

基于博弈策略的能源区块链 安全交易机制

李刚^{1,2}, 赵琳颖¹, 关雪¹, 鲁斌^{1,2}, 辛锐^{3,4}, 程凯^{3,4}

(1. 华北电力大学计算机系, 河北省保定市 071003;

2. 复杂能源系统智能计算教育部工程研究中心, 河北省保定市 071003;

3. 国网河北省电力有限公司信息通信分公司, 石家庄市 050021;

4. 河北省电力物联网信息通信技术创新中心, 石家庄市 050021)

摘要:能源区块链的先期探索给能源互联网的建设提供了良好的技术支撑,然而大规模参与主体的不断涌入,能源交易的安全、公平、效率等问题再次迎来新的挑战,博弈论因考量了交易主体之间的策略互动及利益依存关系,有望为该问题的解决提供新思路。首先,以能源交易的利益最大化为目标函数,构建多能源交易策略的博弈模型,依据能源供需量及报价,求解能源用户和能源商户策略博弈的纳什均衡值,为交易机制提供价格参考。其次,结合能源互联网的特性,构建基于联盟链的弱中心化多主体能源交易机制,并对能源区块结构及共识机制进行改进以实现高效可靠的交易流程。最后,在模拟场景下进行算例仿真,仿真结果表明所提出的安全交易机制在保障买卖双方利益的同时,加快了区块的共识速度,为能源交易平台的建设提供帮助。

关键词:能源互联网; 区块链; 博弈论; 安全交易机制; 共识机制

Security Transaction Mechanism of Energy Blockchain Applying Game Strategy

LI Gang^{1,2}, ZHAO Linying¹, GUAN Xue¹, LU Bin^{1,2}, XIN Rui^{3,4}, CHENG Kai^{3,4}

(1. Department of Computer, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;

2. Engineering Research Center of Intelligent Computing for Complex Energy Systems,

Ministry of Education, Baoding 071003, Hebei Province, China; 3. State Grid Hebei Electric Power

Company Limited Information and Communication Branch, Shijiazhuang 050021, China;

4. Hebei Electric Power Internet of Things Information and Communication Technology

Innovation Center, Shijiazhuang 050021, China)

ABSTRACT: The early exploration of the energy blockchain has provided good technical support for the construction of the energy internet. However, as the continuous influx of large-scale participants, the safety, fairness and efficiency of energy transactions once again face new challenges. Game theory considers the advantages of strategic interaction and interest dependence between transaction subjects, and is expected to provide new solutions. Firstly, the objective function of maximizing the benefits of energy trading is to construct a multi-energy trading strategy game model. According to energy supply and demand and quotation, the Nash equilibrium value of the strategy game between energy users and energy providers is solved, which provides a price reference for the trading mechanism. Combining the characteristics of the energy internet, this paper builds a weakly centralized multi-agent energy transaction mechanism based on the alliance chain, and improves the energy block structure and consensus mechanism to achieve an efficient and reliable transaction process. Simulation results show that the secure transaction mechanism not only protects the interests of buyers and sellers, but also speeds up the consensus of the block, with a view to provide help for the construction of the energy trading platform.

This work is supported by Key R & D Program of Hebei Province (No. 20310103D) and Fundamental Research Funds for Central University (No. 2020MS119).

KEYWORDS: energy internet; blockchain; game theory; secure transaction mechanism; consensus mechanism

中图分类号: TM 732; TK 01

文献标志码: A

文章编号: 1000 - 7229(2021)12 - 0127 - 09

DOI: 10. 12204/j. issn. 1000 - 7229. 2021. 12. 014

0 引言

新一代信息技术给能源互联网的发展带来了重大契机,能源系统正在由封闭模式过渡转变到开放模式。以能源电力科学和信息科学为基础的能源互联网,旨在建立一种多种能源形式(节点)共同参与的共享互联网络^[1],进而达到信息流和能量流的双向流通与互动。然而,当前参与主体的多样性、能源数据的安全性以及交易信息的保密性等诸多实际问题制约着能源互联网的发展,迫切需要找到新的解决途径^[2]。

区块链(blockchain, BC)技术的分布式、不可篡改、匿名性等特性与能源互联网的业务需求极为贴合,为其安全问题提供了一种新的解决方案^[3]。目前,区块链技术在金融^[4]、物联网^[5-6]、数据存储^[7]等方面已有较多应用,现已逐渐扩展到能源交易领域。例如,文献[8]提出了基于联盟链技术的电力交易方法;文献[9]提出了基于双向拍卖定价机制的智能合约算法;文献[10]提出了融合雷电网络与区块链生态系统的电动汽车充电交易机制等。

由于能源互联网中存在多方参与主体,交易双方的利益目标不同,仅从整体角度考量交易过程并不能切实反映真实状态,因此可引入博弈理论对交易双方的协商过程进行阐述,进而为交易市场提供合理的能源供需策略参考。文献[11]借助主从博弈优化了区域综合能源系统的运行方案;文献[12]通过主多从博弈模型探究了售电商与用户之间的策略互动行为;文献[13]针对微电网能源管理场景提出了基于 Stackelberg 的最优定价模型。然而,上述研究依旧在传统的中心化模式背景下进行探索,难以保证用户隐私安全以及交易处理性能。

因此,本文结合能源互联网交易市场的应用特性和安全需求,拟将博弈策略引入能源区块链的安全交易机制中,保障交易双方的利益需求。首先,运用博弈理论求解买卖双方定价策略的唯一纳什均衡解,为交易的撮合提供价格参考;然后,设计基于联盟链的弱中心化多主体能源交易机制,通过对区块结构及实用拜占庭容错(practical byzantine fault tolerance, PBFT)共识机制的优化,提升能源交易效率;最后,依据算例分析证明本文所提安全交易机制的可行性和有效性。

