

基于区块链的电网实时定价混合博弈研究

李军祥, 周继儒, 何建佳

(上海理工大学 管理学院, 上海市 杨浦区 200093)

Mixed Game of Real-time Pricing Based on Block Chain for Power Grid

LI Junxiang, ZHOU Jiru, HE Jianjia

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

ABSTRACT: As a decentralized database technology, block chain can effectively realize the distributed information communication and common maintenance of the power grid data. Based on the analysis of the mixed game architecture of power system on block chain, this paper improves the utility function of electricity consumption and constructs the master-slave game model of supply and demand which is embedded with cooperative game between power suppliers. Simulation results showed that the decentralized power suppliers can be integrated into a power supply cooperation alliance, which can effectively improve the utilization rate of renewable energy in a micro grid. At the same time, users also participate in the power grid decision-making as independent nodes. The openness and transparency of block chain trading platform information can improve the accuracy of users' electricity decision-making and welfare. The real-time pricing mixed game based on block chain can effectively balance the supply and demand of electricity, increase the welfare on both sides of supply and demand, and improve the utilization rate of renewable energy.

KEY WORDS: micro grid; renewable energy; block chain; mixed game; real-time pricing

摘要: 区块链作为一种去中心化的数据库技术可有效实现电网数据的分布式信息交互和共同维护。在对基于区块链的电力系统的混合博弈架构进行分析的基础上, 改进了用户用电的效用函数, 构建了内嵌供电商合作博弈的供需双方主从博弈模型。仿真结果表明, 区块链去中心化的特点可将分散的

供电商整合为一个供电合作联盟, 有效地提高了微网可再生能源的利用率。同时, 用户也作为独立节点参与到电网决策中, 区块链交易平台信息的公开透明可提高用户用电决策的精准性和用电福利。基于区块链的电网实时定价混合博弈可有效实现电力的供需平衡, 增加供需两侧的福利, 提高可再生能源的利用率。

关键词: 微网; 可再生能源; 区块链; 混合博弈; 实时定价

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.2578

0 引言

近年来, 多种新兴信息技术的发展及电力市场对新能源的广泛应用不断推动着我国电力市场的变革。智能电网的出现为电网开拓了更加广阔的发展空间, 给电网的智能化实施提供了更多的可能性, 是当前的重点发展方向^[1-2]。由于可再生能源种类繁多且地理分布分散^[3-4], 故数据无法实现有效地管理和信息交互。而区块链技术作为一种去中心化的分布式信息交互数据库技术可以很好地解决这一问题, 有效地推进智能电网的建设。

Nakamoto 在 2008 年首次提出了区块链的概念, 它以一种去中心化和去信任的方式实现了数据的分布式信息交互和集体维护, 具有去中心化、开放性、安全性、匿名性等特点^[5]。目前, 区块链技术已经应用在金融、医疗、供应链等领域, 但在能源领域的应用还处于尝试阶段。文献[6]提出了基于区块链的弱中心化电力交易及阻塞管理的方法, 改进了现有文献中的分布式安全校核的算法; 文献[7]提出了去中心化的配电网多边交易模型, 设计了可实现偏差电量多边交易的智能合约, 消除了部分偏差电量成本; 文献[8]探讨了区块链技术与能源互联网在物理-信息-价值三维视角的耦合性, 提出了以区块链技术为支撑的能源区块链的协同自治模式; 文献[9]通过分析微电网中各主体的需求, 基于区块链技术采用改进蚁群算法对多微电网市场竞争博

基金项目: 国家自然科学基金项目(71572113, 71871144); 国家自然科学基金匹配项目(1P16303003, 2020KJFZ034, 2019KJFZ048, 2018KJFZ035); 上海理工大学大学生创新训练计划项目(XJ2020135, XJ2020144, XJ2020148, XJ2020177)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (71572113, 71871144); the Matching Project of National Natural Science Foundation of China (1P16303003, 2020KJFZ034, 2019KJFZ048, 2018KJFZ035); Student Innovation Training Program of University of Shanghai for Science and Technology (XJ2020135, XJ2020144, XJ2020148, XJ2020177).

弈模型进行了算例仿真分析；文献[10]设计了一种结合动态电价机制的需求侧管理负荷转移机制，提出了负荷转移中混合博弈模型并用参与概率的算法对其求解；文献[11]通过分析高渗透率下风火网的博弈关系建立了包含网源间主从博弈和风火电源合作博弈的混合博弈模型，并提出了考虑经济和环境双因素的收益分配方法。现有的文献大都着眼于研究区块链技术在分布式电力交易中的应用机制及智能合约的改进应用，其缺点是：一方面，缺乏区块链应用在电网中具体实现形式的研究，另一方面，对于电力需求侧参与电网决策的研究较少。

本文在现有研究的基础上，考虑基于区块链的电力供需侧共同参与下的电网博弈。在对基于区块链的电力系统的混合博弈架构进行分析的基础上，改进了用户效用函数，将区块链技术的影响量化在用户及供电商的福利函数中，构建了内嵌供电商合作博弈的供需双方主从博弈模型。通过基于区块链交易平台的电网实时定价提高对微网可再生能源的利用率，实现电力的供需平衡。

