

基于区块链的微电网双层博弈电力交易优化决策

周步祥, 曹强, 臧天磊, 张越, 彭昊宇

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:建立有效、合理的微电网电力市场交易机制以促进分布式清洁能源的就地消纳,是实现微电网运营经济环保、多方共赢的重要途径。为了更好地实现微电网电力市场的运行优化,提出了基于区块链和博弈理论的微电网电力交易模型。首先,对用电主体的效用函数进行改进,以量化区块链技术对其用电福利的影响;然后,基于演化博弈理论构建需求侧各主体选择交易对象的动态过程,基于斯坦伯格(Stackelberg)博弈理论构建供需两侧间的交互机制,建立基于区块链的微电网电力市场双层博弈模型,并采用迭代算法进行求解;最后,在区块链平台上进行仿真分析,结果表明所提方法能有效达到状态均衡,得到最优交易策略,提高了微电网的总福利,实现了微电网电力市场内多主体共赢与协调发展。

关键词:微电网;电力市场;双层博弈;状态均衡;分布式能源;区块链;Stackelberg 博弈理论

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202201018

0 引言

电力市场改革降低了分布式能源接入电网的门槛,提升了地方电网对风电、光伏、储能等的投资比例,使具有发用电能力的电能生产者逐渐增多^[1]。国家发改委、能源局两部门在2017年出台了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》^[2],鼓励分布式发电与用户之间直接进行交易,并提出了构建分布式发电市场化交易平台。微电网具有运行方式灵活、供电安全可靠、环境友好等优点,在微电网内开展电能交易有助于分布式能源的就地消纳^[3],避免电网波动问题。目前,微电网电力市场的集中优化方法与日益去中心化的电能供给不相适应,存在计算能力欠缺、各主体隐私安全无法得到保障等诸多问题,这会牺牲大部分生产者的经济利益,同时削弱交易主体参与电力市场的意愿。

区块链技术具有去中心化、防篡改、可信任、多方共治等优势^[4],能实现分布式市场主体接入和能源交易功能,基于其有望解决上述问题。目前,诸多研究分析了区块链技术应用于需求响应^[5]、碳排放权^[6]、虚拟电厂^[7]、综合能源服务^[8]等方面的适用性,验证了区块链技术与电力市场之间的契合度。文献[9]提出了基于区块链的分布式能源交易方案,包含交易流程、系统架构等;文献[10]提出了基于区块链技术的微电网电能交易方法,实现了电能匿名拍卖与点对点P2P(Peer to Peer)交易。已有研究将区块

链技术理念应用于分布式能源交易,但关于量化区块链技术对市场主体用电福利的影响的研究较少。

此外,微电网电力市场的参与主体通常具有不同的利益诉求,如何实现多主体利益的协调优化决策,相关领域的学者也进行了诸多研究。文献[11]建立了微电网电力市场内各主体的合作博弈模型,采用核仁法求得合约电价,得到了满足集体利益和个体利益最大化的分配方案;文献[12]提出了一种基于势博弈的微电网运行优化模型,并且验证了该模型存在状态均衡解,实现了微电网电力市场的运行优化;文献[13]构建了基于合作博弈的产消者P2P交易模型,有效地实现了电能定价和合作大联盟的利益分配。已有研究大多基于传统博弈论进行分析,这在一定程度上解决了多主体利益冲突的问题,但仍存在一些局限性,即均衡解是在所有参与主体都完全理性决策的前提下求得。然而,在实际情况下,参与主体可以不断动态地对策略进行选择和调整。

基于上述分析,本文通过改进用电主体的效用函数,以量化区块链技术对市场主体用电福利的影响;引入基于有限理性决策开展的演化博弈理论,采用动态过程研究需求侧各主体在博弈过程中调整行为的策略演化,提出一个内嵌电力需求侧演化博弈的供需两侧斯坦伯格(Stackelberg)博弈模型。首先,构建基于区块链的微电网P2P电力交易架构,设计区块链网络,构建区块链技术影响下用电主体的效用函数;然后,说明基于区块链的微电网电力市场双层博弈关系,构建电力需求侧的演化博弈模型和供需两侧的Stackelberg博弈模型,并对上述双层博弈模型进行迭代求解,给出求解流程;最后,通过数值仿真分析,验证所建模型及求解算法的可行性和有效性。

收稿日期:2021-07-10;修回日期:2021-11-23

在线出版日期:2021-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907097);四川省科技计划研究项目(2020JDRC0049)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51907097) and Sichuan Science and Technology Program(2020JDRC0049)

1 基于区块链的微电网电力市场

1.1 基于区块链的微电网 P2P 电力交易

基于区块链的微电网 P2P 电力交易架构如图 1 所示(图中 Tx 表示交易(Transaction)),其主要由微电网层和区块链层构成。电力交易的市场主体主要包括拥有分布式发电/用电设备的产消者、负责实时运行时偏差电量平衡的大电网以及区块链智能交易平台的运营商。在不同的交易时隙,产消者根据自身电力生产和需求量之间的关系在区块链智能交易平台上注册交易角色(买/卖方)参与电力市场。

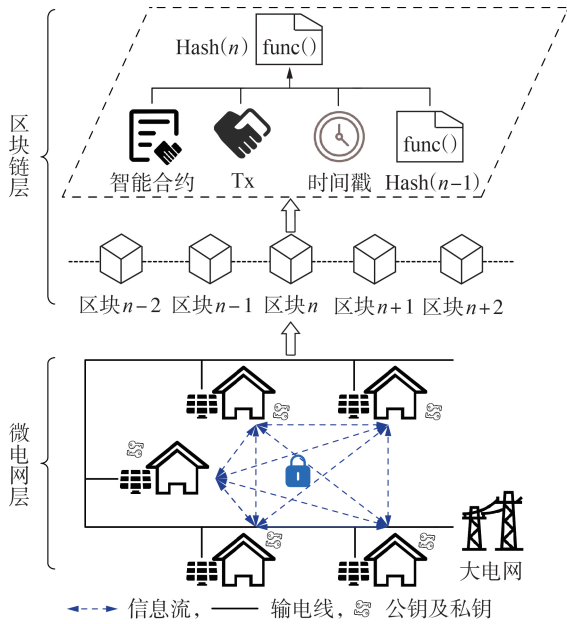


图1 基于区块链的微电网 P2P 电力交易架构

Fig.1 P2P electricity trading architecture of microgrid based on blockchain

传统的电网中心机构采用中心化方式进行数据存储与处理,在受到攻击时易发生单点故障^[14],且管理与运营成本较高。相较而言,在区块链网络中,数据存储在多个节点,这与微电网 P2P 电力交易的分布式架构相适应;采用共识机制与背书策略对数据进行实时同步及安全校验,实现了节点间数据的安全实时共享;各个区块通过哈希(Hash)函数链接成区块链,这种链式结构能避免数据被篡改^[15]。分布式主体作为独立节点链入基于区块链的微电网电力市场,通过多方共治和制衡的方式建立多方互信^[16],打破了市场主体间的数据壁垒,实现了供需双方的直接电力交易。

