

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230796

基于区块链技术的光伏产消者集群定价博弈

李军祥, 梁贤武, 屈德强, 王溪

(上海理工大学管理学院, 上海 200093)

摘要: 随着具有源荷二重属性的产消者占比日益提高, 如何建立适合产消者的有效交易机制, 激励其能源消纳是目前亟待解决的问题。针对该问题, 提出区块链技术下的产消者与运营商的集群交易模型, 将区块链技术量化到产消者的用电行为上。考虑到产消者集群内各主体独立, 电价制定和电量调度存在先后次序, 采取 Stackelberg 博弈理论寻求最优交互策略, 并通过区块链更新求解过程中的交互信息。仿真结果表明: 通过制定内部电价, 能够提升集群内的光伏自消纳水平, 同时在区块链技术下聚合优化集群内资源, 可以有效提高产消者的用电效益与运营商的收益。进一步, 结合光伏上网电价退坡政策, 再次验证了所提模型的有效性。

关键词: 产消者; 集群; 区块链技术; Stackelberg 博弈; 电价退坡政策

A pricing game for a photovoltaic prosumer cluster based on blockchain technology

LI Junxiang, LIANG Xianwu, QU Deqiang, WANG Xi

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: With the increasing proportion of prosumers possessing dual-source-load attributes, the establishment of an effective trading mechanism suitable for prosumers to incentivize energy consumption has become an urgent issue. To address this challenge, a cluster trading model based on blockchain technology for prosumers and operators is proposed, also the application of blockchain technology to prosumer electricity consumption behavior is quantified. Considering the independence of each entity within the cluster and the sequential nature of electricity price setting and quantity scheduling, Stackelberg game theory is employed to determine the optimal interaction strategy. Blockchain technology is used to update interaction information during this process. Simulation results demonstrate that establishing internal electricity pricing is able to enhance the photovoltaic self-consumption level within the cluster. Additionally, the aggregation and optimization of resources within the cluster can effectively improve the benefits of prosumers and operators by blockchain technology. Furthermore, in light of the PV on-grid tariff reduction policy, the effectiveness of the proposed model is validated.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 72701130, No. 71871144, and No. 12071112).

Key words: prosumers; cluster; blockchain technology; Stackelberg game; on-grid tariff reduction policy

0 引言

售电侧市场化改革是我国电力市场发展的重要方向之一。随着《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》及相关文件的发布, 电力市场将开启新一轮改革, 允许居民用户参与电力交易, 尤其是拥有分布式电源的用户^[1]。在 2016—2022 年期间, 我国有超过 120 万居民用户在屋顶安装了光伏发电设

备, 总装机容量达到300万kW。这引发了一类新型用户主体的出现, 即光伏产消者(PV prosumer)。产消者可以根据实际情况进行自发自用或参与电力市场交易, 以实现光伏电力的高效利用。然而, 由于光伏上网电价低于电网电价且享受补贴, 在光伏产业扩大规模和发电成本降低的背景下, 光伏上网电价退坡政策相继出台^[2]。因此随着产消者数量的增加和光伏补贴电价的变动, 以及光伏发电的波动性等不确定性因素, 参与电力市场的各方可能会根据个体利益做出不同的购售电决策, 这导致了电能交互共享消纳的难题。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(72701130, 71871144, 12071112); 上海理工大学大学生创新项目资助(XJ2023156)

目前,在电力市场中设立运营商进行协调控制可以对产消者能量共享问题进行优化,同时电力定价是激励产消者相互电能交互的重要机制之一。运营商可以根据需求响应(demand response, DR)机制制定合适的电价,引导产消者改变电量调度计划。同时,运营商先完成电价的制定,产消者后完成电量的调度计划,此过程符合主从先后顺序的动态博弈,可选取Stackelberg博弈来描述运营商与产消者之间的利益关系^[3-4]。文献[5]建立微网与产消者之间基于产消供需比率的定价模型,最大限度地利用了产消者之间的电量交互,减少了电网的能源交易量。文献[6]提出了运营商和产消者组成的模型,通过运营商设定内部电价来协调光伏能源的共享与自身利润最大化,实现了两者之间的收益共赢。文献[7]利用家庭电力管理中心来对多种电器进行分配管理,达到了多种电器的最优用电策略。文献[8]建立了运营商协调的日前和实时市场的博弈定价模型,通过日前和实时两个市场的衔接,促进了能源共享策略的实施。

然而,产消者与运营商在进行电力交易时需要签订电力交易合约,一般发生在产消者的实际用电之前,实际的交易电量可能会与合约中规定的不符,同时传统的交易模式对数据的传输、通信和处理能力要求高,存在信息泄露风险,难以保证产消者的隐私安全性,因此需要引入新技术来支撑产消者和运营商之间的电力交易。区块链技术在众多互联网信息技术中脱颖而出,该技术作为点对点^[9-11]、分布式数据存储^[12]、共识机制^[13]、主链副链^[14]等技术集于一体的新型应用模式,可以实现众多产消者参与到与电力市场的能源交易中^[12,15]。文献[14]利用区块链去中心化的特点将分散的微电网与大电网联合成一个整体,实现合作模式下的最优利润。文献[16]中能源代理商在区块链技术平台下进行能源交易,参与者的能量有效交互并减少了碳排放。文献[17]分析了区块链技术与能源交易模式的契合性,并构建了以产消者为研究对象的微电网点对点能源交易模型。现有研究大多将区块链技术应用与电力市场的交易中,利用区块链的特性来改进交易机制,缺乏区块链在电力市场中的具体实现形式,如市场参与者用电偏好需求的量化研究。

因此,本文在开放侧售电市场和光伏上网电价退坡的环境下,提出了区块链技术下的多个产消者和运营商构成集群的交易模型,构建基于区块链技术下的电力交易定价机制,量化区块链技术对于产消者在集群中用电偏好的影响,采用Stackelberg博弈求解出集群内的内部电价,以此来制定出产消者