1 基于区块链的电力系统混合博弈架构分析

现将针对应用区块链技术下的电网实现实时定价策略时，基于区块链的电力系统混合博弈架构进行分析说明。

在目前的电力系统中，由于微网供电商分布在不同地理位置，不具备结构化拓扑性，同时每个节点进出网络具有随机性，对于微网供电商的管理往往都需要一个中心化的机构或系统，在增加一定的管理成本的同时，还会因信息的滞后性造成电力资源的浪费及可再生能源利用率的降低。微网地理位置分散及节点进出随机的特点恰好符合区块链的P2P (peer to peer)网络接口^[12]，区块链技术去中心化的特点可以将分散的微网供电商与国家大电网整合为一个供电联盟。为了提高可再生能源的利用率，在遵循微网电力就近消纳的基础上，可在原有的供电区域内将微网电力作为首要供给，但由于微网存在一定的不稳定性及发电能力的限制，在推广微网电力使用的同时，国家大电网可作为微网电力不足时的补充供给，从而进一步优化区域内微网电力的实时消纳。通过区块链交易平台实现微网与国家大电网的联合运营，国家大电网可以将更多的发电空间转移给微网并提供辅助服务以实现联盟效益最大化。同时，不同供电商之间通过区块链交易平台进行信息交互，通过实时定价策略最大限度地提高可再生能源电力的利用率，而国家大电网作为

稳定的后补电力保证整个电力系统能满足用户的用电需求。由此可见，不同的微网供电商及国家大电网在基于区块链的电网市场中可以形成合作联盟，通过合作博弈决策出最优供电量，使得联盟的利润达到最大。

其次，区块链采用了共识算法^[13]，其去信任的特点可以在不需要第三方参与到电网交易的前提下保证交易数据的安全性及真实性，减少了交易的中间环节，节省了部分交易成本。同时，区块链除了私人信息不公开外，电网市场中所有的交易信息都存储在各节点上，极大地提高了交易信息的公开透明性，区块链上的各节点均可直接通过区块链交易平台得到与自身决策相关的信息，不再需要通过其他渠道收集信息，减少了部分决策成本，为供需双方创造了一个完全信息的博弈环境。这样，分散的用户也可作为独立的节点链入到基于区块链的电力系统中，在被动接收到供电商的电力报价后，作为从体做出自己的需求响应，并反馈给上层的供电商，供电商作为博弈主体进而做出内嵌的合作博弈决策，同时得到整个电力系统主从博弈的均衡解。

此外，可以利用侧链技术，将区块链分成两条：一条为记录电力交易信息的主链，作为分布式账本^[14]记录所有的电力交易，区块链技术的不可篡改性可以保障资金及电力流动数据的真实可靠性，可有效避免财务管理中的作假行为，优化电力系统的财务管理流程；另一条则为记录电力报价等信息的侧链，侧链可以根据实际需求每间隔一定的时隙生成一个区块用于更新当前的电价及可供电量。由于两条链所需的效果不同，可以通过采用不同的共识机制满足各自的需求。主链用于记录电力交易信息，对于信息记录的准确性要求较高。PoW (proof of work)^[15]共识机制下的区块链破坏系统花费的成本巨大，需要攻克全网超过 51% 的节点才可以攻击系统，其链上的数据很难被篡改，因此，可采用 PoW 共识机制生成主链数据区块，准确记录电力交易信息。侧链用于实现电力信息的更新交互，对时效性要求较高，可采用出块效率高的 DPoS (delegated proof of stake)^[16]共识机制生成侧链数据区块，及时更新电力信息。

这样，在区块链技术支撑下去中心化电力交易平台既可以实现电力信息的透明公开和实时交互，又可以保障数据记录的准确性，给电力系统提供公开透明且数据可靠的博弈环境。从供电商的角度来说，在遵循微网电力就近消纳的基础上，可在原有的供电区域内将微网电力作为首要供给，

供电商通过实时定价进一步引导用户优先消纳微网电力。从用户的角度来说,电力信息的公开透明及实时交互可以让用户更加准确地掌握微网电力的供电信息(如实时电价、当前可供电量、历史供电数据等),增加用户对微网的信赖程度,提高用户对微网电力的偏好程度,从而优先消纳微网电力,进一步优化区域内微网电力的实时消纳。

综上,本文考虑的基于区块链的电网系统博弈的参与者主要包括两部分:电力供给侧为微网和国家大电网通过区块链技术构成的供电联盟;需求侧为分布在各分布点的电力用户。本文建立的电力市场混合博弈模型中,整个电力系统在进行电力交易实现电力及资金流动的同时通过区块链交易平台实现各节点的信息交互,其中,主链实现对信息准确性要求较高电力交易信息的交互及记录,侧链实现当前交易电价及可供电量信息的更新,两者通过预言机(Oracle)连接。基于区块链的电力系统交互关系如图1所示。

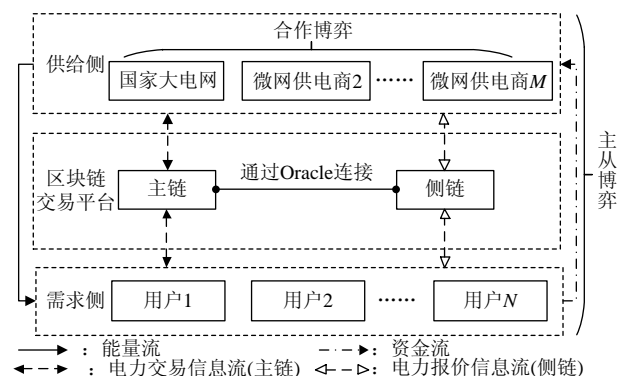


图1 基于区块链的电力系统交互关系

Fig. 1 Interaction diagram of power system based on block chain

在图1中,基于区块链的电力系统的供需双方之间的博弈是主从关系,供电商和用户作为博弈的主从体通过区块链交易平台实现博弈中的信息交互。在电力供给侧又嵌套了不同供电商通过区块链构建的供电联盟,实现供电商之间的合作博弈。在博弈过程中,通过区块链交易平台进行数据的实时传递,进而实现实时定价的均衡供电策略。