1.2 区块链网络设计

区块链网络是本文中微电网 P2P 电力交易架构设计的核心。与其他区块链开发框架相比,Hyperleger Farbric 采用共识机制和智能合约自动执行相分离的系统架构,链码、节点均运行在独立的 Docker

容器内,模块化的设计实现了共识服务、会员服务、链码服务等模块的即插即用^[17]。此外,相较于以太坊,Hyperleger Farbric 在交易效率、安全性等方面的表现更优异,更适用于区域能源交易^[18]。因此,本文选用 Hyperleger Farbric 开发区块链网络。

本文基于 Hyperleger Farbric 2.1.0 搭建区块链网络,采用多通道技术创建 3 个通道,参与 P2P 电力交易市场的产消者作为对等节点同时加入所有的通道,形成以交易区块链为主链,电量区块链、信息区块链为从链的一主二从区块链存储结构。在博弈过程中,将卖方电价、选择卖方概率更迭等信息存储至信息区块链;在博弈达到均衡状态后,确定资金支付及服务费等信息,进行交易结算,生成交易账单存储至交易区块链;产消者的智能电表对电量传输过程中变化的电量数据进行实时记录,在电量传输结束后调用智能电表内置的 Farbric-SDK,将产消者最终的充/放电电量数据存储至电量区块链。根据不同的需求,将数据存入对应的区块链,可在一定程度上避免数据量过大对网络性能造成的影响。

1.3 区块链技术影响下用电主体的效用函数

假设微电网内有 M 个产消者,每个产消者均安装了光伏发电装置。为了方便起见,将一天 24 h 分为等时长的 24 个时隙,将时隙集合记为 $K = \{1, 2, \dots, k, \dots, 24\}$ 。产消者 $m (m \in [1, M])$ 在时隙 k 的发电量为 $P_{pv,m}^k$,电力需求量为 X_m^k ,两者均为确定的常数。定义产消者 m 在时隙 k 的产消比 R_m^k 为:

$$R_m^k = P_{pv,m}^k / X_m^k \quad (1)$$

若 $R_m^k < 1$,则产消者 m 在时隙 k 注册为缺电产消者,即作为买方 $i (i \in \gamma, \gamma$ 为买方群体集合)参与电力市场;若 $R_m^k > 1$,则产消者 m 在时隙 k 注册为余电产消者,即作为卖方 $j (j \in \ell, \ell$ 为卖方群体集合)参与电力市场;若 $R_m^k = 1$,则产消者 m 自给自足,不参与时隙 k 的市场交易。

买方 $i (i \in \gamma)$ 在时隙 k 需购买的电量 $P_{in,i}^k$ 为:

$$P_{in,i}^k = X_i^k - P_{pv,i}^k \quad (2)$$

卖方 $j (j \in \ell)$ 在时隙 k 可售出的电量 $P_{out,j}^k$ 为:

$$P_{out,j}^k = P_{pv,j}^k - X_j^k \quad (3)$$

效用函数是微观经济学中的概念,可衡量用电主体消费一定电力所获得的满意程度。本文采用二次效用函数的形式^[19],产消者 m 在时隙 k 消耗光伏发电量的效用函数 $U_m^k(X_{m,pv}^k, \omega_{m,pv}^k)$ 可表示为:

$$U_m^k(X_{m,pv}^k, \omega_{m,pv}^k) = \begin{cases} \omega_{m,pv}^k X_{m,pv}^k - \frac{\alpha}{2} (X_{m,pv}^k)^2 & 0 \leq X_{m,pv}^k \leq \frac{\omega_{m,pv}^k}{\alpha} \\ \frac{(\omega_{m,pv}^k)^2}{2\alpha} & X_{m,pv}^k \geq \frac{\omega_{m,pv}^k}{\alpha} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $X_{m,pv}^k$ 为产消者 m 在时隙 k 消耗的光伏发电量;

$\omega_{m,pv}^k$ 为产消者 m 在时隙 k 对光伏发电的偏好程度; $\alpha > 0$ 为预先给定的参数,其值视产消者的具体情况而定^[19]。由式(4)可见,随着耗电量的增加,用电效用递增,边际效用递减,当耗电量达到一定的水平时,效用函数达到饱和值,边际效用为0,此时耗电量的增加不再带来更多的效用。

用电主体对电力的偏好程度是指主体选择不同类型电力的意愿偏好。由于不同电力在经济性、稳定性、环保性等方面存在差异,故用电主体在满足自身的用电需求时,在一定程度上会因为这些差异而产生不同的偏好。由于分布式能源电力在经济性及环保性方面优于大电网电力,故在一般情况下用电主体对分布式能源电力的偏好程度大于大电网电力。同时,在基于区块链的微电网电力市场中,微电网内产消者的上链比例越高,微电网信息的公开透明、可靠性和交互程度就越高,用电主体消耗分布式能源电力的意愿就越强烈,即用电主体对分布式能源电力的偏好程度越大。故产消者对光伏发电的偏好程度与微电网内产消者的上链比例呈正相关关系,这种关系可用一次函数表示,如式(5)所示。

$$\omega_{m,pv}^k = (1 + \eta\mu)\omega_{m,pv0}^k \quad (5)$$

式中: $\eta \in [0, 1]$ 为区块链技术对产消者偏好程度的影响系数; $\mu \in [0, 1]$ 为微电网内产消者的上链比例,即微电网内应用区块链技术的产消者数量与微电网内产消者总数量的比值; $\omega_{m,pv0}^k$ 为未应用区块链时产消者对光伏发电的初始偏好程度。大电网电力供给可靠且稳定,故其不受产消者上链比例的影响,产消者 m 在时隙 k 对大电网电力的偏好程度 $\omega_{m,grid}^k$ 保持不变。