的最优用电策略。最后,结合光伏上网电价退坡政策,通过数值仿真验证了所提模型的有效性。

1 区块链技术下的产消者集群模型框架

本文考虑的产消者集群是由多个光伏产消者、区块链技术下的运营商(operator under blockchain, OB)所构成。产消者既有电力负荷,需要用电,也拥有自己的发电系统,能够发电。上网电价 λ_s 是发电系统所产生的电能按照特定价格向电网进行售电的价格,电网电价 λ_b 是电网或能源管理机构设定的标准电价,终端用户向其购买电能,通常产消者在供过于求时,会上网电价将多余的电量售出,反之会以电网电价来购买不足的电量。但根据我国的光伏上网电价政策,上网电价要远低于电网电价,其目的在于鼓励光伏发电的就地自消纳提升能源利用率,避免“弃光”现象和电量传输的损耗。OB不具有任何发电能力,通过区块链在集群内与产消者建立一个电力交易平台,实现集群内产消者电能供需信息的共享。产消者在供需不平衡时段可通过OB在链上平台交易电能,实现链上产消者之间电量的实时交互。在集群内的总供需不平衡时,OB与大电网之间以上网电价和电网电价来交易电量平衡产消。从OB的角度来看,产消者与OB购售电的电量越多,OB利用上网电价和电网电价的差价获得的收益就越多。故OB可设定介于上网电价和电网电价之间的内部购电电价 p_b 和售电电价 p_s ,在集群内部电量供求不平衡时通过调整内部电价来引导产消者的用电行为,促进集群内的产消平衡,避免“弃光”现象,OB又可通过电价的调整来获得收益。同时产消者节点进出灵活性的特点正好符合区块链点对点网络接口特征,产消者作为独立的节点链入平台,OB可以实现众多产消者的有效管理。

本文假设所有产消者都是通过OB来进行电力交易,购电的产消者以购电电价 p_b 从OB获取电量,售电的产消者通过售电电价 p_s 来将多余的电量卖给OB。产消者作为其链上的一个节点接入,与OB签订进行电力交易的智能合约,双方的电力交易按照合约进行。当然,为激励产消者与OB进行电量交易,保证售电的产消者会以更高的价格出售电力,购电的产消者会以更低的价格购买电力,所以OB设定的内部电价应满足 p_s 不低于 λ_s 和 p_b 不大于 λ_b ,进而产消者从成本效益角度愿意与OB进行交易。

定义 $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 为集群中 n 的产消者集合,其中 $n = 1, 2, \dots, N$, N 为产消者总数; $\mathcal{I} = \{1, 2, \dots, I\}$ 为集群中 i 的用电时段集合,其中 $i = 1, 2, \dots, I$, I 为时段总数。时段 i 内产消者 n 的用

电量为 x_n^i , 发电量为 E_n^i ; 产消者可以与OB交易的净用电量 $\Delta = |E_n^i - x_n^i|$, 当 $E_n^i - x_n^i > 0$ 时产消者 n 可以进行售电, $E_n^i - x_n^i \leq 0$ 时产消者 n 可以进行购电, 故集合 \mathcal{N} 被分为售电者集合 \mathcal{S} 与购电者集合 \mathcal{B} , $S = |\mathcal{S}|$ 和 $B = |\mathcal{B}|$ 分别为售电者和购电者总数。

区块链技术下产消者集群电力市场示意图如图1所示。

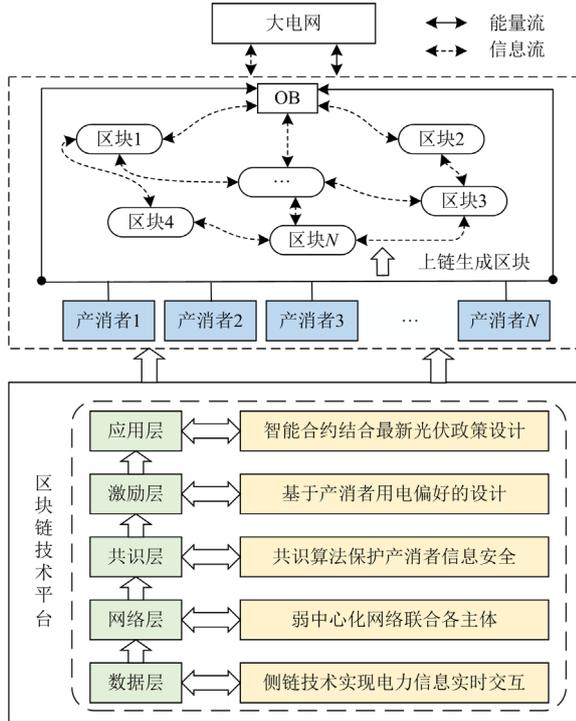


图1 区块链技术下产消者集群的电力市场

Fig. 1 Electricity market of prosumer cluster under blockchain technology

区块链结合集群交易的多种特点, 将多层技术应用在集群中, 具体分析如下。

1) 从数据层来看, 使用侧链技术可以将区块链分为两条^[18]: 一条主链作为分布式账本来记录产消者与运营商交易的电力信息, 区块链的不可篡改性让电量和电价信息真实可靠; 另一条侧链根据产消者的实际光伏发电和用电量在每隔一定的时隙生成一个区块, 可采用出块效率高的权益授权证明 (delegated proof of stake, DpoS)^[19]生成侧链的区块, 用于更新产消者每个时段的用电量和发电量。

2) 从网络层来看, 集群是一个弱中心化的网络, 网络接口端具有点对点的特点, 从而弱化了运营商对每个产消者的集中控制, 大幅降低了产消者与运营商之间的交互成本, 同时有效解决了与产消者之间电力交易时的联接性。

3) 从共识层来看, 在工作量证明 (proof of work, POW) 共识机制下, 区块链链上的系统防篡改性高, 需要攻克全链上51%的节点才能攻击区块链系统^[14], 其链上的数据很难被篡改, 产消者的信息数据安全性得到了进一步的保障。

4) 从激励层来看, 设计了基于产消者用电偏好的激励机制, 对产消者每个时段的用电效益进行区块链的量化, 调动产消者参与运营商交易的积极性。

5) 从应用层来看, 基于智能合约的交易结算依赖于的一套以数字形式定义的承诺, 在承诺中最新的光伏上网电价政策可以被嵌入其中^[20], 运营商可以根据合约在国家规定范围内执行电价的变动。