1 能源区块链

能源互联网可分为能源网络层和信息管理层2个层面,其基本架构如图1所示。

能源网络层是由储能装置、天然气网、供热网、电气化交通网、智慧电网和能源输送配置网等互联共享、相互耦合形成的复杂网络体系^[14];信息管理层包

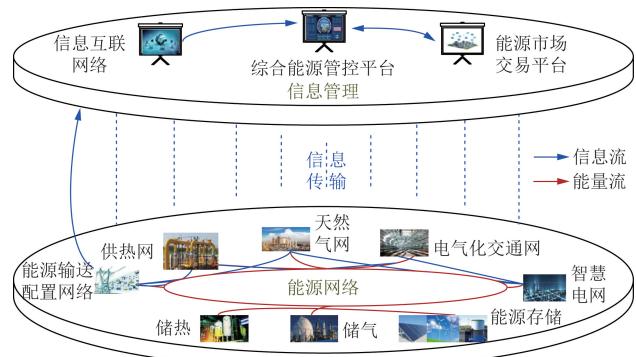


图1 能源互联网基本架构

Fig. 1 Basic architecture of an energy Internet

含信息互联网络、综合能源管控平台、能源市场交易平台等。

通过能源网络层实现能量输配、信息传递等功能,并将汇总信息通过能源输送配置网络传输至信息管理层。用户可通过信息互联网实时准确地获取能源流动状况,利用综合信息管控平台实现源-网-荷-储的灵活协调,借助能源交易平台形成开放、平等、自由的多元主体市场体系,发展高效、循环、绿色的新型商业模式^[15]。

由于区块链技术的去中心化、自治协同、多元化市场、智能合约的特征极为贴合能源互联网的业务需求,因此,区块链技术可与能源互联网形成天然互补优势,极大降低第三方信任机制的保障成本,保障能源互联网业务的高效性^[16]。

本文从特征融合以及技术需求两方面阐述区块链技术与能源互联网交叉融合的可行性。

1) 特征融合:能源互联网与区块链技术同样具备分布式、协同合作、公平共享、智能运行的优势。能源互联网中主要包括分布式能源服务商、用户侧节点、微电网3部分,它们之间各自决策、公平合作、能源共享、平等交易,并根据控制系统智能运行;区块链技术各节点间分布运行,平等运用数据资源,根据智能合约自动化运行,通过共识机制达成一致,因此,能源互联网与区块链技术能够在特征上完美融合。

2) 技术需求:能源互联网面临节点众多、交易数据冗杂的难题,可以通过区块链P2P网络进行交易信息传输以及存储,极大增加了数据安全性;分布式能源节点之间存在的信任风险可以通过共识机制和密码学原理来保证能源交易的一致性和隐私性;能源服务商以及电力用户侧双方的信息可以通过智能合约技术进行自动化匹配处理,有效提高交易效率。

因此,区块链技术能够在能源互联网的应用场景

中实现新的价值,能源互联网也可通过区块链实现更优的交易性能,两者之间可以实现互补。

2 能源交易主体策略博弈模型

2.1 博弈论基本概念

博弈论是现代经济学的基础理论组成部分^[17],其基础定义包含参与者、行动、信息、策略、支付、结果和均衡。其中,参与者、行动、结果合称“博弈规则”,可以用来求解多方博弈主体的最优均衡解^[18]。

纳什均衡是一种非合作的多方互利博弈,包括所有参与者的最优策略组合^[19]。本文提出的多能源交易策略的博弈模型标准定义如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \{T, U, F_t, \{S_{T_i}\}, \{S_{U_j}\}, W_{T_i}, W_{U_j}\} \\ \text{s. t. } T_i \in T, U_j \in U \\ \max(\sum_{i=1}^n W_{T_i} + \sum_{j=1}^m W_{U_j}) \\ F_t > F_t^{\text{buy}} > 0, \forall t \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta \lambda < 0 \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: T 为能源用户集合; U 为能源商户集合; F_t 为 t 时刻的能源存储量; $\{S_{T_i}\}$ 为能源用户策略集; $\{S_{U_j}\}$ 为能源商户策略集; W_{T_i} 为能源用户利润; W_{U_j} 为能源商户利润; $\Delta \lambda$ 为能源交易平台中各参与节点的安全约束; n 为用户数; m 为商户数; F_t^{buy} 为 t 时刻能源交易量。

2.2 交易策略模型构建

本文依托博弈理论,构建了一个多能源交易策略的博弈模型,如图 2 所示。本模型符合能源交易市场中“先能源竞价后用能调整”的循环博弈规律,通过求

解贴合双方利益需求的最优策略,为交易机制提供合理参考。模型中包含如工业用户、产消者、分布式能源、商业用户、居民用户等 n 个能源用户和如电网、天然气网等 m 个能源商户,分别用集合 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 和 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 表示,其中 T_i 代表各能源用户, U_j 代表各能源商户。将最大化能源互联网平台的总利益作为目标函数,如式(2)所示。

$$\max W_{\text{total}} = \max(\sum_{i=1}^n W_{T_i} + \sum_{j=1}^m W_{U_j}) \quad (2)$$

式中: W_{total} 为系统的总利益。

1) 能源用户模型。

以能源用户的收益最大化为目标,需考量自身消费需求、预期交易成本等因素。

依据能源用户 T_i 对电能和天然气能的偏好系数计算需求总和,如式(3)所示。

$$M_{T_i} = [\alpha_{T_i}^e x_{T_i}^e - \frac{\beta_{T_i}^e}{2} (x_{T_i}^e)^2] + [\alpha_{T_i}^g x_{T_i}^g - \frac{\beta_{T_i}^g}{2} (x_{T_i}^g)^2] \quad (3)$$

式中: $\alpha_{T_i}^e$ 、 $\beta_{T_i}^e$ 和 $\alpha_{T_i}^g$ 、 $\beta_{T_i}^g$ 代表用户 T_i 对电能、天然气的需要值及满意级别,均为非负数; $x_{T_i}^e$ 、 $x_{T_i}^g$ 分别为能源用户 T_i 消耗的电量和天然气量。