2 基于区块链的混合博弈模型构建与分析

现假设:在本文的电力系统博弈过程中,涉及的所有信息及交易均通过区块链交易平台公开透明化,且博弈中所有的市场参与者均是完全理性的。各节点通过区块链的信息交互实时更新各微网供电商当前可供的电量,用户根据供电商提供的可购买电量及电力报价更加精准地进行选择消费电力,电力交易只存在供给侧和需求侧之间,电力

供应商之间不进行电力交易。虽然区块链交易平台可实现信息的实时交互,但可再生能源发电具有不稳定性,微网仍可能出现少量电力过剩的情况,因此,当微网供电商有部分余电时需要进行储电。同时,为了促进电力市场对可再生能源的利用,将非清洁能源发电的环境成本考虑到供给侧的成本构成中。相应地,使用清洁能源发电减少的碳排放量可作为供给侧增加的环境收益。

假设供给侧共有 M 个供电商,用电力 m ($m \in [1, M]$ 且 m 为整数)表明用户使用的电的来源。 $m=1$ 表明电力来自国家大电网; $m \in [2, M]$ 表明电力来自微网供电商 m 。电力需求侧共有 N 个用户,即用户 $n \in [1, N]$, 且 n 为整数。将用户的一个用电周期划分为 K 个用电时隙,即时隙 $k \in [1, K]$ 。 $x_{n,m}^k$ 表示用户 n 在时隙 k 中电力 m 的用电量,则用户在时隙 k 消费的总电力为 $\sum_{m=1}^M x_{n,m}^k$ 。由于可再生能源的发电能力有限,每个微网在时隙 k 都有自己的可供电量,即有 $\sum_{n=1}^N x_{n,m}^k \in [0, Q_m^k]$, $m \in [2, M]$, 其中, Q_m^k 为电力 m 在时隙 k 的实际发电量。用 p_m^k 表示在时隙 k 中电力 m 的电价,则用户 n 在时隙 k 的购电总成本为 $\sum_{m=1}^M p_m^k x_{n,m}^k$ 。在实时定价中,供电商通过调节电价来实现供需平衡,因此电价 p_m^k 取决于基础电价和供需平衡关系。根据满意度函数^[17],构造实时电价

$$p_m^k = p_{m_0}^k + \beta \left(\sum_{n=1}^N x_{n,m}^k - Q_m^k \right) \quad (1)$$

式中: $p_{m_0}^k$ 为电力 m 在时隙 k 的基准电价; $\beta > 0$ 为相关系数,作用于调节供需不平衡。

2.1 用户博弈模型构建与分析

对于电力需求侧,用户通过消费电力获得的效用会随用户、时隙及电力类型的不同而改变。基于微观经济学中的效用理论,可将用户消费电力的效用函数分为两个阶段:在第一阶段,用户的效用随着用电量的增加而增加且边际效用递减;当用户的用电量达到一定的水平时进入第二阶段,此时的用电量可满足用户所有的用电需求,用户的效用达到饱和,之后用电量的增加不再会带给用户更多的效用,即边际效用为零。这样,用户消费电力的效用函数可采用二次效用函数形式^[18]。用户 n 在时隙 k 的效用函数为

$$U(x_{n,m}^k, \omega_{n,m}^k) = \begin{cases} \sum_{m=1}^M [x_{n,m}^k \omega_{n,m}^k - \frac{\alpha}{2} (x_{n,m}^k)^2], 0 \leq x_{n,m}^k \leq \frac{\omega_{n,m}^k}{\alpha} \\ \sum_{m=1}^M \frac{(\omega_{n,m}^k)^2}{2\alpha}, x_{n,m}^k > \frac{\omega_{n,m}^k}{\alpha} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\alpha > 0$ 为给定的参数； $\omega_{n,m}^k$ 表示用户 n 在时隙 k 中选择使用电力 m 的偏好程度。 $\omega_{n,m}^k$ 越大，用户对该电力的偏好程度越大，使用电力 m 给用户带来的效用越大。

与效用理论中的消费者偏好相对应，用户对电力的偏好程度是指不同电力消费者对于选择使用不同种类电力的意愿偏好。虽然用户使用不同电力的最终结果都是满足用电需求，但由于不同电力的电价、稳定性、供电能力、环保程度等方面存在差异，用户在满足不同的用电需求时一定程度上会因以上原因对不同电力的偏好程度存在差异。其次，在基于区块链的电力系统中，信息的公开透明及实时交互可以让用户更加准确地掌握微网的供电信息(如实时电价、当前可供电量、历史供电数据等)，提高用户对微网的信赖程度，从而影响用户对不同电力的偏好程度。与此同时，可再生能源电力具有价格较低且绿色环保的优点，在这种情况下，用户对可再生能源发电的偏好程度会提高。由此可见，用户对可再生能源发电的偏好程度与信息互通程度呈正相关关系，又信息的互通程度随区块链应用程度的增加而增加，故用户的偏好程度和区块链的应用程度呈正相关关系。对于可再生能源而言，可采用一次函数表示用户的偏好程度和区块链的应用程度之间的关系，即

$$\omega_{n,m}^k = \lambda q \omega_{n,m_0}^k + \omega_{n,m_0}^k, \quad m \in [2, M] \quad (3)$$