2 模型的建立与分析

2.1 产消者效益模型

根据效用理论, 产消者的用电效用可以分为两个阶段。在第一阶段, 随着用电量的增加, 产消者的效用也随之增加, 但是边际效用逐渐递减。一旦用电量达到一定水平, 就会进入第二阶段。在这个阶段中, 用电量足以满足所有的需求, 产消者的效用也达到了饱和状态, 此时用电量的增加不会再带来更多的效用, 即边际效用为零^[21]。不妨采用对数函数^[6,22]的形式来刻画产消者的用电效用, 整体的用电效益函数由用电效用和购售电收益两部分组成。产消者因角色的不同需要用售电者和购电者用电效益函数来表示, 如式(1)所示。

$$U_n^i = \begin{cases} k_n^i \ln(x_n^i + 1) + p_s(E_n^i - x_n^i), & n \in \mathcal{S} \\ k_n^i \ln(x_n^i + 1) + p_b(E_n^i - x_n^i), & n \in \mathcal{B} \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_n^i 为时段 i 产消者 n 的用电效益函数, 每个时段 i 内产消者 n 的用电量 x_n^i 不能超过用电量的上限 $x_{n,\max}^i$, 同时不低于用电量下限 $x_{n,\min}^i$, 即 $x_{n,\min}^i \leq x_n^i \leq x_{n,\max}^i$; k_n^i 为时段 i 内产消者 n 的用电偏好参数^[21,23]。假定在本文设定的内部电价的调整中不会改变产消者的参与角色, 易知产消者用电效益函数是关于用电量的连续可导函数。故在 p_s 、 p_b 给定和 $E_n^i - x_n^i \neq 0$ 的情况下对式(1)求导, 并令等式为0, 得到式(2)。

$$x_n^{i*} = \begin{cases} \frac{k_n^i}{p_s} - 1, & n \in \mathcal{S} \\ \frac{k_n^i}{p_b} - 1, & n \in \mathcal{B} \end{cases} \quad (2)$$

式中, x_n^{i*} 表示产消者的最优用电量。由式(2)可知, 产消者的最优用电量与用电偏好参数 k_n^i 有关。在区

区块链技术下，信息的公开透明以及实时交互，可以让集群的产消者更加准确地掌握实时内部电价及历史购售电等数据。故产消者在内部电价的激励下更愿意交易电量，对于售电者来说更愿意售出电量，导致用电偏好的下降，购电者更愿意购买电量，导致用电偏好的上升，又因本文两类产消者都是通过OB购售电量，所以产消者会更愿意和OB交易，即产消者和OB交易的偏好程度会增加。可见，产消者与OB交易的偏好程度和集群内电力信息的交互程度呈正向关系，同时在区块链技术下集群内产消者的上链率越高，信息的透明度以及交互程度就越高，故产消者与OB交易的偏好程度和集群内产消者的上链率是正向关系。借鉴文献[18, 24]对于用电偏好参数的研究，不妨将其关系刻画为式(3)。

$$k_n^i = \begin{cases} \frac{k_{n,0}^i}{Xq+1}, & n \in \mathcal{S} \\ k_{n,0}^i(Xq+1), & n \in \mathcal{B} \end{cases} \quad (3)$$

式中： X 为区块链技术对用电偏好参数的影响系数； $q \in [0,1]$ 为集群内产消者的上链率，取1时代表集群所有产消者节点全部上链，取0.5时代表50%的产消者上链实现信息交互，剩余50%产消者没有上链，未实现信息交互，取0时代表集群内产消者均未上链； $k_{n,0}^i$ 为未应用区块链时时段*i*内产消者*n*的用电偏好参数。

为了更直观地说明区块链与用电偏好参数之间的关系，在售电者以及购电者初始用电偏好程度不变的情况下，分别给出产消者上链率 $q = 0$ 、0.5 和 1 三种情况下两类产消者的用电效益函数图，见图2和图3。

由图2和图3可以看出：售电者的最优用电量相对减少，则会将更多的电量出售给OB；购电者的最优用电量相对增大，在自身发电量一定的情况下则会从OB购买更多的电量；故两类产消者和OB之间交易的电量就都会越来越多，区块链技术下产消者会越来越偏好与OB交易自身的电量。

2.2 OB的收益模型

OB作为产消者集群的主导者，首先在集群内的链上平台获取产消者的电力信息，得到对应时段内所有产消者的售电量 E_S^i 和购电量 E_B^i 。根据第1节定义的售电者集合 \mathcal{S} 和购电者集合 \mathcal{B} ，在时段*i*内所有产消者的售电量 E_S^i 和购电量 E_B^i 表示为

$$\begin{cases} E_S^i = \sum_{n \in \mathcal{S}} (E_n^i - x_n^i) \\ E_B^i = \sum_{n \in \mathcal{B}} (x_n^i - E_n^i) \end{cases} \quad (4)$$

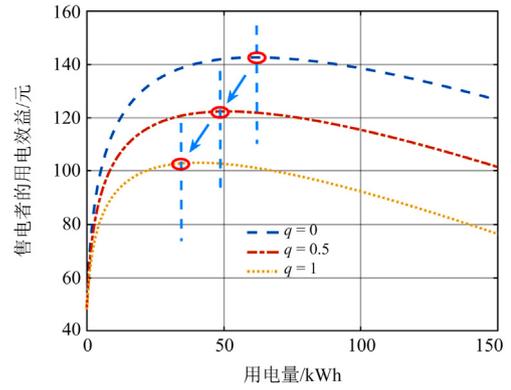


图2 不同上链率下售电者用电效益函数图
($E_n^i = 100; p_s = 0.48$)

Fig. 2 Electricity benefit function diagram of electricity sellers under different on-chain rate ($E_n^i = 100; p_s = 0.48$)

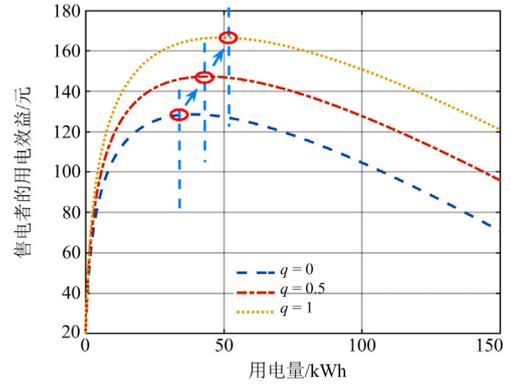


图3 不同上链率下购电者用电效益函数图
($E_n^i = 20; p_b = 1.0$)

Fig. 3 Electricity benefit function diagram of electricity buyers under different on-chain rate ($E_n^i = 20; p_b = 1.0$)

进而OB制定出集群的内部电价来引导产消者的用电行为，链上的所有购电者与售电者受到电价的激励进行电量的交易，使得光伏发电优先在集群内部得到消纳；当集群内总购售电量不平衡时，集群内部多余或不足的电量 $|E_S^i - E_B^i|$ 再以上网电价 λ_s 和电网电价 λ_b 与大电网交易。故在时段*i*内OB与产消者、大电网交易的收益函数可以表示为

$$R^i(p_b, p_s) = \begin{cases} p_b E_B^i - p_s E_S^i + \lambda_s (E_S^i - E_B^i), & E_S^i > E_B^i \\ p_b E_B^i - p_s E_S^i + \lambda_b (E_S^i - E_B^i), & E_S^i \leq E_B^i \end{cases} \quad (5)$$