设能源商户 U_j 提出的单位电价及单位天然气价为 $p_{U_j}^e$ 及 $p_{U_j}^g$,则其成本函数如式(4)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{T_i}^{\text{all}} = C_{T_i}^{\text{buy}} + C_{T_i}^{\text{run}} + C_{T_i}^{\text{env}} \\ C_{T_i}^{\text{buy}} = x_{T_i}^e p_{U_j}^e + x_{T_i}^g p_{U_j}^g \\ C_{T_i}^{\text{run}} = \sum_k V_{t,k} + \psi |V_{t,\text{es}}| \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: $C_{T_i}^{\text{buy}}$ 为购能成本; $C_{T_i}^{\text{run}}$ 为运行成本; $C_{T_i}^{\text{env}}$ 为环境成本; $V_{t,k}$ 为第 k 类设备的运行成本; ψ 为储能系统的单位损耗成本; $V_{t,\text{es}}$ 为储能系统的损耗值。

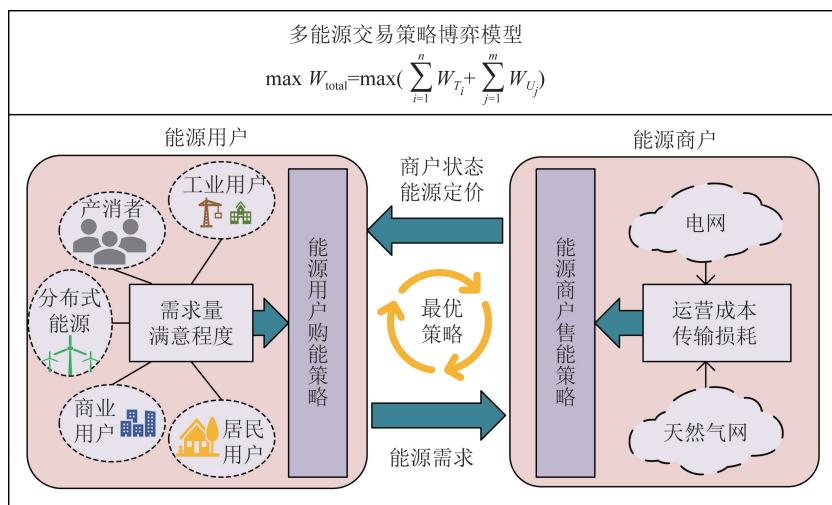


图 2 能源交易主体策略博弈模型

Fig. 2 Strategy game model between energy transaction entities

收益函数定义如式(5)所示。

$$\begin{aligned} W_{T_i} = M_{T_i} - C_{T_i}^{\text{all}} = \\ \left[\alpha_{T_i}^e x_{T_i}^e - \frac{\beta_{T_i}^e}{2} (x_{T_i}^e)^2 \right] + \left[\alpha_{T_i}^g x_{T_i}^g - \frac{\beta_{T_i}^g}{2} (x_{T_i}^g)^2 \right] - \\ \left[(x_{T_i}^e p_{U_j}^e + x_{T_i}^g p_{U_j}^g) + (\sum V_{t,k} + \psi |V_{t,\text{es}}|) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

2) 能源商户模型。

设能源商户 U_j 输出的电量及天然气量分别是 $o_{U_j}^e$ 和 $o_{U_j}^g$, 计量函数如式(6)所示。

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m o_{U_j}^e = (1 + \eta^e) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^e \\ \sum_{j=1}^m o_{U_j}^g = (1 + \eta^g) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^g \end{cases} \quad (6)$$

式中: η^e 和 η^g 表示电能、天然气传输途中的消耗参数。

因能源商户在其日常生产运行、器械购入维护等方面的成本无法精准计量,因而,本文通过一个可微函数对其进行描述。能源商户 U_j 成本函数如式(7)所示。

$$C_{U_j} = \varphi_{U_j} (o_{U_j}^e + o_{U_j}^g) + \delta_{U_j} + C_{U_j}^{\text{buy}} \quad (7)$$

式中: φ_{U_j} 表示可变化成本的系数; δ_{U_j} 表示固定成本的系数; $C_{U_j}^{\text{buy}}$ 为能源商户从电网、天然气网的购能支出。

能源商户 U_j 的售能效用函数如式(8)所示:

$$M_{U_j} = o_{U_j}^e p_{U_j}^e + o_{U_j}^g p_{U_j}^g \quad (8)$$

能源商户 U_j 的收益函数如式(9)所示:

$$\begin{aligned} W_{U_j} = M_{U_j} - C_{U_j} = \\ o_{U_j}^e p_{U_j}^e + o_{U_j}^g p_{U_j}^g - \\ [\varphi_{U_j} (o_{U_j}^e + o_{U_j}^g) + \delta_{U_j} + C_{U_j}^{\text{buy}}] \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 模型求解

以博弈理论为基础,结合能源互联网交易场景,本文所构建的博弈模型中的必要元素如下。

参与者:所有能源用户 $T_i \in T$ 和所有的能源商户 $U_j \in U$,均具有个体理性。

策略:能源用户参考单位电价及单位天然气价,弹性修改其购电量 $x_{T_i}^e$ 和天然气量 $x_{T_i}^g$,能源商户参考能源用户能源需求调整电能报价 $p_{U_j}^e$ 和天然气报价 $p_{U_j}^g$ 。

支付:收益函数如式(5)、(9)所示,能源商户与能源用户之间通过策略博弈实现双方最优均衡。

能源用户 T_i 的最优策略应满足:

$$\max_{x_{T_i}^e, x_{T_i}^g} W_{T_i} \quad (10)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} x_{T_i}^e \in [x_{T_i}^{e,\min}, x_{T_i}^{e,\max}] \\ x_{T_i}^g \in [x_{T_i}^{g,\min}, x_{T_i}^{g,\max}] \end{cases} \forall T_i \in T \quad (11)$$