式中： ω_{n,m_0}^k 为未应用区块链技术时用户对电力 m 的初始偏好程度； $q \in [0, 1]$ 为区块链的应用程度，是指电力系统的各节点(如各微网供电商、各用户)是否已上链，是否应用了区块链这一技术，上链的节点越多，区块链的应用程度越高。如，当电力系统所有节点都上链时，区块链的应用程度取 1；区块链应用程度取 0.5 可以理解为在整个电力系统涉及各个节点中有 50% 的节点已应用了区块链技术，而剩余的 50% 并未应用，那么他们的信息也就并未上链，这就会影响整个电力系统的信息公开及交互程度，从而影响用户的偏好及决策。 $\lambda \in [0, 1]$ 为区块链对用户偏好程度的影响系数。由于国家大电网的电力具有稳定性的特点，有一定的不可替代性，因此应用区块链时用户对其的偏好程度保持不

变，即 $m=1$ 时， $\lambda=0$ ， $\omega_{n,1}^k = \omega_{n,1_0}^k$ 。

为了更加清晰直观地说明区块链的应用程度与用户使用可再生能源电力的效用之间的关系，在用户初始使用能源电力偏好程度不变、 $\omega_{1,2_0}^k = 1.5$ 、 $\alpha = 0.3$ 的情况下，分别绘制了未应用区块链(即 $q=0$)、区块链应用程度 $q=0.5$ 及 $q=1$ 这 3 种情况下用户消费微网的光伏电力的效用函数，见图 2。

从图 2 中可以直观地看出：1) 在消费同等光伏电力时，用户的效用随区块链应用程度的增加而增加。2) 区块链的应用提高了用户光伏用电的饱和量，也就是说，在不同电力供电量都充足的情况下，提高了用户消费光伏电力的上限，减少了可再生能源的闲置率。

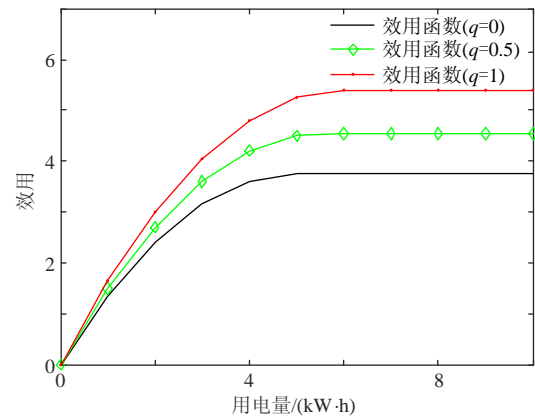


图 2 光伏用户在不同区块链应用程度下的效用函数
Fig. 2 Utility functions of photovoltaic users in different application degrees of block chain

综上，对于电力需求侧而言，用户通过博弈用更少的钱购买电力的同时能获得更多的效用，即实现用户福利 W 的最大化：

$$\begin{cases} \max_{x_{n,m}^k} W = \sum_{n=1}^N (U(x_{n,m}^k, \omega_{n,m}^k) - \sum_{m=1}^M p_m^k x_{n,m}^k) \\ \text{s.t. } \sum_{n=1}^N x_{n,m}^k \leq Q_m^k, m=1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\omega_{n,m}^k = \lambda q \omega_{n,m_0}^k + \omega_{n,m_0}^k$ ； $\lambda \in [0, 1]$ ； $q \in [0, 1]$ 。在用户偏好及区块链的应用程度给定的 N 个用户参与的博弈中，用户 n 的福利函数为 W_n 。当 $0 \leq x_{n,m}^k \leq \frac{\omega_{n,m}^k}{\alpha}$ 时，对其福利函数 W_n 求二阶偏导得 $\frac{\partial^2 W_n}{\partial (x_{n,m}^k)^2} = -\alpha - 2\beta < 0$ ；当 $x_{n,m}^k > \frac{\omega_{n,m}^k}{\alpha}$ 时，对其福利函数 W_n 求二阶偏导得 $\frac{\partial^2 W_n}{\partial (x_{n,m}^k)^2} = -2\beta < 0$ 。因此，用户福利函数是用电量的严格凹函数，即在需求侧存在纳什均衡。

2.2 供电商博弈模型构建与分析

对于电力供给侧,供电联盟的发电成本主要由国家大电网产生,微网供电商的发电成本较小可忽略不计。当微网电力多余时要进行储能从而产生储能成本,非清洁能源发电的碳排放量会产生相应的环境成本,此外,供电商在参与博弈时会产生一定的决策成本。因此,电力供给侧应尽可能的引导用户实时消纳微网电力减少储能成本,增加售电收益,达到电力系统的供需平衡。故电力供给侧的成本由发电成本 C_g 、储能成本 C_s 、决策成本 C_d 及环境成本 C_e 共 4 部分构成。由于不考虑供电商之间的电力交易,电力供给侧的售电收益只有供电商出售电力给用户所得的收益。为了提高可再生能源的利用率,在考虑环境惩罚成本的同时也相应地增加了环境奖励收益。故电力供给侧的收益由售电收益 E_g 及环境收益 E_e 两部分构成。因此,供给侧的利润 π 构成如下:

$$\pi = E_g + E_e - C_g - C_s - C_d - C_e \quad (5)$$

其中:

1) 售电收益 E_g 。

由于不考虑供电商之间的电力交易,电力供给侧的售电收益为各供电商出售给用户的电力收益,则售电收益为

$$E_g = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N p_m^k x_{n,m}^k \quad (6)$$