为了能更加清晰地说明微电网内产消者上链比例和用电主体消耗分布式能源电力所获效用之间的关系,假设 $\omega_{m,pv0}^k = 2.5$ 、 $\alpha = 0.4$ 、 $\eta = 0.2$, 绘制 μ 的取值分别为 0、0.6、1.0 时产消者消耗光伏发电的效用函数,如图2所示。由图可见,当产消者消耗的光伏发电量相等时,产消者上链比例越高,其效用函数值就越高,并且区块链技术的应用提高了产消者消耗光伏发电量的上限,即提高了微电网内光伏电力的利用率。

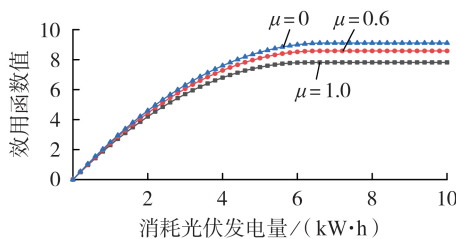


图2 不同 μ 取值下产消者的效用函数

Fig.2 Utility functions of proconsumers under different values of μ

2 基于区块链的微电网电力市场双层博弈模型构建与分析

本文考虑的基于区块链的微电网电力市场双层博弈参与者主要包括余电产消者群体(卖方群体)和缺电产消者群体(买方群体)两部分。在本文构建的微电网电力市场双层博弈模型中,微电网在进行电力交易实现电量及资金流动的同时,通过区块链智能交易平台实现信息的实时交互。基于区块链的微电网电力市场双层博弈交互关系如图3所示。图中, R 、 Q 分别为缺电产消者、余电产消者数量。

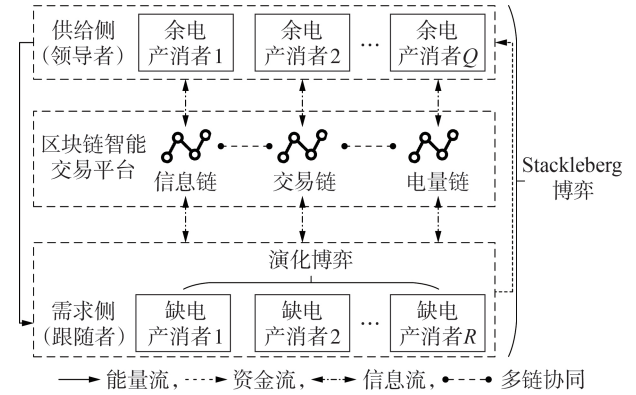


图3 基于区块链的微电网电力市场双层博弈交互关系

Fig.3 Interactive relationship of two-level game in microgrid electricity market based on blockchain

由图3可见,供需两侧之间的博弈是Stackelberg博弈,余电产消者群体和缺电产消者群体分别作为博弈的领导者和跟随者,通过区块链智能交易平台实现博弈中信息的实时交互。同时在电力需求侧嵌入了缺电产消者之间的演化博弈。在整个博弈过程中,通过区块链智能交易平台进行数据的实时传递,最终得到最优电力交易策略。

在本文的双层博弈过程中,涉及的所有信息及交易均通过区块链智能交易平台公开透明化。余电产消者之间不进行电力交易,当交易完成后,若余电产消者仍有部分余电,则需进行储能;若缺电产消者仍缺电,则可利用储能装置存储的电能供电。需要注意的是,产消者的储能装置存储的电能不参与P2P电力交易市场,仅供自身在参与市场时放电使用。

2.1 电力需求侧博弈模型构建与分析

若买方 i 在时隙 k 选择从卖方 j 购买需求电量,其福利函数 W_i^k 为:

$$W_i^k = U_i^k(X_{i,j}^k + P_{pv,i}^k, \omega_{i,pv}^k) - p_j^k X_{i,j}^k \quad (6)$$

式中: p_j^k 为卖方 j 在时隙 k 的售电电价; $X_{i,j}^k$ 为买方 i 在时隙 k 从卖方 j 购买的电量,以满足自身在时隙 k 的电力需求。

由式(6)可知,买方 i 在时隙 k 能从卖方 j 购买的最优电量 $X_{i,j}^{k*}$ (使买方 i 的用电效用函数达到最大)为:

$$X_{i,j}^{k*} = \operatorname{argmax}_{X_{i,j}^k} (W_i^k) \quad (7)$$

令任意买方在时隙 k 选择从卖方 j 购买需求电量的概率为 z_j^k ,且有 $\sum_{j=1}^Q z_j^k = 1$,则时隙 k 买方群体(缺电生产者群体)对卖方 j 的总电量需求 E_j^k 为:

$$E_j^k = z_j^k \sum_{i=1}^R X_{i,j}^{k*} \quad (8)$$

结合卖方 j 在时隙 k 可售出的电量 $P_{\text{out},j}^k$,得到卖方 j 在时隙 k 的供需比 τ_j^k 为:

$$\tau_j^k = P_{\text{out},j}^k / E_j^k \quad (9)$$

买方 i 在时隙 k 实际能从卖方 j 处购买的电量 $X_{i,j}^{k,\text{fact}}$ 为:

$$X_{i,j}^{k,\text{fact}} = \begin{cases} \tau_j^k z_j^k X_{i,j}^{k*} & \tau_j^k \leq 1 \\ z_j^k X_{i,j}^{k*} & \tau_j^k > 1 \end{cases} \quad (10)$$

当 $\tau_j^k \leq 1$ 时,表示卖方 j 供不应求,此时所有买方与卖方 j 实际成交的电量之和 $\sum_{i=1}^R X_{i,j}^{k,\text{fact}}$ 等于卖方 j 可售出的电量 $P_{\text{out},j}^k$;当 $\tau_j^k > 1$ 时,表示卖方 j 供过于求,此时卖方 j 可满足所有买方的电量需求。

定义 ξ_j^k 为卖方 j 在时隙 k 的净效用,是所有买方在时隙 k 从卖方 j 获得的全部效用,计算公式为:

$$\xi_j^k = \begin{cases} \left[\tau_j^k - \left(\tau_j^k / \sqrt{2} \right)^2 \right] \sum_{i=1}^R \alpha (X_{i,j}^{k*})^2 + C & \tau_j^k \leq 1 \\ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^R \alpha (X_{i,j}^{k*})^2 + C & \tau_j^k > 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$C = \omega_{i,\text{pv}}^k P_{\text{pv},i}^k - \frac{\alpha}{2} (P_{\text{pv},i}^k)^2$$