式中: $x_{T_i}^{e,\min}$ 、 $x_{T_i}^{e,\max}$ 和 $x_{T_i}^{g,\min}$ 、 $x_{T_i}^{g,\max}$ 分别为用户 T_i 消耗的

电能和天然气最小值和最大值。式(11)为能源用户的策略空间 S_{T_i} ,包含用电量 $x_{T_i}^e$ 和天然气量 $x_{T_i}^g$ 。

能源商户 U_j 的最优策略应满足:

$$\begin{aligned} & \max_{p_{U_j}^e, p_{U_j}^g} W_{U_j} \quad (12) \\ & \begin{cases} p_{U_j}^e \geq 0 \\ p_{U_j}^g \geq 0 \end{cases} \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \sum_{j=1}^m o_{U_j}^e = (1 + \eta^e) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^e \\ \sum_{j=1}^m o_{U_j}^g = (1 + \eta^g) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^g \end{cases} \quad (13) \end{aligned}$$

求能源用户收益函数关于 $x_{T_i}^e$ 和 $x_{T_i}^g$ 的一阶偏导数,得:

$$\begin{cases} \frac{\partial W_{T_i}}{\partial x_{T_i}^e} = \alpha_{T_i}^e - \beta_{T_i}^e x_{T_i}^e - p_{U_j}^e \\ \frac{\partial W_{T_i}}{\partial x_{T_i}^g} = \alpha_{T_i}^g - \beta_{T_i}^g x_{T_i}^g - p_{U_j}^g \end{cases} \quad (14)$$

当式(14)值为0时,即为最优均衡解。求解可得:

$$\begin{cases} x_{T_i}^e = \frac{\alpha_{T_i}^e - p_{U_j}^e}{\beta_{T_i}^e} \\ x_{T_i}^g = \frac{\alpha_{T_i}^g - p_{U_j}^g}{\beta_{T_i}^g} \end{cases} \quad (15)$$

根据用电量 $x_{T_i}^e \geq 0$ 和用天然气量 $x_{T_i}^g \geq 0$ 的性质,能得到单位电价及单位气价应符合:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{U_j}^e \leq \min(\alpha_{T_i}^e) \\ 0 \leq p_{U_j}^g \leq \min(\alpha_{T_i}^g) \end{cases} \quad (16)$$

式(16)为能源商户策略空间 S_{U_j} ,包含单位电价 $p_{U_j}^e$ 和单位天然气价 $p_{U_j}^g$ 。

根据纳什均衡定义,若全部参与主体均满足利益函数最大化,则不需再进行策略博弈,组合全部参与主体策略,得到该问题的纳什均衡解。设 X 为所有能源用户的策略集合, P 是所有能源商户的策略集合,则 (X^*, P^*) 为纳什均衡的充分必要条件如式(17)所示。

$$\begin{cases} W_{T_i}(X_{T_i}^*, P^*) \geq W_{T_i}(X_{T_i}, X_{-T_i}^*, P^*) \\ W_{U_j}(X^*, P_{U_j}^*) \geq W_{U_j}(X^*, P_{U_j}, P_{-U_j}^*) \\ \forall X_{T_i} \in S_{T_i}, \forall P_{U_j} \in S_{U_j}, \forall T_i \in T, \forall U_j \in U \end{cases} \quad (17)$$

式中: X_{T_i} 为能源用户 T_i 的策略集合; $X_{T_i}^*$ 为在给定其他用户选择的情况下第 T_i 个参与者的最优策略; $X_{-T_i}^*$ 为除 T_i 以外其他能源用户的最优策略; P_{U_j} 为能源商户 U_j 的策略集合; $P_{U_j}^*$ 为在给定其他能源商户的情况

下第 U_j 个商户的最优策略; $P_{-U_j}^*$ 为除 U_j 以外其他商户的最优策略。能源商户的策略空间对于利益函数具有约束性,因此,需要转换成无约束问题,可借助拉格朗日(Lagrange)方程求解。

对式(12)在满足式(13)约束条件下,构造的拉格朗日方程如式(18)所示。

$$\begin{aligned} L_{U_j} = & o_{U_j}^e p_{U_j}^e + o_{U_j}^g p_{U_j}^g - [\varphi_{U_j}(o_{U_j}^e + o_{U_j}^g) + \\ & \delta_{U_j} + C_{U_j}^{\text{buy}}] + \mu_{U_j}^e \left[\sum_{j=1}^m o_{U_j}^e - (1 + \eta^e) \times \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^n x_{T_i}^e \right] + \mu_{U_j}^g \left[\sum_{j=1}^m o_{U_j}^g - (1 + \eta^g) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^g \right] \quad (18) \end{aligned}$$

式中: $\mu_{U_j}^e$ 、 $\mu_{U_j}^g$ 为电能、天然气的拉格朗日乘子,令其为非负数。

式(18)的互补松弛条件如式(19)所示。

$$\begin{cases} \mu_{U_j}^e \left[\sum_{j=1}^m o_{U_j}^e - (1 + \eta^e) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^e \right] = 0 \\ \sum_{j=1}^m o_{U_j}^e - (1 + \eta^e) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^e = 0 \\ \mu_{U_j}^g \left[\sum_{j=1}^m o_{U_j}^g - (1 + \eta^g) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^g \right] = 0 \\ \sum_{j=1}^m o_{U_j}^g - (1 + \eta^g) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^g = 0 \end{cases} \quad (19)$$