2) 环境收益 E_e 。

由于环境友好型的清洁能源发电代替了部分燃料发电,因此,变相地减少了电力系统的碳排放量,促进了电力供给侧的可持续发展,对环保产生了正面的促进作用,且碳排放量与其发电量是正相关的,则环境收益为

$$E_e = f \sum_{m=2}^M Q_m^k \quad (7)$$

式中 f 为单位发电量的环境成本系数且 $f > 0$ 。

3) 环境成本 C_e 。

与环境收益相对应,国家大电网通过化石燃料发电会产生一定的碳排放量,给环境带来负面影响且碳排放量与其发电量正相关,则环境成本为

$$C_e = fQ_1^k \quad (8)$$

4) 发电成本 C_g 。

假设国家大电网通过化石燃料发电的发电成本是其发电量的二次函数^[19],则发电成本为

$$C_g = a(Q_1^k)^2 + bQ_1^k + c \quad (9)$$

式中: Q_1^k 为国家大电网在时隙 k 的实际发电量;

$a > 0$ 、 $b \geq 0$ 、 $c \geq 0$ 均为常数。由于国家大电网的电力实时消耗,为达到供需平衡需有 $Q_1^k = \sum_{n=1}^N x_{n,1}^k$ 。

5) 储能成本 C_s 。

当微网的实际发电量大于用户实际用电量时,需要对多余电量进行存储。假设微网的储能成本是其储电量的一次函数,则储能成本为

$$C_s = d \sum_{m=2}^M (Q_m^k - \sum_{n=1}^N x_{n,m}^k) \quad (10)$$

式中: Q_m^k 为微网 m 在时隙 k 的实际发电量; $\sum_{n=1}^N x_{n,m}^k$

为微网 m 在时隙 k 的用户总用电量; d 为单位储能成本且 $d > 0$ 。由于区块链交易平台信息实时交互且公开透明,用户在购买微网电力时微网的剩余电量是已知的,用户不会购买超出余量的电力,故有

$$Q_m^k \geq \sum_{n=1}^N x_{n,m}^k, \quad m=2,3,\dots,M。$$

6) 决策成本 C_d 。

因区块链交易平台的信息公开透明等原因可以为供电商减少部分决策成本,因此决策成本与信息共享程度即区块链的应用程度有关。区块链的应用程度越高,信息的透明度越高,决策参与者的决策成本越低。则有决策成本:

$$C_d = (1-q)e \quad (11)$$

式中 e 为供电商参与决策时寻找其他决策参与方相关信息所需的成本且 $e > 0$ 。

综上,对于电力供给侧而言,供电商通过博弈满足用户电力需求的同时尽可能地获得更多的利润,即实现供给侧的利润最大化:

$$\begin{cases} \max_{Q_m^k} \pi = E_g + E_e - C_g - C_s - C_d - C_e \\ \text{s.t.} \sum_{n=1}^N x_{n,m}^k \leq Q_m^k \end{cases} \quad (12)$$

合作博弈注重利润的合理分配,可以应用 Shapley 值法来计算电网参与者的利润 π_m , $m \in [1, M]$ 。Shapley 值法是根据联盟中各成员的平均边际贡献值来分摊利润,即贡献越大,获得的利润越大。 π_m 的计算公式^[20]为

$$\pi_m = \sum_{s(m \in s_m)} \delta(|s|) [\pi(s) - \pi(s/m)], \quad m=1,2,\dots,M \quad (13)$$

式中: $\delta(|s|) = \frac{(M-|s|)! (|s|-1)!}{M!}$ 表示各供电商的加

权因子; s_m 表示联盟中包含供电商 m 的所有子集; $|s|$ 表示子集 s 中的供电商个数; $\pi(s)$ 表示集合 s 的收益; $\pi(s/m)$ 表示集合 s 除去电力供电商 m 后剩余供电商形成的联盟合作获得的利润。

3 混合博弈模型求解

本文建立的混合博弈模型分为电力供需两侧博弈和电力供给侧博弈两个部分求解。其中，在第一部分的供需两侧主从博弈中，将供电联盟作为博弈的主体，用户作为博弈的从体，双方利用区块链信息平台实现信息的交互，通过对其主从博弈模型的求解实现电力的供需均衡，在满足用户电力需求、实现用户效用最大化的同时提高对可再生能源的利用率、增加供电商的利润；在第二部分的供给侧合作博弈中，不同供电商通过区块链信息平台整合为一个具有合作关系的供电联盟，实现交易信息的共享及电力数据的分布式存储与管理，通过对其合作博弈模型的求解实现最优的供电策略。在两个阶段不同的博弈过程中，供需双方通过区块链交易平台向对方反馈自己的均衡解，同时将对方反馈的解作为已知信息进行自身博弈的求解，通过信息的交互策略最终达到整个系统混合博弈模型的均衡解，得到电力市场参与各方的最优策略，实现电力供需两端调节，保障电力系统的实时平衡。具体求解流程如图3所示。

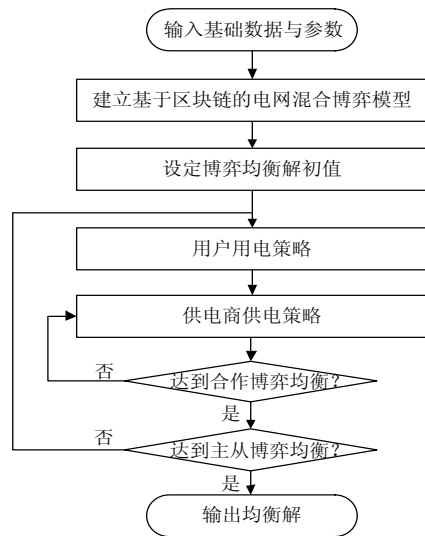


图3 基于区块链的电力系统混合博弈模型求解流程图
Fig. 3 Flow chart solving mixed game model of power system based on block chain