定义 $\bar{\xi}^k$ 为卖方群体在时隙 k 的平均净效用,其计算公式为:

$$\bar{\xi}^k = \sum_{j=1}^Q z_j^k \xi_j^k \quad (12)$$

为了消除“参与主体完全理性”假设和“纳什均衡解”概念等传统博弈论中存在的缺陷,基于参与主体有限理性的演化博弈论被提出^[20]。演化博弈中一个重要的解的概念为演化稳定策略 ESS (Evolutionary Stable Strategy),用于表征演化博弈的稳定状态。本文中买方群体参与演化博弈,将对具体卖方的选择作为策略集。采用基于微分方程的复制动态演化机制^[20]描述买方对卖方 j 选择的动态变化,数学表达式为:

$$\dot{z}_j^k = \frac{\partial z_j^k}{\partial k} = z_j^k (\xi_j^k - \bar{\xi}^k) \quad (13)$$

当博弈达到 ESS 时, $\dot{z}_j^k = 0$, 所有卖方的净效用与平均净效用相等,任意买方不会改变自身选择卖方 j 的概率,即:

$$\dot{z}_1^k = \dot{z}_2^k = \dots = \dot{z}_Q^k = 0 \quad (14)$$

此时演化博弈均衡策略为 $z^k = [z_1^k, z_2^k, \dots, z_Q^k]$ 。

本文使用离散复制接近复制动态,通过迭代算法更新买方群体选择卖方 j 的概率,迭代公式为:

$$z_j^k(u+1) = a z_j^k(u) (\xi_j^k(u) - \bar{\xi}^k(u)) + z_j^k(u) \quad (15)$$

式中: a 为步长调整系数; u 为迭代次数。当 $z_j^k(u+1) - z_j^k(u)$ 无限接近于0时,表明达到演化博弈均衡,迭代结束。

2.2 电力供需两侧博弈模型构建与分析

本文使用 Stackleberg 博弈理论构建电力供给侧和需求侧之间的交互机制。余电生产者群体(卖方群体)作为博弈的主体,缺电生产者群体(买方群体)作为博弈的从体。卖方 j 在时隙 k 通过售电所获福利 W_j^k 为:

$$W_j^k = \begin{cases} U_j^k(X_j^k, \omega_{j,\text{pv}}^k) + p_j^k P_{\text{out},j}^k & \tau_j^k \leq 1 \\ U_j^k(X_j^k, \omega_{j,\text{pv}}^k) + p_j^k E_j^k & \tau_j^k > 1 \end{cases} \quad (16)$$

$$p_{j,\text{min}}^k \leq p_j^k \leq p_{j,\text{max}}^k$$

式中: $p_{j,\text{min}}^k$ 为时隙 k 卖方 j 的最低售电电价,可取当地光伏上网电价; $p_{j,\text{max}}^k$ 为时隙 k 卖方 j 的最高售电电价,可取当地大电网电力电价。当 $\tau_j^k \leq 1$ 时,对福利函数 W_j^k 求2阶偏导可得 $\partial^2 W_j^k / \partial (p_j^k)^2 = 0$;当 $\tau_j^k > 1$ 时,对福利函数 W_j^k 求2阶偏导可得 $\partial^2 W_j^k / \partial (p_j^k)^2 = -2Qz_j^k/a < 0$ 。可见,卖方的福利函数是电价的凹函数,即在供给侧存在纳什均衡。

由于在博弈过程中,任意卖方 j 无法获得其他卖方的报价信息,故选用分布式迭代算法更新自身电价直至达到纳什均衡,迭代公式为:

$$p_j^k(u+1) = b(E_j^k(u) - P_{\text{out},j}^k) + p_j^k(u) \quad (17)$$

式中: b 为迭代速度参数,其取值视具体情况设定,若 b 取值过大,则会导致电价振荡幅度过大,需要自适应调整其为更小的值,以保证迭代的正常进行。当 $p_j^k(u+1) - p_j^k(u)$ 无限接近于0时,迭代结束,此时卖方 j 供需相等,电价趋于一个稳定值,达到纳什均衡。

为了避免电价在迭代时振荡幅度过大对算法收敛造成的消极影响,可采用步长控制法控制电价在迭代过程中的振荡幅度^[21],从而使算法能够更好地收敛,具体为:

$$\max \{ p_{j,\text{min}}^k, p_j^k(u) - \psi \} \leq p_j^k(u+1) \leq \min \{ p_{j,\text{max}}^k, p_j^k(u) + \psi \} \quad (18)$$

式中: $\psi = \delta |p_j^k(u)|$, $\delta \in [0, 1]$ 为爬坡速率,其具体取值根据迭代情况、基础电价等动态调整,以保证迭代效率和收敛精度^[22]。由于该方法限制了卖方电价的爬坡速率,且将卖方电价向量作为演化博弈的输入向量,故本文采用的步长控制法也能提高演化博弈中迭代算法的收敛性能。

3 基于区块链的微电网电力市场双层博弈模型求解

本文所提双层博弈模型的求解分为电力需求侧演化博弈的求解及供需两侧 Stackleberg 博弈的求解两部分。在时隙 k , 卖方群体在区块链智能交易平台输入第 1 次报价, 形成向量 $\mathbf{p}^k(1)$ 。买方群体将 $\mathbf{p}^k(1)$ 作为演化博弈的输入向量, 并随机初始化选择卖方的概率向量 $\mathbf{z}^k(1)$, 开始第 1 次迭代。卖方 j 基于各买方的光伏发电量、对光伏发电的偏好程度等信息, 根据式(7)计算得到与买方 i 的最优交易电量 $X_{i,j}^{k*}$, 然后基于 $\mathbf{z}^k(1)$ 根据式(8)计算得到买方群体对卖方 j 的总电量需求 E_j^k , 并结合自身在时隙 k 可售出的电量 $P_{out,j}^k$, 根据式(17)更新自身的售电电价 p_j^k , 之后进入下一次迭代。卖方 j 根据式(9)计算得到自身的供需比 τ_j^k , 然后根据式(11)计算得到自身的净效用 ξ_j^k , 区块链智能交易平台根据各卖方的净效用, 结合 $\mathbf{z}^k(1)$ 由式(12)计算得到卖方群体的平均净效用 $\bar{\xi}^k$, 结合各卖方的净效用 ξ_j^k , 根据式(15)更新买方群体选择卖方 j 的概率 z_j^k , 之后进入下一次迭代。循环迭代上述过程, 直至买方群体选择卖方的概率向量不再发生变化, 则表明达到演化博弈均衡, 卖方更新自身售电电价达到纳什均衡, 博弈结束, 输出均衡解向量。区块链智能交易平台根据式(10)计算最终各买方实际能从各卖方处购买的电量, 结合均衡电价, 确定所需支付的资金。具体求解流程图见附录 A 图 A1。