综上,可将目标函数式(2)转换为:

$$\begin{aligned} \max \{ & [\alpha_{T_i}^e x_{T_i}^e - \frac{\beta_{T_i}^e}{2} (x_{T_i}^e)^2] + [\alpha_{T_i}^g x_{T_i}^g - \frac{\beta_{T_i}^g}{2} (x_{T_i}^g)^2] - \\ & [(x_{T_i}^e p_{U_j}^e + x_{T_i}^g p_{U_j}^g) + (\sum_k V_{t,k} + \psi |V_{t,\text{es}}|)] + \\ & o_{U_j}^e p_{U_j}^e + o_{U_j}^g p_{U_j}^g - [\varphi(o_{U_j}^e + o_{U_j}^g) + \delta_{U_j} + \\ & C_{U_j}^{\text{buy}}(P_{U_j})] + \mu_{U_j}^e \left[\sum_{j=1}^m o_{U_j}^e - (1 + \eta^e) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^e \right] + \\ & \mu_{U_j}^g \left[\sum_{j=1}^m o_{U_j}^g - (1 + \eta^g) \sum_{i=1}^n x_{T_i}^g \right] \} \quad (20) \end{aligned}$$

在本文所构建的交易博弈模型中,能源用户根据价格策略合理分配使用能源,能源公司通过用能策略制定电价,求唯一纳什均衡解,实现最大利益目标函数式(2)。

3 基于能源区块链的安全交易机制

3.1 基于联盟链的弱中心化多主体能源交易机制

电力系统与国民经济和信息安全息息相关,因此不宜实现交易数据完全公开透明,确保督查机构具有足够的权限便可^[20]。而私有链无法适应能源互联网体系结构的万物互联,因此,本文基于联盟链提出了具备弱中心化管理机构的能源交易机制,如图 3 所示,

图 4 为适应本文所提交易机制的区块结构。

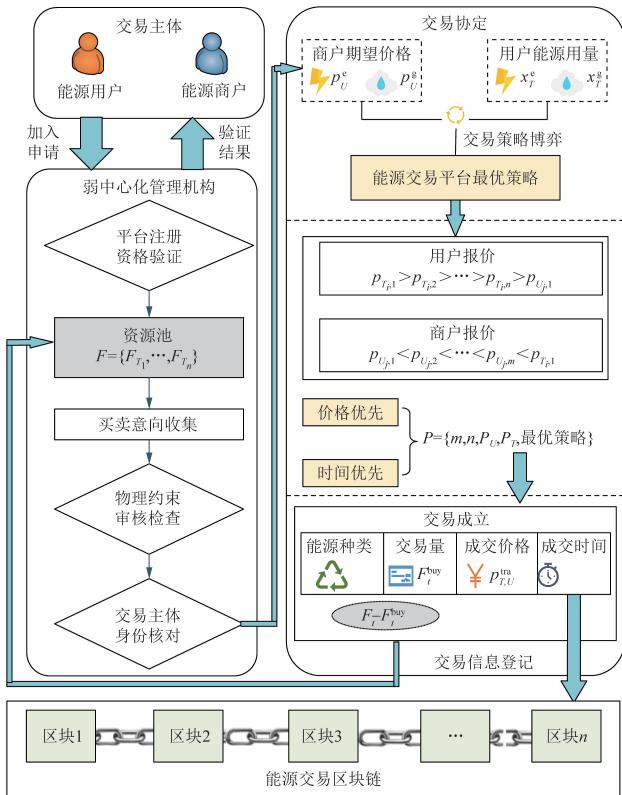


图 3 弱中心化多主体能源交易机制
Fig. 3 Weakly centralized multi-agent energy trading mechanism

能源用户和能源商户向能源交易平台发送加入申请,弱中心化管理机构对其进行身份验证和用户注册,形成交易资源池 $F = \{F_{T_1}, F_{T_2}, \dots, F_{T_n}\}$ 。管理机构对交易双方的服务请求进行安全及交易量等物理约束审核,如式(1),对接收到的买卖意向进行调节反馈;将满足约束条件的交易申请发送至能源交易区块链中,并对买卖双方进行身份核对;能源用户按照降序排列,能源商户按照升序排列,依据价格优先、时间优先原则自主触发智能合约完成交易;把生成的交易数据封装入区块,通过共识机制实现全网广播,并同步更新资源讯息。其中,弱中心化管理机构仅负责买卖意向收集、交易监管协调等辅助功能,并不直接干涉用户与商户之间的交易协定,在保障能源互联网安全的同时实现交易的去中心化。

为更好提升上述基于联盟链的弱中心化多主体能源交易机制的性能,本文设计了一种适用于能源互联网的共识机制及智能合约算法。

3.2 PBFT 算法改进

共识机制的选择是能源区块链安全中极为重要的一环,它可以大大提高能源交易的共识效率和稳定性,从而提高整个框架的可靠性。本文从节点管理、拜占庭容错、中心化、性能、恶意节点、拓展性等方面^[21-23]对

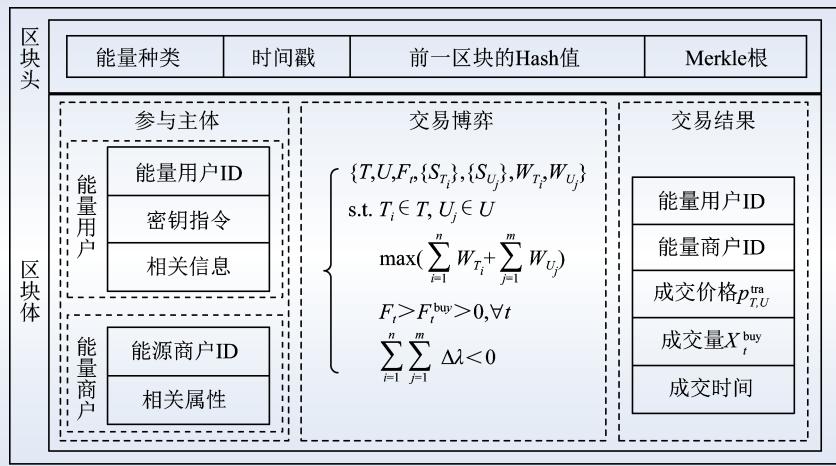


图 4 能源区块链结构
Fig. 4 Energy blockchain structure

常见的 Raft、工作量证明 (proof of work, PoW)、权益证明 (proof of stake, PoS)、委托股权证明 (delegated proof of stake, DPoS) 等共识算法进行比较, 如表 1 所示。