OB 在每个时段先公布内部电价，产消者根据电价来调整用电策略，该过程符合主从递阶顺序关系，所以集群中的产消者和OB之间可建立Stackelberg博弈模型。

3 区块链技术下产消者集群的 Stackelberg 博弈及求解过程

3.1 Stackelberg 博弈模型的建立

Stackelberg 博弈是一种具有决策先后顺序、主从递阶的博弈。该博弈存在多个跟随者和领导者, 领导者根据自身的利益来做出决策, 跟随者对领导者的决策做出自己的策略。在本文中, OB 是制定内部电价的领导者, 产消者是根据电价做出需求响应的跟随者, 该博弈可表示为

$$L = \{\mathcal{N} \cup \{\text{OB}\}, X_n, P, \{U_n^i | n \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{I}\}, \{R^i | i \in \mathcal{I}\}\} \quad (6)$$

式中: $\mathcal{N} \cup \{\text{OB}\}$ 为博弈参与者集合, \mathcal{N} 中的产消者为博弈的跟随者, 其根据领导者OB制定的内部电价调整用电策略; $X_n = \{x_n^i | n \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{I}\}$ 为所有产消者的用电量 x_n^i 所组成的集合, 调整过程中满足 $x_{n,\min}^i \leq x_n^i \leq x_{n,\max}^i$; $P = \{p_s, p_b | p_s, p_b \in \mathcal{P}\}$ 为OB制定的内部电价策略集合, \mathcal{P} 为取值策略集, 调整过程中满足 $\lambda_s \leq p_s < p_b \leq \lambda_b$; $\{U_n^i | n \in \mathcal{N}, i \in \mathcal{I}\}$ 为产消者 n 的用电效益集合; $\{R^i | i \in \mathcal{I}\}$ 为OB的收益集合。

根据以上分析, 产消者 n 和OB的目标分别为 $\max \sum_{i \in \mathcal{I}} U_n^i$ 和 $\max \sum_{i \in \mathcal{I}} R^i$ 。为了达到该目标, OB会根据产消者的用电量来制定出合适的内部电价, 产消者也会根据内部电价来决策出最优用电量, 该问题的解就是博弈L的均衡点。

定义1 均衡解: 产消者和OB的博弈均衡点, 必须满足式(7)和式(8)。

$$U_n^i(x^*) \geq U_n^i(x_{-n}^*), \quad \forall n \in \mathcal{N}, \forall x^* \in X_n, \forall i \in \mathcal{I} \quad (7)$$

$$R^i(p_b^*, p_s^*) \geq R^i(p_b, p_s), \quad \forall p_b, p_s \in \mathcal{P}, \forall i \in \mathcal{I} \quad (8)$$

式中: x^* 表示所有产消者的最优用电量对应的集合, $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_{n-1}^*, x_n^*, x_{n+1}^*, \dots, x_N^*]$; $x_{-n}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_{n-1}^*, x_{n+1}^*, \dots, x_N^*]$; p_b^* 与 p_s^* 分别为最优的内部购、售电价。

3.2 博弈均衡解存在唯一性

根据式(1)和式(2), 用电效益函数在满足策略集 \mathcal{P} 中的任意的 p_b 、 p_s 和 $E_n^i - x_n^i \neq 0$ 的条件下, 产消者可以确定出唯一的最优用电量使得自身的用电效益达到最大。结合定义 1, 博弈L达到均衡解需要产消者与OB决策均达到最优解。所以, 只需求解出最优内部电价 p_b^* 和 p_s^* , 产消者的最优用电量 x_n^* 就是唯一确定的, 博弈L即达到均衡解。

定理 1 博弈L的均衡解是存在且唯一的。

证明: 在OB与产消者的集群中, OB首先制定出内部电价, 集群内的产消者做出需求响应, 调整自身的用电量。根据主从博弈的特点, 利用逆向递归法^[25]求解。同时每个时段的需求响应可以看成相互独立的, 所以整个博弈问题可以转化为只考虑某一时段的博弈问题, 不妨以式(2)中第 i 个时段为例, 将其代入式(4)中得到式(9)和式(10)。

$$E_B^i = \frac{\sum_{n \in \mathcal{B}} k_n^i}{p_b} - B - \sum_{n \in \mathcal{B}} E_n^i \quad (9)$$

$$E_S^i = \sum_{n \in \mathcal{S}} E_n^i + S - \frac{\sum_{n \in \mathcal{S}} k_n^i}{p_s} \quad (10)$$

再将式(9)和式(10)代入式(5)中, 得到OB第 i 个时段关于 p_b 和 p_s 的收益函数 $R^i(p_b, p_s)$, 在 $E_S^i > E_B^i$ 时, OB的最大化收益模型为

$$\begin{cases} \max R^i(p_b, p_s) = \sum_{n \in \mathcal{N}} k_n^i - p_b \left(B + \sum_{n \in \mathcal{B}} E_n^i \right) - p_s \left(S + \sum_{n \in \mathcal{S}} E_n^i \right) + \\ \lambda_s \left(\sum_{n \in \mathcal{N}} E_n^i + N - \frac{\sum_{n \in \mathcal{B}} k_n^i}{p_b} - \frac{\sum_{n \in \mathcal{S}} k_n^i}{p_s} \right) \\ \text{s.t.} \quad E_S^i > E_B^i \\ \lambda_s \leq p_s < p_b \leq \lambda_b \end{cases} \quad (11)$$

在 $E_S^i \leq E_B^i$ 时, OB的最大化收益模型为

$$\begin{cases} \max R^i(p_b, p_s) = \sum_{n \in \mathcal{N}} k_n^i - p_b \left(B + \sum_{n \in \mathcal{B}} E_n^i \right) - p_s \left(S + \sum_{n \in \mathcal{S}} E_n^i \right) + \\ \lambda_b \left(\sum_{n \in \mathcal{N}} E_n^i + N - \frac{\sum_{n \in \mathcal{B}} k_n^i}{p_b} - \frac{\sum_{n \in \mathcal{S}} k_n^i}{p_s} \right) \\ \text{s.t.} \quad E_S^i \leq E_B^i \\ \lambda_s \leq p_s < p_b \leq \lambda_b \end{cases} \quad (12)$$