4 算例仿真分析

4.1 参数设置

以某一微电网为算例对本文所提基于区块链的 P2P 电力交易市场进行仿真分析, 该微电网包含 5 个安装了光伏发电装置和储能装置的产消者(产消者 1—5), 其在某日的光伏功率和用电负荷曲线分别见附录 A 图 A2 和图 A3。假设光伏发电时段为时隙 8—20, 即 P2P 电力交易市场开放时间为 08:00—20:00, 各时隙产消者根据自身的产消比选择以买方或卖方角色参与电力市场。卖方 j 的最低售电电价 $p_{j,min}^k$ (即当地光伏上网电价) 为 0.45 元 / (kW·h); 卖方 j 的最高售电电价 $p_{j,max}^k$ (即当地大电网电力电价) 按照峰谷分时电价计算, 具体取值参考文献[23]。仿真中涉及的其他参数参考文献[19]设定: $\omega_{m,grid}^k \in [1, 4]$, $\omega_{m,pv0}^k \in [1.5, 4.5]$, $\alpha = 0.4$, $\eta = 0.2$ 。

4.2 实验环境

选用 5 台配置为 Intel i7-9700 CPU、32 GB 内存、1 TB 固态硬盘、CentOS 7.4 操作系统的台式机为实验载体。利用 Docker 容器作为 Hyperledger Farbric 的运行环境, 启动 5 个 Docker 容器作为虚拟机运行基础环境, 其中 4 个运行 Peer 节点(产消者 1—4), 1

个运行排序节点(产消者 5), 采用 fabric-chaincode-java 编写智能合约, 相关智能合约的伪代码设计见附录 B。

4.3 算法有效性分析

选取时隙 $k=17$, 在微电网内产消者全上链 ($\mu=1$) 的情况下, 对所提算法的收敛性和有效性进行仿真分析。由附录 A 图 A2 和图 A3 可知, 当 $k=17$ 时, 产消者 1、2、5 的产消比均大于 1, 故其在区块链智能交易平台上分别注册作为卖方 1—3 参与电力市场; 产消者 3 和 4 的产消比均小于 1, 故在区块链智能交易平台上分别注册作为买方 1、2 参与电力市场。3 位卖方输入第 1 次报价 $\mathbf{p}^k(1)$, 交易平台随机初始化买方选择卖方的概率向量 $\mathbf{z}^k(1)$, 开始博弈过程。

演化博弈和 Stackleberg 博弈的收敛情况分别如图 4 和图 5 所示。由图 4 可知, 买方群体参与演化博

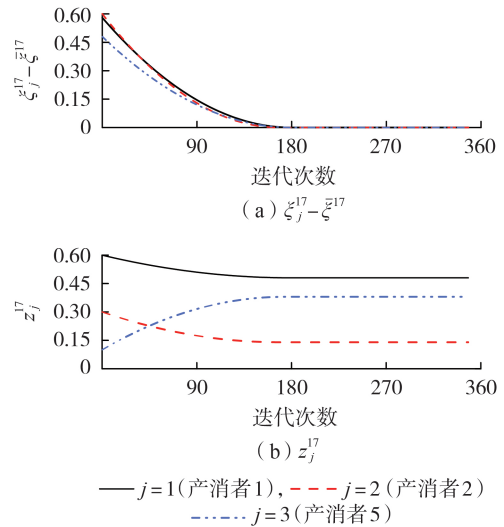


图4 $k=17$ 时演化博弈的收敛情况

Fig.4 Convergence of evolutionary game when $k=17$

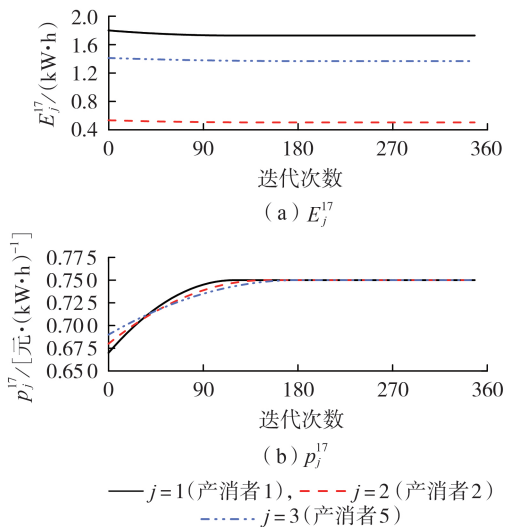


图5 $k=17$ 时 Stackleberg 博弈的收敛情况

Fig.5 Convergence of Stackleberg game when $k=17$

弈,基于迭代算法,随着卖方的净效用不断接近卖方群体的平均净效用,买方不断更新其选择卖方的概率 z_j^{17} 直至稳定值,最终达到ESS。由图5可知,买卖双方参与Stackleberg博弈,基于分布式迭代算法,随着各卖方的总电量需求 E_j^{17} 收敛至稳定值,卖方不断更新自身售电电价 p_j^{17} 直至达到纳什均衡。

综上可知,时隙 $k=17$ 下产消者群体博弈结束时,博弈达到了均衡状态。此时买卖双方之间的最优交易电量和实际交易电量如表1所示。由表可知,博弈结果满足了买方的用电需求。

表1 $k=17$ 时微电网的电量交易结果

Table 1 Electricity trading results of microgrid when $k=17$

卖方	最优交易电量/(kW·h)		实际交易电量/(kW·h)	
	买方1	买方2	买方1	买方2
1	1.600	2.000	0.768	0.960
2	1.600	2.000	0.224	0.280
3	1.600	2.000	0.608	0.760

4.4 博弈结果分析

在光伏发电的时隙8—20,求解P2P交易模型得到微电网内未应用区块链($\mu=0$)和产消者全上链($\mu=1$)时买方、卖方群体的总用电福利,将其分别与产消者直接与大电网交易(P2G)时买方、卖方群体的总用电福利进行对比分析,结果如图6所示。由图6(a)可知:在P2P交易模型下,由于P2P交易的均衡电价低于P2G交易的分时电价,故相较于P2G交易,P2P交易下买方群体的购电成本降低,从而提升了买方群体的总用电福利;且由于区块链技术的引入在一定程度上提高了产消费者对光伏发电的偏好程度,从而提高了其用电效用,故对于P2P交易模型,

