65.
- [11] 刘昕, 谢丽蓉, 马兰, 等. 考虑风电最大效益的混合储能双层平抑控制模型 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 596 - 605.
LIU Xin, XIE Lirong, MA Lan, et al. Hybrid energy storage two-layer smoothing control model considering maximum benefit of wind power [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(12): 596 - 605.
- [12] 邱星宇, 吴毓峰, 王梓耀, 等. 计及并离网频率约束的微电网容量优化配置方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 166 - 177.
QIU Xingyu, WU Yufeng, WANG Ziyao, et al. Optimal configuration method of microgrid capacity considering grid connection and islanding frequency constraints [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 166 - 177.
- [13] LAI S, QIU J, TAO Y, et al. Pricing for electric vehicle charging stations based on the responsiveness of demand [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(1): 530 - 544.
- [14] AHMAD S, SHAFIULLAH M, AHMED C B, et al. A review of microgrid energy management and control strategies [J]. IEEE Access, 2023(11): 21729 - 21757.
- [15] ROSSI M, JIN L, MONFORTI F A, et al. Energy hub and micro-energy hub architecture in integrated local energy communities: enabling technologies and energy planning tools [J]. Energies, 2024, 17(19): 4813.1 - 4813.15.
- [16] 孙家正, 胡大伟, 孙丝萝, 等. 考虑需求侧响应的分布式储能资源管理及协同调控策略研究 [J]. 东北电力技术, 2022, 43(10): 28 - 31.
SUN Jiazheng, HU Dawei, SUN Siluo, et al. Research on distributed energy storage resource management and collabora-

- tive regulation strategy considering demand response [J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(10): 28 – 31.
- [17] 朱佳男, 艾芊, 李嘉媚. 基于分布鲁棒优化的广义共享储能容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(8): 185 – 194. ZHU Jianan, AI Qian, LI Jiamei. A generalized shared energy storage capacity allocation method based on distributed robust optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(8): 185 – 194.
- [18] CHEN Y, LI J, FANG Z, et al. Low-carbon optimal scheduling strategy for multi-agent integrated energy system of the park based on Stackelberg-Nash game [J]. IET Energy Systems Integration, 2024, 6(4): 622 – 637.
- [19] SUN H, SUN X, KOU L, et al. Optimal scheduling of park-level integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and flexible load [J]. Energy Reports, 2023 (9): 3417 – 3430.
- [20] LI K, RAN J, KIM M K, et al. Optimizing long-term park-level integrated energy system through multi-stage planning: a study incorporating the ladder-type carbon trading mechanism [J]. Results in Engineering, 2024(22): 102107.1 – 102107.16.
- [21] ZHANG X, ZHAO J, WANG D, et al. Research on incentive mechanism of carbon emission reduction in high energy-consuming park based on blockchain under virtual power plant [C]//Proceedings of the 2024 International Conference on Power Electronics and Artificial Intelligence, January 19 – 21, 2024, Xiamen, China. New York: Association for Computing Machinery, 2024: 29 – 34.
- [22] WU Q, CHENG W, ZHENG Z, et al. Research on the carbon credit exchange strategy for scrap vehicles based on evolutionary game theory [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(3): 2686.1 – 2686.18.
- [23] JIANG X, SUN L, WANG Y. Technology spillover and incremental cost effects of carbon transfers on optimal carbon quotas in supply chains [J]. Journal of Cleaner Production, 2023(419): 138171.1 – 138171.13.
- [24] 王瑞, 程杉, 汪业乔, 等. 基于多主体主从博弈的区域综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 12 – 21. WANG Rui, CHENG Shan, WANG Yeqiao, et al. Low-carbon and economic optimization of a regional integrated energy system based on a master-slave game with multiple stakeholders [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 12 – 21.
- [25] HU X, WANG H, CHEN H, et al. Research on Bayesian game strategy of multi-agent demand response in industrial parks based on incomplete information [C]//International Conference on Clean Energy and Electrical Systems (CEES2023), April 1 – 4, 2023, Tokyo, Japan. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 177 – 196.
- [26] 孙秋野, 姚葭, 王一帆. 从虚拟电厂到真实电量: 虚拟电厂研究综述与展望[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 583 – 601. SUN Qiuyue, YAO Jia, WANG Yifan. From virtual power plant to real electricity: summary and prospect of virtual power plant research [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 583 – 601.
- [27] 李若琼, 司宇杰, 杨承辰, 等. 考虑柔性负荷的新型电力系统源荷日前-日内低碳优化调度[J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 116 – 129. LI Ruoqiong, SI Yujie, YANG Chengchen, et al. Day-ahead and intra-day low-carbon optimal scheduling of new power system source-load considering flexible load [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(3): 116 – 129.
- [28] LESSER J A, SU X. Design of an economically efficient feed-in tariff structure for renewable energy development [J]. Energy Policy, 2008, 36(3): 981 – 990.
- [29] YUAN M, SORKNÆS P, LUND H, et al. The bidding strategies of large-scale battery storage in 100% renewable smart energy systems [J]. Applied Energy, 2022(326): 119960.1 – 119960.20.
- [30] 谢雄, 崔雪, 刘洋, 等. 基于斯塔伯格博弈的多利益主体需求响应策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 81 – 88. XIE Xiong, CUI Xue, LIU Yang, et al. Multi-agent demand response strategy based on the stackelberg competition [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 81 – 88.

收稿日期: 2025-03-19; 网络首发日期: 2025-07-30

作者简介:

李彬(1983), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电力通信、电力需求响应, direfish@163.com;

王枫桥(1999), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为能源互联网、电力通信技术, 1650962049@qq.com;

唐天悦(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为能源互联网、需求响应, tangtianyue1103@163.com。