同时, 从式(11)与式(12)中可以看出, 可以将 p_b 和 p_s 的取值策略集 \mathcal{P} 分为 \mathcal{P}_b 和 \mathcal{P}_s 两个部分, 满足如下条件:

$$\begin{cases} (p_b, p_s) \in \mathcal{P}_s, E_S^i > E_B^i \\ (p_b, p_s) \in \mathcal{P}_b, E_S^i \leq E_B^i \\ \mathcal{P}_s \cup \mathcal{P}_b = \mathcal{P}; \mathcal{P}_s \cap \mathcal{P}_b = \emptyset \end{cases} \quad (13)$$

在 p_b 和 p_s 的策略集内OB的收益 $R^i(p_b, p_s)$ 是关于 p_b 和 p_s 的连续可导函数, 进一步得到式(11)与式(12)中 $R^i(p_b, p_s)$ 关于 p_b 和 p_s 的Hessian矩阵为

$$\begin{bmatrix} \frac{2\lambda_s \sum_{n \in \mathcal{B}} k_n^i}{p_b^3} & 0 \\ 0 & -\frac{2\lambda_s \sum_{n \in \mathcal{S}} k_n^i}{p_s^3} \end{bmatrix}, E_S^i > E_B^i \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{2\lambda_b \sum_{n \in \mathcal{B}} k_n^i}{p_b^3} & 0 \\ 0 & -\frac{2\lambda_b \sum_{n \in \mathcal{S}} k_n^i}{p_s^3} \end{bmatrix}, E_S^i \leq E_B^i \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可知, 收益 $R^i(p_b, p_s)$ 关于 p_b 和 p_s 的 Hessian 矩阵均负定, 故 $R^i(p_b, p_s)$ 是严格的凹函数, 所以 OB 的最优内部电价在策略集 \mathcal{P}_b 与 \mathcal{P}_s 内是存在且唯一的, 分别为 $(p_{b_{\mathcal{R}}}^*, p_{s_{\mathcal{R}}}^*)$ 和 $(p_{b_{\mathcal{S}}}^*, p_{s_{\mathcal{S}}}^*)$, 结合式(13)可知 OB 在可行域 P 内的唯一最优内部电价为

$$(p_b^*, p_s^*) = \arg \max_{\lambda_s \leq p_s < p_b \leq \lambda_b} (R^i(p_{b_{\mathcal{R}}}^*, p_{s_{\mathcal{R}}}^*), R^i(p_{b_{\mathcal{S}}}^*, p_{s_{\mathcal{S}}}^*)) \quad (16)$$

所以, OB 存在唯一的最优内部电价, 故定理 1 得证。

3.3 区块链技术下博弈模型求解过程

该博弈模型可分为主从两阶段上下层模型求解, 上层模型为 OB 在任意时段 i 求解出的最优内部电价, 如式(17)所示。

$$\begin{cases} \max R^i(p_b, p_s) \\ \text{s.t. } \lambda_s \leq p_s < p_b \leq \lambda_b \end{cases} \quad (17)$$

下层模型为集合 \mathcal{N} 中所有产消者 n 在任意时段 i 求解出的最优用电量, 如式(18)所示。

$$\begin{cases} \max U_n^i \\ \text{s.t. } x_{n,\min}^i \leq x_n^i \leq x_{n,\max}^i \end{cases} \quad (18)$$

上层模型通过式(9)一式(16)求解得到最优内部电价, 下层模型通过式(2)和式(3)求得最优用电量, 在优化求解的过程中 OB 和产消者通过区块链技术平台来记录传输产消者的相关信息, 具体流程如图 4 所示。

1) 产消者作为区块链上的节点, 利用侧链技术对电力信息数据并行处理, 主链作为记录 OB 和产消者的电力交易信息。侧链根据产消者的实际发电和用电量生成一区块, 用于预测和更新当前时段的用电量 x_n^i 和发电量 E_n^i , 产消者根据其预测值来确定自己在交易过程中的角色。

2) 区块链的主链将产消者的发电量 E_n^i 、用电量

x_n^i 和用电偏好系数 k_n^i 以及角色信息上传给 OB。

3) OB 根据产消者的信息求解式(11)和式(12), 得到此时段的最优内部电价 (p_b^*, p_s^*) , 主链再将电价信息发送给产消者。

4) 各产消者根据 OB 的最优电价信息, 求解式(2)和式(3)得到最优用电量等信息并上传主链。

5) 判断是否达到博弈均衡点, 如果达到博弈均衡点, 那么主链输出得到该时段电价和用电量, 即下一时间段的优化定价完成, 否则重复2)~4)过程, 直到达到博弈的均衡点。

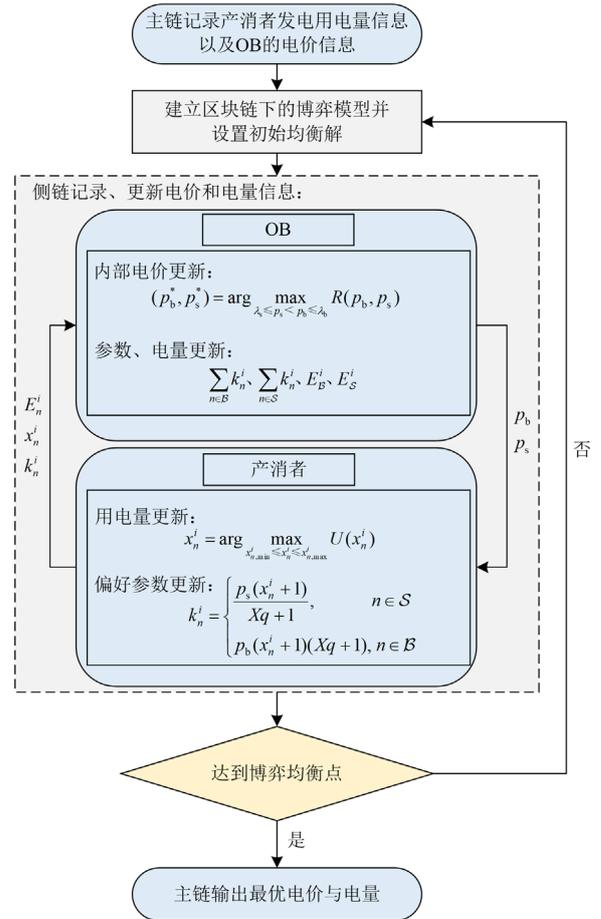


图 4 区块链技术下的集群博弈求解流程图

Fig. 4 Flow chart of solving cluster game under blockchain technology

4 数值仿真

本文选用 5 个光伏产消者和 1 个 OB, 利用 Matlab 2020a 中 fmincon 工具箱求解模型进行算例分析。考虑到新能源光伏发电的间歇性, 本文仅研究一天内产消者在有光伏出力的时间段, 取每天 6—18 h 的数据来对产消者的用电策略进行研究, 以浙江省 5 个商业建筑的的实际数据^[6]为例, 每个建筑代