4 数值仿真分析

4.1 参数设置

本文采用 MATLAB 软件对上述模型进行数值仿真分析。为此，做出表1所示假设。
电力系统中，电力需求侧有 $N = 100$ 个用户，电力供给侧有 $M = 2$ 个供电商，即 $n \in [1, 100]$ 、 $m \in [1, 2]$ ，其中，当 $m = 1$ 时电力来自国家大电网，当 $m = 2$ 时电力来自微网光伏供电商。将用户的一

表 1 模型参数设置 Tab. 1 Model parameter settings	
项目	参数设置
电力需求侧	$\alpha_{n,1_0}^k \in [1, 4], \alpha_{n,2_0}^k \in [1.5, 4.5], \lambda = 0.2$
电力供给侧	$a = 0.01, b = 0, c = 0.0006, d = 0.02, e = 1, f = 0.0785$
基准电价	$p_{1_0}^k = 0.65, p_{2_0}^k = 0.35, \beta = 0.015$

个用电周期划分为 $K = 24$ 个时隙，即时隙 $k \in [1, 24]$ 。本文涉及的其他参数参考文献[21-23]预先设置，具体设置如表1。

4.2 结果分析

首先，通过对模型求解得到了应用区块链 ($q = 1$) 和未应用区块链 ($q = 0$) 两种情况下用户侧的总用电量如图4所示，用户侧的微网光伏用电与大电网用电情况如图5所示。从仿真结果可以看出，在应用区块链和未应用区块链两种情况下用户侧的总用电量总体相差不多，但两者在不同电力占比上有所区别。相较于未应用区块链的电力系统，基于区块链的电力系统提高了对微网光伏电力的用电，减少了对大电网化石燃料电力的用电。具体地说，基于区块链时用户的大电网用电量在各个时隙都有一定程度地减少，尤其是在微网光伏发电的时隙 ($k \in [6, 19]$) 减幅较为显著。同时，在微网光伏发电的时隙中，增加了较多的光伏用电。由此可见，基于区块链的电力系统在有效解决信息的实时交互下，用户对不同供电商的电力供给能力有了更清晰地了解，可以更好地建立起用户与供电商之间的信任机制，通过实时定价调整不同电力的供需平衡，让光伏用电替代了部分大电网用电，促进了用户对光伏电力的实时消纳，让微网光伏电力的利用实现最大化。

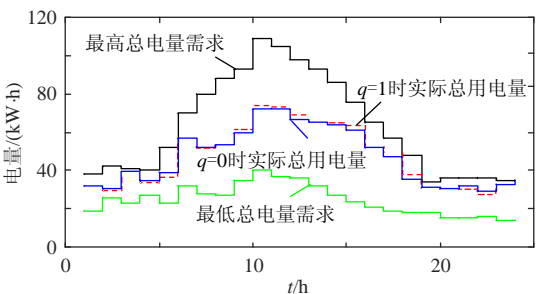


图4 不同区块链应用程度下用户侧的总用电量
Fig. 4 Total power consumption of user side under different application degrees of block chain

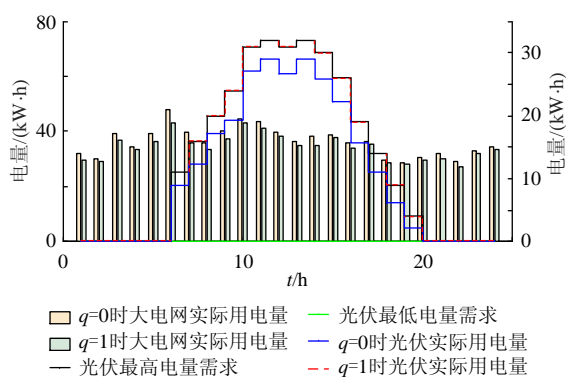


图5 不同区块链应用程度下用户侧的微网与大电网用电量对比

Fig. 5 Comparison of power consumption in user side between micro grid and large power grid under different application degrees of block chain

其次,将不同区块链应用程度下用户侧的微网光伏用电福利及大电网用电福利进行了对比分析,如图6所示。在微网光伏发电的时隙中($k \in [6,19]$),由于基于区块链电力系统的用户提高了光伏用电量,用户侧总福利较未应用区块链的增幅显著(如时隙15,蓝色表示的应用区块链的光伏用电福利大于紫色表示的未应用区块链的光伏用电福利)。同时,由于用户减少了大电网用电,基于区块链的用户大电网用电福利有所减少(如时隙5,黄色表示的未应用区块链的用户大电网用电福利大于绿色表示的应用区块链的用户大电网用电福利)。但总体来看,区块链的应用提高了用户的总用电福利。

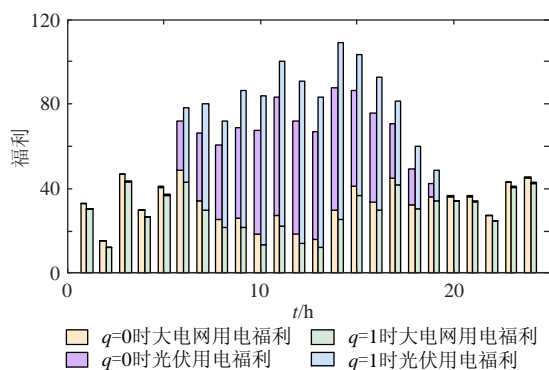


图6 不同区块链应用程度下用户侧的微网与大电网用电福利对比

Fig. 6 Comparison of power welfare in user side between micro grid and large power grid under different application degrees of block chain