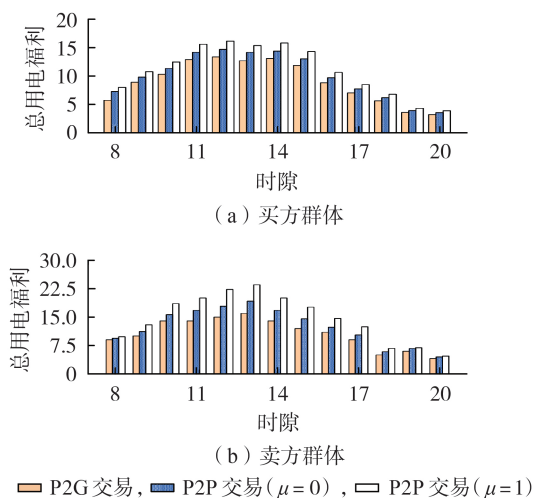


图6 P2G和P2P交易模型下买方、卖方群体的总用电福利对比

Fig.6 Comparison of total electricity welfare of buyer and seller groups between P2G trading model and P2P trading model

相较于未应用区块链的情形(即 $\mu=0$),产消者全上链情形(即 $\mu=1$)下的买方群体总用电福利增幅显著。由图6(b)可知:在P2P交易模型下,由于P2P交易的均衡电价高于P2G的上网电价,故相较于P2G交易,P2P交易下卖方群体的售电收入提高,从而提升了卖方群体的总用电福利;且对于P2P交易模型,相较于 $\mu=0$ 的情形, $\mu=1$ 时卖方群体的总用电福利得到显著提升,可见区块链技术的应用可以提高卖方群体的用电福利,对于追求利益的余电产消者而言,其愿意参与基于区块链的P2P电力交易市场。

P2G和P2P交易模型下微电网的总福利对比如图7所示。由图可知,在时隙8—20,产消者全上链情形下P2P交易模型的微电网总福利均高于未应用区块链情形下P2P交易模型的微电网总福利,且不管是否应用区块链,P2P交易模型的微电网总福利均高于P2G交易模型的微电网总福利。总体而言,在光伏发电时隙内,产消者全上链情形下P2P交易模型的微电网总福利相较于未应用区块链时提升了11.4%,相较于传统的P2G交易模型提升了30.1%。

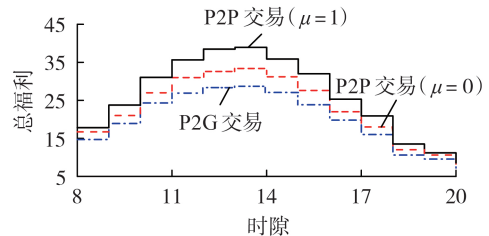


图7 P2G和P2P交易模型下微电网总福利对比

Fig.7 Comparison of microgrid's total welfare between P2G trading model and P2P trading model

综上可知,本文所提基于区块链的微电网电力市场双层博弈模型在实现P2P电力交易优化决策方面是有效、可行的。

5 结论

为了更好地实现微电网电力市场的运行优化,本文引入区块链技术以适应当前发电主体的分布式结构,设计了区块链支持下的微电网P2P电力交易架构。改进用电主体的效用函数,以量化区块链技术对用电福利的影响。提出内嵌电力需求侧演化博弈的供需两侧Stackleberg博弈模型,通过迭代算法求解状态均衡策略,得到最优交易电价与电量。

算例仿真与分析结果表明,基于区块链的微电网电力市场信息的公开透明及实时交互,能实现供需两侧的直接交易,同时提高用电主体对微电网分布式能源的偏好程度,进而提升用电主体的用电福利。本文所提迭代算法能够有效收敛,双层博弈模型可有效达到均衡。所提基于区块链的微电网电力市场双层博弈模型协调并提升了各市场主体的利

益,增加了微电网的总福利。后续将在现有研究的基础上,进一步考虑储能装置的影响,以及区块链在微电网电力市场中跨链交互、多链协同的形式等。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] PARAG Y, SOVACOOOL B K. Electricity market design for the prosumer era[J]. *Nature Energy*, 2016, 1(3):16032.
- [2] 国家能源局. 关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL]. [2021-07-10]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.
- [3] 邓明辉,唐郑烟,黄达,等. 基于区块链的微电网电力交易匹配机制[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(12):95-101.
DENG Minghui, TANG Zhengyan, HUANG Da, et al. Power transaction matching mechanism of microgrid based on block chain[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(12):95-101.
- [4] 马天男,彭丽霖,杜英,等. 区块链技术下局部多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(5):191-203.
MA Tiannan, PENG Lilin, DU Ying, et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(5):191-203.
- [5] 陈冠廷,张利,刘宁宁,等. 基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(8):9-17.
CHEN Guanting, ZHANG Li, LIU Ningning, et al. Blockchain-based transaction mechanism for residential users demand response[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(8):9-17.
- [6] 吉斌,昌力,陈振寰,等. 基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(12):1-10.
JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(12):1-10.
- [7] 任建文,张青青. 基于能源区块链的虚拟电厂两阶段鲁棒优化调度[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(8):23-33.
REN Jianwen, ZHANG Qingqing. Two-stage robust optimal scheduling of virtual power plant based on energy blockchain[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(8):23-33.
- [8] 杨锡运,陶准,黄欣欣,等. 基于异构能源区块链的综合能源系统交易模型[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9):224-231.
YANG Xiyun, TAO Zhun, HUANG Xinxin, et al. Transaction model of integrated energy system based on heterogeneous energy blockchain[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9):224-231.
- [9] 李彬,覃秋悦,祁兵,等. 基于区块链的分布式能源交易方案设计综述[J]. *电网技术*, 2019, 43(3):961-972.
LI Bin, QIN Qiuyue, QI Bing, et al. Design of distributed energy trading scheme based on blockchain[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(3):961-972.
- [10] 秦金磊,孙文强,朱有产,等. 微电网中基于区块链的电能交易方法[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(11):130-138.
QIN Jinlei, SUN Wenqiang, ZHU Youchan, et al. Energy transaction method of microgrid based on blockchain[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(11):130-138.
- [11] 施泉生,刘玮,闫豪楠,等. 微电网交易电价机制构建研究:基于合作博弈的分析[J]. *价格理论与实践*, 2018(7):111-114.
SHI Quansheng, LIU Wei, YAN Haonan, et al. Research on the construction of transaction price mechanism for microgrid-analysis based on cooperative game[J]. *Price:Theory & Practice*, 2018(7):111-114.
- [12] 周步祥,杨明通,史述青,等. 基于区块链的微电网市场势博弈模型[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7):15-22.
ZHOU Buxiang, YANG Mingtong, SHI Shuqing, et al. Blockchain based potential game model of microgrid market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7):15-22.
- [13] LI J, YE Y J, STRBAC G. Stabilizing peer-to-peer energy trading in prosumer coalition through computational efficient pricing[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189:106764.
- [14] 吴振铨,梁宇辉,康嘉文,等. 基于联盟区块链的智能电网数据安全存储与共享系统[J]. *计算机应用*, 2017, 37(10):2742-2747.
WU Zhenquan, LIANG Yuhui, KANG Jiawen, et al. Secure data storage and sharing system based on consortium blockchain in smart grid[J]. *Journal of Computer Applications*, 2017, 37(10):2742-2747.
- [15] 张宁,王毅,康重庆,等. 能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(15):4011-4023.
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(15):4011-4023.
- [16] 陈思捷,王浩然,严正,等. 区块链价值思辨:应用方向与边界[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(7):2123-2132, 2392.
CHEN Sijie, WANG Haoran, YAN Zheng, et al. Rethinking the value of blockchain: direction and boundary of blockchain applications[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(7):2123-2132, 2392.
- [17] 邵奇峰,张召,朱燕超,等. 企业级区块链技术综述[J]. *软件学报*, 2019, 30(9):2571-2592.
SHAO Qifeng, ZHANG Zhao, ZHU Yanchao, et al. Survey of enterprise blockchains[J]. *Journal of Software*, 2019, 30(9):2571-2592.
- [18] 王德文,柳智权. 基于智能合约的区域能源交易模型与实验测试[J]. *电网技术*, 2019, 43(6):2010-2019.
WANG Dewen, LIU Zhiqun. Regional energy transaction model and experimental test based on smart contract[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(6):2010-2019.
- [19] 原冠秀,高岩,王宏杰. 基于效用分类的智能电网实时电价算法[J]. *上海理工大学学报*, 2020, 42(1):29-35.
YUAN Guanxiu, GAO Yan, WANG Hongjie. A real-time pricing algorithm based on utility classification in a smart grid[J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2020, 42(1):29-35.
- [20] 王先甲,全吉,刘伟兵. 有限理性下的演化博弈与合作机制研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(增刊1):82-93.
WANG Xianjia, QUAN Ji, LIU Weibing. Study on evolutionary games and cooperation mechanism within the framework of bounded rationality[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2011, 31(Supplement 1):82-93.
- [21] DE PAOLA A, ANGELI D, STRBAC G. Price-based schemes for distributed coordination of flexible demand in the electricity market[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(6):3104-3116.
- [22] ZHOU Y, WU J Z, LONG C. Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework[J]. *Applied Energy*, 2018, 222:993-1022.
- [23] 刘念,赵璟,王杰,等. 基于合作博弈论的光伏微电网群交易模型[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(8):1903-1910.
LIU Nian, ZHAO Jing, WANG Jie, et al. A trading model of