表一光伏产消者, 具体发电量和净用电量分别如图 5 和图 6 所示; 上网电价 λ_s 由标杆电价 λ_a 和全电量补贴 λ_β 之和构成, 取 2020 年 3 类光伏发电的中间价区的 λ_a 和 λ_β [26], 其他参数参考文献[6, 27], 具体如表 1 所示。

表 1 模型参数设置

Table 1 Model parameter setting

项目	参数
基础参数	$N = 5, i \in \{6, 7, \dots, 18\}, q \in \{0, 0.5, 1\}, X = 0.2$
电价/(元/kWh)	$\lambda_a = 0.4, \lambda_\beta = 0.08, \lambda_s = 0.48, \lambda_b = 1.0$

结合图 5 和图 6 分析, 产消者 1 和产消者 2 的发电量在多个时段大于自身负荷, 需要将自身多余的电量出售; 产消者 4 的光伏输出量在多个时段远不及自身负荷, 需要购买不足的电量, 可知此产消者必然要与 OB 进行售出和购入电量, 故 OB 可以调整电价来获得收益。

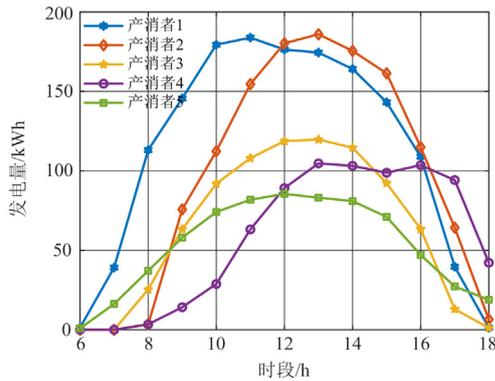


图 5 各时段产消者的发电量

Fig. 5 Power generation of prosumers at different periods

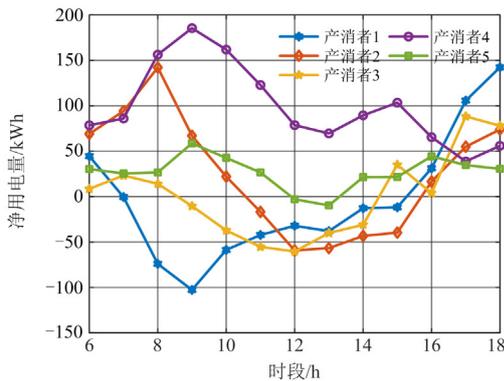


图 6 各时段产消者的净用电量

Fig. 6 Net electricity consumption of prosumers in different periods

4.1 内部电价及OB的收益分析

通过图 5 和图 6 中产消者基本数据求解式(16)

获得每个时段的博弈均衡解, 得到对应图 7 实时的内部购售电价。图中的 7—8 h、10—12 h、14—16 h 时段, 集群内产消者的总售电量小于总购电量, OB 提高内部售电电价来激励售电的产消者来售出更多的光伏电量; 其次, 12—14 h 时段集群内产消者内的总售电量大于总购电量, 故 OB 降低内部购电电价来激励购电的产消者来消耗更多额外的光伏电量。即 OB 通过调整集群的内部电价, 引导了集群内产消者的光伏发电量共享, 减少了“弃光”现象。

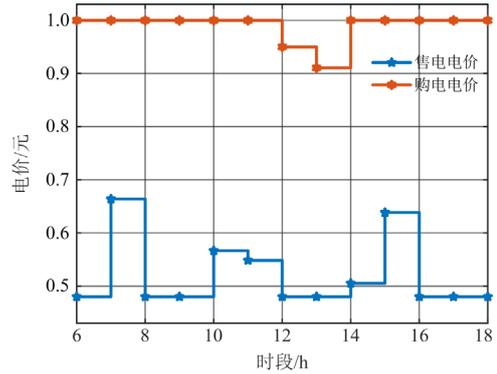


图 7 各时段 OB 制定的内部电价

Fig. 7 Internal electricity prices set by OB in different periods

OB 的收益如图 8 所示, 当产消者受到图 7 的内部电价激励后, 不同时段内的购电者与售电者均参与到集群内的电力交易中, 使得光伏发电充分消纳, 同时 OB 也利用了电价的调整有效提高了自身的收益。

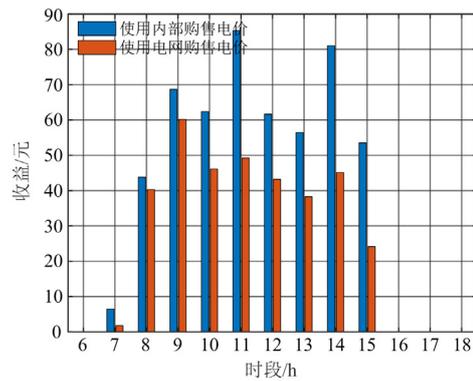


图 8 各时段 OB 的收益对比

Fig. 8 Comparison of OB's profit in different periods

4.2 产消者总用电量和效益以及 OB 收益对比

如图 9 所示, 在内部电价的激励下, 7—15 h 时段内产消者在集群内的光伏电量得到了共享, 光伏发电量达到充分消纳, 使得产消者总用电量降低, 减少了从电网进行交易的电量, 减轻大电网在用电高峰期的压力; 同时该时段内产消者的电能受到内

部电价激励进行交易，购电者与售电者之间的电能进行了交互，促进了集群内光伏资源的自消纳。

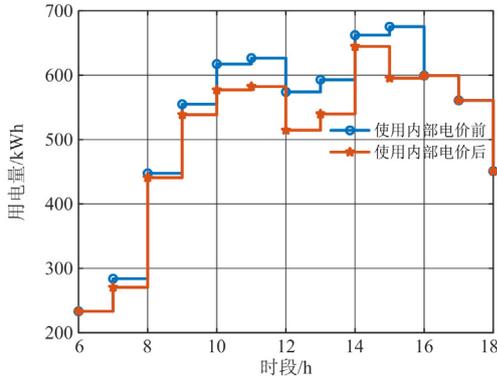


图 9 实行内部电价前后集群的总用电量对比

Fig. 9 Comparison of total electricity consumption of cluster before and after the implementation of internal electricity price