再者,将不同区块链应用程度下微网供电商及国家大电网的供电利润进行了对比分析,见图7。

由图7可知,基于区块链的电力系统可以通过区块链将供电信息实时互通,减少了供电决策成本

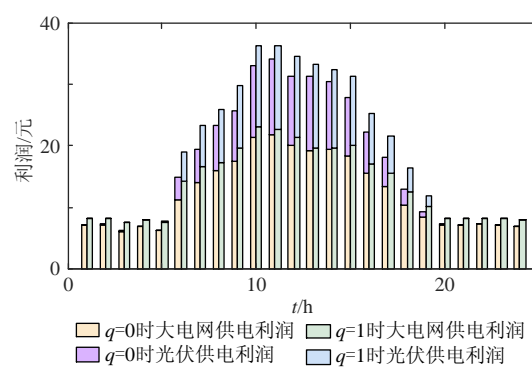


图7 不同区块链应用程度下微网与大电网供电商的利润对比

Fig. 7 Profit comparison between micro grid and large power grid power suppliers under different application degrees of block chain

的同时可以更加充分地实现光伏电力的消纳,把大电网作为系统的电力补充来保障电力系统的稳定运行。虽然在整体的供电量上没有增加很多,但存在光伏发电量的提高及大电网发电量的减少,又光伏发电成本极小,因此提高了供电商整体的利润。同时,各供电商通过 Shapley 值法分配所得的利润也高于未应用区块链时各自的供电利润,即对于大电网,应用区块链的利润(绿色)大于未应用区块链的利润(黄色);同时,对于微网,应用区块链的利润(蓝色)大于未应用区块链的利润(紫色)。即各供电商的供电利润均有所提高,也就是说,通过区块链去中心化的特点将各节点平等化同时区块链信息的公开透明可以提高供电商的利润,对于追求利润的供电商而言则很乐意参与到其中,作为供电联盟的组成部分共同合作为用户供电。

最后,将不同区块链应用程度下电力系统总福利进行对比如图8所示。从整个电力系统的总福利来看,应用区块链的电力系统总福利普遍高于未应用区块链的电力系统,尤其是在峰值的供电时隙。这也验证了基于区块链的电网实时定价混合博弈模型的有效性和合理性。

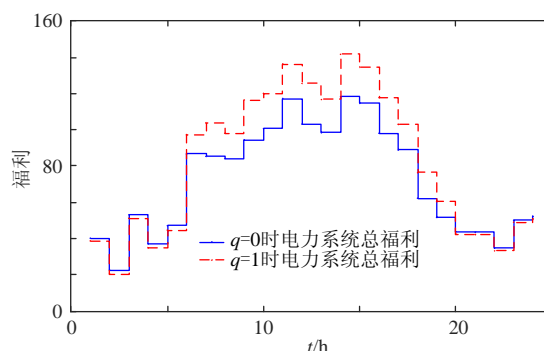


图8 不同区块链应用程度下电力系统总福利对比

Fig. 8 Comparison of total benefits of power system under different application degrees of block chain

综上,对于电力需求侧,基于区块链的电力系统在满足用户用电需求的同时提高了用户的整体用电福利;对于电力供给侧,区块链的应用可以在减少供电商决策成本的同时更好地促进光伏电力的实时消纳、提高微网光伏的利用率、减少电力系统的碳排放量、增加供电商的供电利润,即在增加经济效益的同时兼顾了环境效益,有效促进电力系统的可持续发展。

5 结论

本文在智能电网建设的背景下,提出将区块链技术应用到电力系统中,通过区块链技术将地理位置分散的微网与国家大电网进行整合与协同运作,同时通过应用侧链技术及不同的共识机制实现电力信息的公开透明和实时交互。在此基础上,建立了基于区块链的电网实时定价混合博弈模型,改进了用户效用函数,通过数值仿真对比分析了应用和未应用区块链的电力系统中供需两侧的福利及用电策略。研究表明:

1) 区块链的应用可以实现电力系统中供给两侧的“去信任”,让用户更好地参与到电网决策中。基于区块链电力系统信息的公开透明及实时交互可以让用户更加放心地选用微网可再生能源电力,从而更好地满足用电需求,提高用户的用电福利。

2) 区块链上信息的真实可靠及公开透明可以减少供电商的决策成本及用户的购电环节,实现供需双方的直接交易,提高电力交易的时效性。

3) 基于区块链的电力系统可以更好地促进微网电力的实时消纳,提高可再生能源的利用率,减少电力系统的碳排放量,在增加经济效益的同时兼顾环境效益,促进电力系统的可持续发展。

4) 基于区块链的电力系统的社会总福利更大,在满足用户用电需求、提高用户整体用电福利的同时增加了供电商的供电利润、提高了可再生能源的利用率,实现供给两侧的互利互惠、经济与环保事业的共同发展。

参考文献

- [1] 张莉,高岩,刘松涛,等.具有时间耦合约束的多时段智能电网实时电价[J].系统工程理论与实践,2019,39(10):2599-2609.
Zhang Li, Gao Yan, Liu Songtao, et al. Multi-time slots real-time pricing for smart grid with time-coupled constraints[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2019, 39(10): 2599-2609(in Chinese).
- [2] 张莉,高岩,朱红波,等.考虑用电量不确定性的智能电网实时