PV microgrid cluster based on cooperative game theory[J].
Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8):
1903-1910.

作者简介:

周步祥(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为电力系统调度自动化以及计算机信息处理(E-mail:hiaway_scu@126.com);



周步祥

曹强(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为能源互联网和电力市场(E-mail:362708177@qq.com);

臧天磊(1986—),男,特聘副研究员,博士,通信作者,主要研究方向为综合能源系统运行优化与控制(E-mail:zangtianlei@126.com)。

(编辑 陆丹)

Electricity trading optimization decision for microgrid based on blockchain and two-level game

ZHOU Buxiang, CAO Qiang, ZANG Tianlei, ZHANG Yue, PENG Haoyu

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The establishment of effective and reasonable microgrid electricity market trading mechanism to promote the local consumption of distributed clean energy is an important way to realize the economic and environmental protection and win-win situation of microgrid operation. In order to optimize the operation of microgrid electricity market, an electricity trading model of microgrid based on blockchain and game theory is proposed. Firstly, the utility function of electricity users is improved to quantify the impact of blockchain technology on its electricity consumption welfare. Then, based on the evolutionary game theory, the dynamic process of each demand-side subject choosing the trading object is constructed, and the interaction mechanism between supply and demand is constructed based on Stackelberg game theory. The two-level game model of microgrid electricity market based on blockchain is established, and the iterative algorithm is used to solve the model. Finally, the simulation analysis on the blockchain platform shows that, the proposed method can effectively achieve state equilibrium, obtain the optimal trading strategy, improve the total welfare of the microgrid, and realize the win-win and coordinated development of multi-subjects in the microgrid electricity market.

Key words: microgrid; electricity market; two-level game; state equilibrium; distributed energy resources; blockchain; Stackelberg game theory

(上接第34页 continued from page 34)

Modeling and analysis of transmission and distribution price performance-based regulation based on system dynamics theory

CHEN Xinchun¹, PAN Xueping¹, MA Qian², LIANG Wei¹, CAO Yang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: The current researches about transmission and distribution price regulation modes are mostly based on static analysis method, which cannot adapt to complex timing sequence and causal relationship among investment-operation-revenue of power grid enterprise under electricity reform environment. Therefore, a modeling and analysis method of transmission and distribution price performance-based regulation is proposed based on system dynamics theory. On the basis of current transmission and distribution price cost control, the indexes of ecological construction investment, service quality and providing job number are introduced into the performance-based regulation index system for investment and operation of power grid enterprise, and a dynamic model of transmission and distribution price performance-based regulation is built. A provincial power grid enterprise is taken as an example, the investment and operation condition of the power grid enterprise during 10 years after the base period is simulated and analyzed, the analytic hierarchy process is adopted to determine the index weights, the comprehensive performance variation trend of investment and operation of the power grid enterprise is calculated. The results show that the power grid enterprise actively modifies the investment and operation strategy under performance-based regulation mode, meets the expectation of regulatory authority while ensures its good operation, which verifies the advantages of performance-based regulation mode.