为了探究区块链技术在产消者集群中的作用，对比分析在各时段集群内产消者不同上链率下的总效益和 OB 的收益。

如图 10 所示，区块链技术下各产消者可以通过区块链将电力信息实时互通，产消者与 OB 之间交易的电量增加，总效益随着产消者上链比例的增大增幅显著。如 9~11 h、15~18 h 时段光伏出力和产消者用电量均达到最高，购电者向 OB 购电的电量增大，售电者向 OB 售电的电量增大，除个别时段外所有产消者在各时段的效益均显著提高。

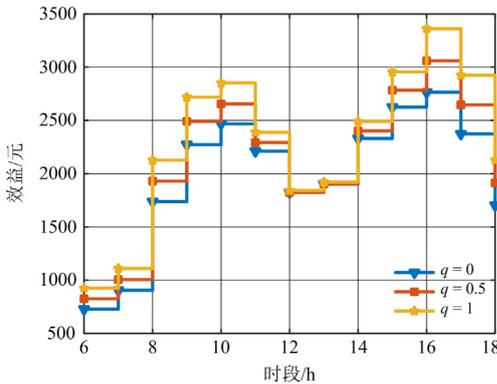


图 10 产消者不同上链率下的总效益

Fig. 10 Total benefit under different on-chain rate of prosumers

图 11 中，随着产消者上链比例的增大，OB 和产消者集群将电力交易信息实时互通，减少了 OB 和产消者之间的交互成本，一方面 OB 可以更加准确地掌握产消者的发用电情况，通过调整内部电价来获得收益；另一方面产消者在 OB 的内部电价激励下更愿意通过与 OB 进行电力交易，进一步促进了光伏发电的消纳。

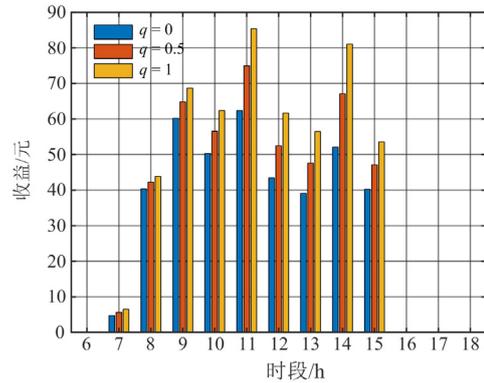


图 11 产消者不同上链率下 OB 的收益

Fig. 11 OB's profit under different on-chain rate of prosumers

4.3 上网电价补贴退坡下 OB 收益对比

根据上文提到的利用智能合约嵌入光伏上网电价退坡政策来分析其带来的经济性。由于上文中提到内部电价 p_s 不低于上网电价 λ_s ，故 λ_s 的变化必然会导致 OB 设定的 p_s 改变，则 OB 和产消者的收益也会随之发生改变。本文对于购电电价 λ_b 不变的情况下，根据上文选取的标杆电价 λ_a 和全电量补贴 λ_β [26]，按照每年 15% 的比例进行下调，同时全电量补贴按照 50% 的比例进行下调，具体数据如表 2 所示。

表 2 标杆电价、全电量补贴、上网电价退坡值

Table 2 Benchmark price, full electricity subsidy, feed-in price decline value

年份	标杆电价按 15% 比例下调	全电量补贴按 50% 比例下调	上网电价/ (元/kWh)
2021	0.34	0.04	0.38
2022	0.29	0.02	0.31
2023	0.25	0.01	0.26

如图 12 所示，将不同上网电价下的 OB 收益进行对比分析。可以看出，随着上网电价的降低，上

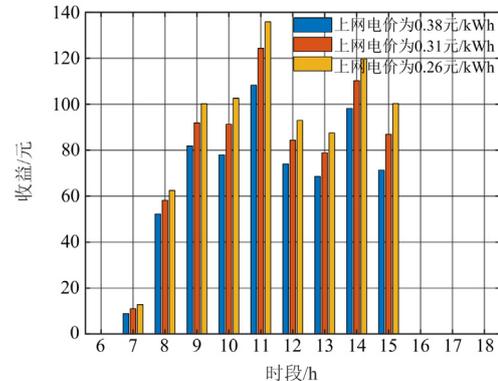


图 12 不同上网电价下 OB 的收益对比

Fig. 12 Profit comparison of OB under different feed-in tariffs

网电价与电网购电电价之间的差价就越大, 故 OB 可以调动的内部电价范围就越大。在 8~15 h 时段内集群的总发电量大于总用电量, OB 通过提升售电电价来激励售电者出售更多的电量, 从而来满足购电者的需求, 减少向电网购买电量, 提高集群内部的光伏自消纳率, 进而也提高了自身的收益。

5 结论

本文以多个产消者与OB组成的集群为研究对象, 建立了区块链技术下多个产消者与OB之间的博弈模型, 对比分析了内部电价、区块链技术的应用、不同上网电价下的OB的收益和产消者用电效益, 最后得出以下主要结论。

1) 在区块链技术下, OB和产消者之间交易信息的实时交互与公开透明, 提高了产消者与OB交易的偏好程度, 进而有效提升了产消者的用电效益和OB的收益。

2) 内部电价的设定让OB利用需求响应机制来改变实时时段的电价, 引导产消者的用电行为, 既提升了自身的收益, 又促进了光伏发电清洁资源的就地消纳; 同时在光伏上网电价退坡政策下设置内部电价既能使得集群内产消者与OB互利, 也响应国家光伏发电上网电价退坡的政策, 促进光伏发电由规模扩张向经济质量效益提升的转变。

在区块链的背景下, 随着众多产消者加入到电网市场中, 可将共享储能商加入到集群中研究, 提高用电的灵活性, 在此情景下进一步考虑储能部分对于集群优化电量和电价的影响。