表 1 共识算法比较
Table 1 Comparison of consensus algorithms

属性	算法				
	Raft	PoW	PoS	DPoS	PBFT
节点管理	开放	开放	开放	开放	需验证
拜占庭容错	否	是	是	是	是
中心化	有险	有险	有险	无险	无险
性能	较好	差	有改进	有改进	优秀
拓展性	较好	较好	较好	较好	较差

由表 1 可以看出, PBFT 具备节点管理权限、共识效率高、安全系数高、性能优越, 更加符合能源互联网对于数据安全方面的实际应用要求。

常规的 PBFT 对于网络传输速度与稳定性有较高要求, 且采用 C/S 架构不符合区块链 P2P 架构特点。本文基于联盟链节点大多可信这一特点, 对 PBFT 算法进行改进, 主节点无需接收客户端服务请求后再广播给其他节点, 而是客户端直接进行广播, 从而减少网络通信代价。通过循环方式进行主节点选取, 保障区块链数据一致性的同时, 又能提升共识效率。

能源区块链接收到交易信息后将其打包入区块并向全网进行广播。假设共有 M 个节点, 在完成每一轮共识后, 通过式(21)从中选取一个主节点 N_{master} 。在区块生成 t 时间后客户端对全部共识节点广播 pre-prepare 消息, 共识节点进行消息验证并将验证信息返回主节点 N_{master} 。

$$N_{\text{master}} = (L \bmod M) + 1 \quad (21)$$

式中: L 为区块链长度; $L \bmod M$ 表示 L 对 M 取余。

N_{master} 收到来自超过 $2f + 1$ 个不同共识节点的验证消息后向全网广播 commit 消息, 其中 f 表示区块链中允许出错的最多节点数, 满足 $f < M/3$ 的限制。同步节点验收消息通过后向其他节点进行广播, 客户端收到超过 $f + 1$ 数量的同步节点的验证消息后, 双方协商结束, 数据上链。

智能合约根据节点交易数据进行交易匹配, 匹配成功后交给验证节点验证, 确认能源流与信息流双向流通。

验证成功后的数据上链永久存储在区块链网络中, 实现交易信息的可追溯, 否则该区块将被丢弃并重新开始共识过程。

3.3 智能合约

智能合约是一种多方用户通过计算机语句制定交易协议, 并实现与真实世界价值流通的合同形式。考虑到能源互联网交易中的实际物理约束, 本文设计的智能合约在上述多能源交易策略博弈的基础上, 采用基于连续双边拍卖机制的交易算法。

假设有 n 个能源用户、 m 个能源商户节点, 双方可以在区块链网络中随时发送购能或售能消息, 其中包括预期的报价 p_t^e, p_t^g 和预期用量 x_t^e, x_t^g 。

将能源用户的报价按由大至小的降序形成集合 $p_{T_i} = \{p_{T_{i,1}}, p_{T_{i,2}}, \dots, p_{T_{i,n}}\}$, 能源商户的报价按由小至大的升序形成集合 $p_{U_j} = \{p_{U_{j,1}}, p_{U_{j,2}}, \dots, p_{U_{j,m}}\}$ 。双方参考博弈出的最优策略, 按照价格优先、时间优先的准则, 得到交易流程 $p = \{m, n, p_U, p_T, \text{最优策略}\}$ 。会出现以下几种情况:

1) 当 $p_{T_{i,1}} < p_{U_{j,1}}$ 时, 表示当前所有买方报价全部低于所有卖方售价, 拍卖无法执行, 继续等待新的报价出现;

2) 当 $p_{T_{i,n}} \geq p_{U_{j,m}}$ 时, 表示当前所有买方报价高于所有卖方售价, 拍卖集合可以执行完全, 直到任意一方集合为空;

3) 当 $p_{U_{j,m}} \geq p_{T_{i,1}} \geq p_{U_{j,1}} \geq p_{T_{i,n}}$ 时, 表示买方报价与卖方售价集合有部分重合, 设重合元素为 $p_{T_{i,r}}$, 则 $1 \leq r \leq n$, 拍卖集合可以执行部分, 直到 p_T 集合移到 r 处, 停止匹配, 等待新的报价出现。

因此, 为保障交易的有效进行, 双方报价应符合 $p_{T_{i,n}} > p_{U_{j,1}}$ 且 $p_{U_{j,m}} < p_{T_{i,1}}$ 的条件约束。

将该算法部署在本文交易机制中的能源区块链上, 为交易平台中的多方参与主体之间达成的协议自动生成智能合约, 在保障平台运行生态化的条件下实现公平有效的利益分配, 提升能源交易的运行效率。

4 算例分析

本文通过 10 个能源用户、10 个能源商户共 20 个参与节点对所提出的交易机制进行模拟验证。其中损耗参数 η^e 为 0.04、 η^s 为 0.06, 能源商户可变成本系数 φ_{U_j} 为 18.5 元, 固定成本系数 δ_{U_j} 为 10 元。本模型不考虑能源商户间的价格竞争, 只考虑交易双方之间的博弈过程, 因此所有能源商户的初始值相同。为验证数值的可靠性和唯一性, 分别在初始条件 $p_0^e = 0.023$ 元/(kW·h)、 $p_0^s = 0.017$ 元/(kW·h) 以及 $p_0^e = 1.134$ 元/(kW·h)、 $p_0^s = 1.081$ 元/(kW·h) 的情况下进行迭代, 结果如图 5 所示, 说明迭代结果与初始选值无关, 可证最优解唯一性, 能为能源交易提供可靠参考。