Key words: performance-based regulation; transmission and distribution price reform; investment and operation; comprehensive performance; system dynamics

附录 A

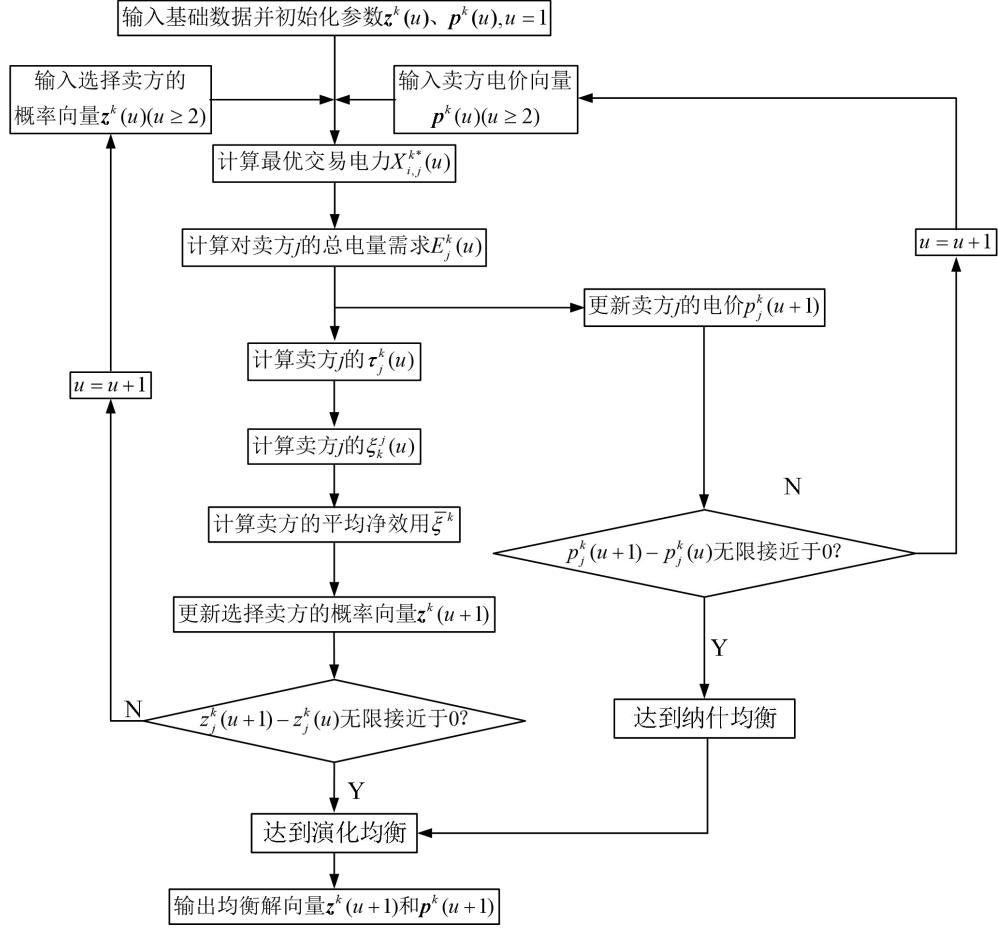


图 A1 基于区块链的微电网电力市场双层博弈模型求解流程图

Fig.A1 Flowchart of solving two-level game model of microgrid electricity market based on blockchain

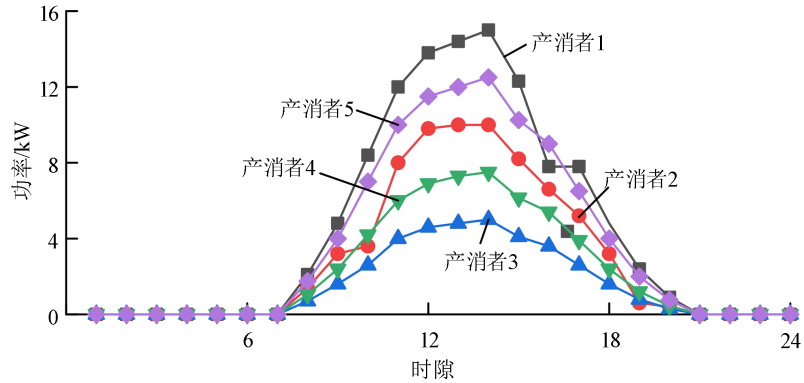


图 A2 产消者某日的光伏功率曲线

Fig.A2 Photovoltaic power curves of proconsumers at a certain day

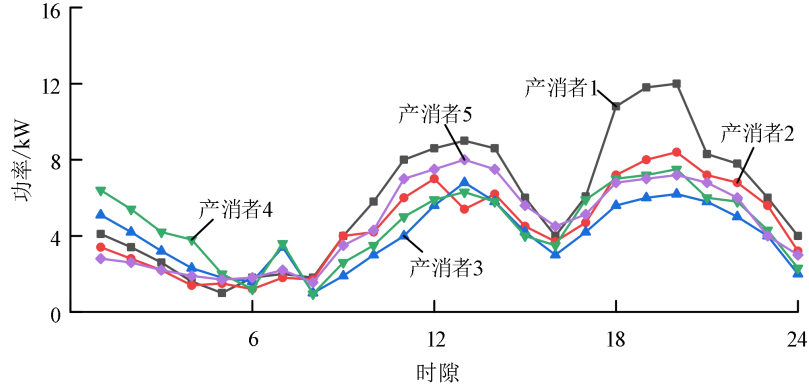


图 A3 产消者某日的用电负荷曲线
Fig.A3 Load curves of proconsumers at a certain day

附录 B

算法 1：电力需求侧演化博弈机制。

输入：卖方初始报价向量 $\mathbf{p}^k(1)$ 及随机初始化选择卖方概率向量 $\mathbf{z}^k(1)$ 。

输出：演化博弈的均衡策略 $\mathbf{z}^k$ 。

$u = 0$;

repeat $u = u + 1$;

for 每个卖家 $j \in \ell$ **do**

根据式(7)计算 $X_{i,j}^{k*}$;

根据式(8)计算买方群体对卖方 j 的总电量需求 $E_j^k(u)$;

根据式(9)计算卖方 j 的供需比 $\tau_j^k(u)$;

根据式(11)计算卖方 j 的净效用 $\xi_j^k(u)$;

end for

根据式(12)计算卖方群体平均净效用 $\bar{\xi}^k(u)$;

根据式(15)更新复制动态;

until $|\xi_j^k(u) - \bar{\xi}^k(u)|$ 接近于 0 (达到收敛条件)。

算法 2：电力供需两侧 Stackleberg 博弈机制。

输入：卖方初始报价向量 $\mathbf{p}^k(1)$ 及随机初始化选择卖方概率向量 $\mathbf{z}^k(1)$ 。

输出：纳什均衡状态，即均衡电价。

$u = 0$;

repeat $u = u + 1$;

for 每个卖家 $j \in \ell$ **do**

根据式(7)计算 $X_{i,j}^{k*}$;

根据式(8)计算买方群体总电量需求 $E_j^k(u)$ ，并将值传递给卖方 j ;

卖方 j 根据式(17)更新自身电价;

end for

until $|E_j^k(u) - P_{out,j}^k|$ 接近于 0 (达到收敛条件)。