参考文献

- [1] 李军祥, 王宇倩, 何建佳, 等. 基于区块链的微电网电力市场电价与电量动态博弈[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 11-19.
LI Junxiang, WANG Yuqian, HE Jianjia, et al. Blockchain-based dynamic game of electricity price and power for microgrid electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 11-19.
- [2] 国家发改委公布 2020 年光伏发电上网电价政策[J]. 氯碱工业, 2020, 56(4): 46.
The National Development and Reform Commission announced the on-grid price policy of photovoltaic power generation in 2020[J]. Chlor-alkali Industry, 2020, 56(4): 46.
- [3] 李娜, 王维, 杨家辉, 等. 基于需求侧博弈的区域综合能源服务商最优运营策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 112-120.
LI Na, WANG Wei, YANG Jiahui, et al. Optimal operation strategy of regional comprehensive energy service providers based on a demand-side game[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 112-120.
- [4] HUPEZ M, TOUBEAU J F, ATZENI I, et al. Pricing electricity in residential communities using game-theoretical billings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 14(2): 1621-1631.
- [5] BOIARKIN V, RAJARAJAN M, AL-ZAILI J, et al. A novel dynamic pricing model for a microgrid of prosumers with photovoltaic systems[J]. Applied Energy, 2023, 342: 121148.
- [6] LIU N, YU X H, WANG C, et al. Energy sharing management for microgrids with PV prosumers: a Stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(3): 1088-1098.
- [7] 代业明, 孙锡连, 李陆, 等. 基于多层博弈的智能电网住宅电力实时需求响应机制[J]. 运筹与管理, 2021, 30(10): 11-17.
DAI Yeming, SUN Xilian, LI Lu, et al. Residential electricity real-time demand response mechanism based on multi-level game in smart grid[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(10): 11-17.
- [8] CUI S C, WANG Y W, LIU N. Distributed game-based pricing strategy for energy sharing in microgrid with PV prosumers[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(3): 380-388.
- [9] 周玮, 高垚, 彭飞翔, 等. 基于模型预测控制的能源产消者端对端交易策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 1-9.
HOU Wei, GAO Yao, PENG Feixiang, et al. Peer-to-peer energy trading strategy for prosumers based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 1-9.
- [10] ALSKAIF T, CRESPO-VAZQUEZ J L, SEKULOSKI M, et al. Blockchain-based fully peer-to-peer energy trading strategies for residential energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(1): 231-241.
- [11] 邸剑, 臧齐齐, 王桂兰, 等. 基于区块链和梯度修正法的分布式经济调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 99-107.
DI Jian, ZANG Qiqi, WANG Guilian, et al. A distributed economic scheduling strategy based on blockchain and gradient correction method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 99-107.
- [12] WANG B B, XU L, WANG J L, et al. A privacy-preserving trading strategy for blockchain-based P2P electricity transactions[J]. Applied Energy, 2023, 335: 120664.

- [13] UL HASSAN M, REHMANI M H, CHEN J J. DEAL: differentially private auction for blockchain-based microgrids energy trading[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2020, 13(2): 263-275.
- [14] 周继儒, 李军祥, 何建佳, 等. 基于区块链的微网与大电网合作博弈研究[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(8): 2090-2100.
ZHOU Jiru, LI Junxiang, HE Jianjia, et al. Cooperative game between microgrid and bulk power grid on blockchain[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2021, 41(8): 2090-2100.
- [15] 孟仕雨, 孙伟卿, 韩冬, 等. 支持现货市场的分布式电力交易机制设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 151-158.
MENG Shiyu, SUN Weiqing, HAN Dong, et al. Design and implementation of decentralized power transaction mechanism to spot market[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 151-158.
- [16] EDUSSURIYA C, MARIKKAR U, WICKRAMASINGHE S, et al. Peer-to-peer energy trading through swarm intelligent Stackelberg game[J]. Energies, 2023, 16(5): 2434.
- [17] 李刚, 关雪, 杨会峰, 等. 基于智能合约的微电网 P2P 能源交易策略研究[J]. 智能系统学报, 2023, 18(4): 813-822.
LI Gang, GUAN Xue, YANG Huifeng, et al. Peer-to-peer energy trading strategy of microgrid based on smart contract[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2023, 18(4): 813-822.
- [18] 周步祥, 曹强, 臧天磊, 等. 基于区块链的微电网双层博弈电力交易优化决策[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 35-42.
ZHOU Buxiang, CAO Qiang, ZANG Tianlei, et al. Electricity trading optimization decision for microgrid based on blockchain and two-level game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 35-42.
- [19] 杨坤桥, 王煜翔, 郭兵, 等. 委托股权证明共识机制的改进研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(24): 107-114.
YANG Kunqiao, WANG Yuxiang, GUO Bing, et al. Improvement and research of delegated proof of stake consensus mechanism[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(24): 107-114.
- [20] 祁兵, 夏琰, 李彬, 等. 基于区块链激励机制的光伏交易机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 132-139, 153.
QI Bing, XIA Yan, LI Bin, et al. Photovoltaic trading mechanism design based on blockchain-based incentive mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 132-139, 153.
- [21] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHOBBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C]// 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 4-6, 2010, Gaithersburg, MD, USA: 415-420.
- [22] 高岩. 基于需求侧管理实时电价优化方法综述[J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(2): 103-111, 121.
GAO Yan. A review on real-time electricity price optimization methods based on demand side management[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2022, 44(2): 103-111, 121.
- [23] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, et al. Three-party energy management with distributed energy resources in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2487-2498.
- [24] ZHENG X Z, LI Q, BAI C, et al. Energy trading management based on Stackelberg game theory to increase independence of microgrids[J]. Energy Reports, 2022, 8: 771-779.
- [25] 朱·弗登博格, 让·梯若尔著. 博弈论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
- [26] 王欣, 谢文华. 户用光伏发电补贴退坡与平价上网的两阶段仿真研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(5): 76-80.
WANG Xin, XIE Wenhua. Two-stage simulation research on subsidy decline and grid parity for residential photovoltaic power generation[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(5): 76-80.
- [27] 王程, 刘念, 成敏杨, 等. 基于 Stackelberg 博弈的光伏用户群优化定价模型[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 146-153.
WANG Cheng, LIU Nian, CHENG Minyang, et al. Stackelberg game based optimal pricing model for photovoltaic prosumer cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 146-153.

收稿日期: 2023-06-26; 修回日期: 2023-10-05

作者简介:

李军祥(1971—), 男, 通信作者, 博士/后, 教授, 博导, 研究方向为系统科学、智能电网; E-mail: lijx@usst.edu.cn

梁贤武(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为能源博弈; E-mail: liangxianwu666@163.com

屈德强(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为智能电网定价。E-mail: deqiangqu@163.com

(编辑 周金梅)