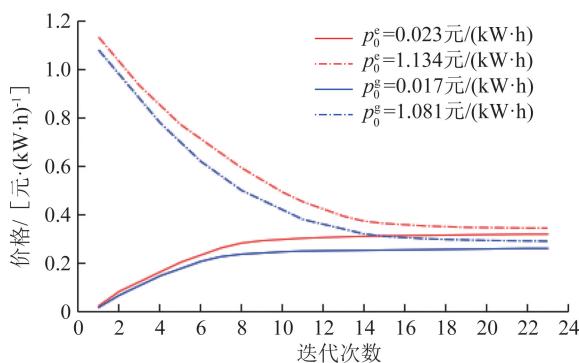


图 5 能源交易参考价格

Fig. 5 Reference price of energy trading

设定两条独立的交易链分别对电、气两种能源交易场景进行处理, 其交易机制相同, 因此本文仅对电能交易进行分析。能源交易主体根据自身状态和能源交易参考价格进行报价, 其交易信息如表 2 所示, 左侧为能源用户交易信息, 右侧为能源商户交易信息。

表 2 能源交易主体交易信息

Table 2 Transaction information of energy transaction entities

能源用户交易信息			能源商户交易信息		
能源 用户	需求量/ (kW·h)	报价/[元· (kW·h) ⁻¹]	能源 商户	出售量/ (kW·h)	报价/[元· (kW·h) ⁻¹]
T1	400	0.36	U1	350	0.33
T2	150	0.26	U2	230	0.44
T3	550	0.50	U3	480	0.35
T4	450	0.35	U4	390	0.50
T5	360	0.51	U5	200	0.43
T6	350	0.39	U6	350	0.36
T7	500	0.42	U7	310	0.32
T8	170	0.31	U8	190	0.25
T9	50	0.29	U9	450	0.39
T10	300	0.40	U10	470	0.43

参考电能的交易博弈策略, 遵循时间优先及价格优先原则, 在市场条件处于供大于求的情况下, 本次实验共产生了 10 个能源交易, 交易结果如图 6 所示。

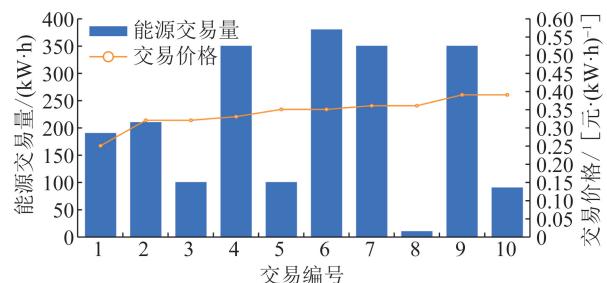


图 6 能源交易结果
Fig. 6 Energy trading results

对比各能源用户的预期成本及实际交易成本, 如图 7 所示, 图中上方柱形为通过本文所提交易机制进行交易后能源用户的总交易成本, 下方柱形为能源用户的总预期成本, 依据上下两柱形的差额部分可以较明显看出各能源用户都不同程度节省了成本, 基本证明了交易机制的可靠性。

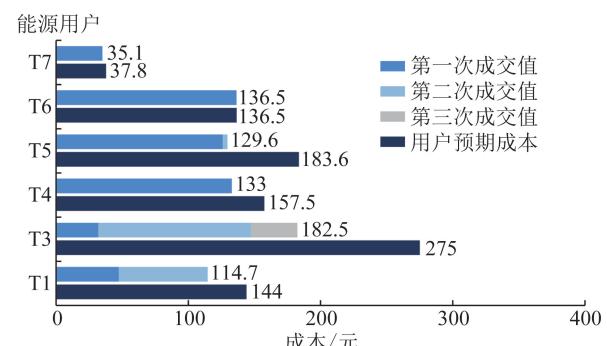


图 7 能源用户交易成本对比
Fig. 7 Comparison of transaction costs of energy users

PBFT 算法的容错能力为 $1/3$ 节点,结合算例设计,实验中的错误节点最多不超过 3 个。因此本文通过 JAVA 编程对常规 PBFT 及本文设计的改进 PBFT 进行 1~3 个失效节点、1~3 个恶意节点条件下的共识完成时间测试,测试结果如图 8 所示。

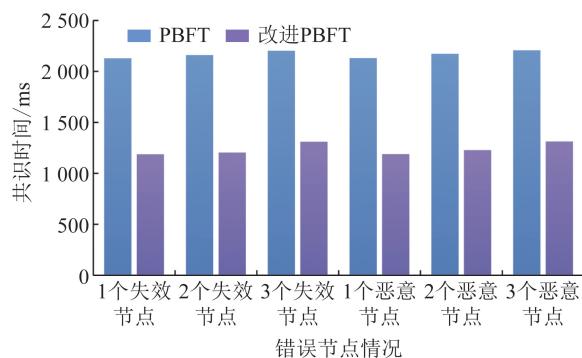


图 8 共识时间对比

Fig. 8 Consensus time comparison

从图 8 的分析结果来看,改进 PBFT 算法由于优化了 P2P 网络,减少了网络传播开销,在节点失效和恶意节点两种条件下与原始 PBFT 算法相比,时间间隔缩短了约 50%,共识速度更快。

5 结 论

本文以我国能源互联网建设为背景,从能源商户和能源用户之间存在的策略互动及利益依存行为出发进行了分析研究。构建了一种考虑能源储存量及安全约束的能源交易主体策略博弈模型,求解能源交易利益最大化的唯一纳什均衡解,为能源交易提供价格参考;然后结合区块链技术在能源交易中的优势,构建了基于联盟链的弱中心化多主体能源交易机制,保障交易的安全性,通过对区块结构及 PBFT 共识机制的改进,提高了交易效率;最后通过 20 个参与节点的算例分析证明了本文所提交易机制的可用性。

本文工作表明,基于区块链的能源交易机制通过博弈策略的优化,能够为解决当前多能源交易市场中存在的利益分配不均、信息不对称、交易过程不够公平可信等问题提供参考;提出的改进 PBFT 算法能够有效提升区块链的共识速度。

后续将进一步分析综合能源系统中各能源耦合下的交易形态,助推“新基建”背景下能源区块链的建设发展。

6 参考文献

- [1] 田世明,栾文鹏,张东霞,等.能源互联网技术形态与关键技术[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3482-3494.

TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Energy

Internet technology form and key technologies[J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015, 35(14): 3482-3494.

- [2] 颜拥,赵俊华,文福拴,等.能源系统中的区块链:概念、应用与展望[J].电力建设,2017,38(2):12-20.
YAN Yong, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Blockchain in energy system: Concept, application and outlook [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 12-20.
- [3] 周国良,李刚,吕凛杰,等.区块链背景下能源互联网信息基础架构研究与事件[M].北京:清华大学出版社,2020;10-23.
- [4] IMANUVILOV O Y, YAMAMOTO M. Energy internet towards smart grid 2.0 [C]//2013 Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing. Los Angeles: IEEE, 2013: 105-110.
- [5] 查煜坤,智慧,房小彤.基于区块链的物联网智能终端协作计算方案[J].北京邮电大学学报,2021,44(2):89-94.
ZHA Yukun, ZHI Hui, FANG Xiaotong. A blockchain-based IoT smart terminal collaborative computing scheme [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(2): 89-94.
- [6] MEMON R A, LI Jianping, AHMED J, et al. Cloud-based vs. blockchain-based IoT: A comparative survey and way forward[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(4): 563-587.
- [7] 王千阁,何蒲,聂铁铮,等.区块链系统的数据存储与查询技术综述[J].计算机科学,2018,45(12):12-18.
WANG Qiange, HE Pu, NIE Tiezheng, et al. Overview of data storage and query technology in blockchain systems [J]. Computer Science, 2018, 45(12): 12-18.
- [8] 黄虹,文康珍,刘璇,等.泛在电力物联网背景下基于联盟区块链的电力交易方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(3):22-28.
HUANG Hong, WEN Kangzhen, LIU Xuan, et al. Power trading method based on consortium blockchain under ubiquitous power internet of things [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3):22-28.
- [9] 马腾,刘洋,许立雄,等.基于区块链的配电侧多微电网电能去中心化交易模型[J].电网技术,2021,45(6):2237-2247.
MA Teng, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Blockchain-based decentralized transaction model of multi-microgrid power on the distribution side [J]. Power Grid Technology, 2021, 45(6): 2237-2247.
- [10] 李刚,黄奕敏,郑顾平,等.雷电网络在电动汽车充电交易中的技术前景[J].电力建设,2018,39(9):78-86.
LI Gang, HUANG Yimin, ZHENG Guping, et al. Technical prospects of raiden network in electric vehicle charging transaction [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(9): 78-86.
- [11] 顾洁,白凯峰,时亚军.基于多主体主从博弈优化交互机制的区域综合能源系统优化运行[J].电网技术,2019,43(9):3119-3134.
GU Jie, BAI Kaifeng, SHI Yajun. Optimal operation of regional integrated energy system based on multi-agent master-slave game optimization interaction mechanism [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3119-3134.
- [12] 代业明,高红伟,高岩,等.具有电力需求预测更新的智能电网

- 实时定价机制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 58-63.
- DAI Yeming, GAO Hongwei, GAO Yan, et al. Smart grid real-time pricing mechanism with power demand forecast update [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 58-63.
- [13] LIU Nian, YU Xinghuo, WANG Cheng, 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.
- [14] 杨方, 白翠粉, 张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3495-3502.
- YANG Fang, BAI Cuifen, ZHANG Yibin. Research on the value and implementation framework of the energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3495-3502.
- [15] 杨东伟, 樊涛, 朱辉, 等. 区块链在能源互联中的应用探索 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 5-9.
- [16] 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 technology in the energy Internet: Research framework and a preliminary study of typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4023.
- [17] 张维迎. 博弈论与信息经济学 [M]. 上海: 上海人民出版社, 2012: 20-45.
- [18] 刁勤华, 林济铿, 倪以信, 等. 博弈论及其在电力市场中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 19-23.
- DIAO Qinhuai, LIN Jikeng, NI Yixin, et al. Game theory and its application in power market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 19-23.
- [19] 卢强, 陈来军, 梅生伟. 博弈论在电力系统中典型应用及若干展望 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5009-5017.
- LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5009-5017.
- [20] 窦晓波, 曹水晶, 刘之涵, 等. 弱中心化的配电网市场交易机制、模型与技术实现 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 104-112.
- DOU Xiaobo, CAO Crystal, LIU Zhihan, et al. Weakly centralized distribution network market transaction mechanism, model and technology realization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 104-112.
- [21] MARKO V. The quest for scalable blockchain fabric: Proof-of-work vs. BFT replication [C]//International workshop on open problems in network security. Springer, Cham, 2015: 112-125.
- [22] GRAMOLI V. From blockchain consensus back to Byzantine consensus [J]. Future Generation Computer Systems, 2020, 107: 760-769..
- [23] ZHENG Z, XIE S, DAI H, et al. An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future Trends [C]//2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress). Honolulu: IEEE, 2017: 557-564.

收稿日期:2021-08-12

作者简介:

李刚(1980),男,博士,副教授,硕士研究生导师,通信作者,主要研究方向为智能电网与大数据、信息物理能源系统、故障预测与健康管理,E-mail:ququ_er2003@126.com;

赵琳颖(1997),女,硕士研究生,主要研究方向为智能电网与大数据、能源区块链,E-mail:hello_zl11@163.com;

关雪(1997),女,硕士研究生,主要研究方向为智能电网与大数据、能源区块链,E-mail:guanxueguanxue@163.com;

鲁斌(1975),男,教授,博士生导师,主要研究方向为人工智能、电力大数据分析,E-mail:lubin@ncepu.edu.cn;

辛锐(1983),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向为电力信息技术;

程凯(1990),男,硕士,工程师,主要研究方向为信息安全技术,E-mail:smileck@126.com。

(编辑 张小飞)