- 定价策略[J].电网技术,2019,43(10):3622-3631.
Zhang Li, Gao Yan, Zhu Hongbo, et al. Real-time pricing strategy based on uncertainty of power consumption in smart grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3622-3631(in Chinese).
- [3] 陶莉,高岩,朱红波,等.有可再生能源和电力存储设施并网的智能电网优化用电策略[J].中国管理科学,2019,27(2):150-157.
Tao Li, Gao Yan, Zhu Hongbo, et al. Optimal scheduling for smart grids with the integration of renewable resources and storage devices[J]. Chinese Journal of Management Science, 2019, 27(2): 150-157(in Chinese).
- [4] 赵琳,高岩.具有可替换能源的智能电网实时电价研究[J].上海理工大学学报,2018,40(6):511-518.
Zhao Lin, Gao Yan. Real-time pricing strategy based on alternative energy in smart grid[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2018, 40(6): 511-518(in Chinese).
- [5] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[J]. Consulted, 2008.
- [6] 邵雪,孙宏斌,郭庆来.能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法[J].电网技术,2016,40(12):3630-3638.
Tai Xue, Sun Hongbin, Guo Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638(in Chinese).
- [7] 平健,陈思捷,张宁,等.基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3682-3690.
Ping Jian, Chen Sijie, Zhang Ning, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690(in Chinese).
- [8] 宁晓静,张毅,林湘宁,等.基于物理-信息-价值的能源区块链分析[J].电网技术,2018,42(7):2312-2323.
Ning Xiaojing, Zhang Yi, Lin Xiangning, et al. Block chain analysis of energy based on physics-information-value[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2312-2323(in Chinese).
- [9] 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. Local multimicro grid market competition game model and solving algorithm under block chain technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 191-203(in Chinese).
- [10] 潘明明,刘连光,叶远誉,等.能源互联网中用户参与负荷转移的混合博弈[J].电网技术,2015,39(11):3088-3093.
Pan Mingming, Liu Lianguang, Ye Yuanyu, et al. A game-theoretic analysis for customers' load shifting in energy Internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3088-3093(in Chinese).
- [11] 常源,刘宗歧,黄珊,等.风火网混合博弈协调规划及利益分配方法[J].电网技术,2019,43(11):3899-3907.
Chang Yuan, Liu Zongqi, Huang Shan, et al. Coordinated planning and profit distribution of wind power, thermal power and grid based on mixed game theory[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3899-3907(in Chinese).
- [12] Juhar A, Khaled S. Peer to peer distributed energy trading in smart grids: a survey[J]. Energies, 2018, 11(6): 1560-1581.
- [13] 袁勇,王飞跃.区块链技术发展现状与展望[J].自动化学报,2016,42(4):481-494.

- Yuan Yong, Wang Feiyue. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494(in Chinese).
- [14] Dong Zhaoyang, Luo Fengji, Liang Gaoqi. Blockchain: a secure, decentralized, trusted cyber infrastructure solution for future energy systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 118-127.
- [15] Du Mingxiao, Ma Xiaofeng, Zhang Zhe, et al. A review on consensus algorithm of blockchain[C]//2017 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). 2017: 2567-2572.
- [16] Tan Senpeng, Yang Chao. Research and improvement of blockchain's DPoS consensus mechanism[J]. Modern Computer, 2019(6): 11-14.
- [17] 张运贵, 李晖照, 王雪, 等. 基于双层博弈的实时电价定价策略研究[J]. 电工技术, 2018(4): 36-39.
- Zhang Yungui, Li Huizhao, Wang Xue, et al. Study on pricing strategy of real-time electricity price based on double game[J]. Electric Engineering, 2018(4): 36-39(in Chinese).
- [18] Samadi P, Mohsenian-Rad A, Schober 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. Gaithersburg, MD: IEEE, 2010: 415-420.
- [19] 李军祥, 潘婷婷, 高岩. 智能电网互补能源供用电实时定价算法研究[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(4): 1092-1096.
- Li Junxiang, Pan Tingting, Gao Yan. Real-time pricing algorithm for supply and demand of complementary energy on smart grid[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(4): 1092-1096(in Chinese).
- [20] 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(in Chinese).
- [21] 刘博, 李军祥, 高岩. 智能电网分类用户实时电价算法研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(9): 2605-2609.
- Liu Bo, Li Junxiang, Gao Yan. Research on real-time pricing algorithm for classified subscribers on smart grid[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(9): 2605-2609(in Chinese).
- [22] 薛振宇, 益西措姆, 李敬如, 等. 扶贫光伏发电典型接入方式及经济效益评估[J]. 供用电, 2019, 36(4): 79-85.
- Xue Zhenyu, Yixicuomu, Li Jingru, et al. The typical access mode and economic benefit evaluation of photovoltaic generation for poverty alleviation[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 79-85(in Chinese).
- [23] 刘睿, 翟相彬. 中国燃煤电厂碳排放量计算及分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(7): 1164-1169.
- Liu Rui, Zhai Xiangbin. Calculation and analysis of carbon emission from coal-fired power plants in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(7): 1164-1169(in Chinese).



李军祥

在线出版日期: 2020-09-27。

收稿日期: 2019-12-16。

作者简介:

李军祥(1971), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、系统科学, E-mail:

junxiangli1971@163.com;

周继儒(1995), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统定价与博弈, E-mail: zjr1307@163.com;

何建佳(1981), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 通信作者, 研究方向为管理科学与工程, E-mail: hejianjiayan@163.com。

(责任编辑 王金芝)