

张欣甜, 杨怀洲, 朱凯龙, 等. 基于区块链的微电网分布式能源交易系统研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(11): 88-92.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24051502

基于区块链的微电网分布式能源交易系统研究

张欣甜, 杨怀洲, 朱凯龙, 黄佩
(西安石油大学 计算机学院, 西安 710065)

摘要: 针对传统微电网交易市场普遍存在交易效率低、价格不透明以及交易信息易篡改的问题。首先, 设计一种基于区块链的微电网分布式能源连续双向拍卖交易机制, 实现了能源买卖双方的高效匹配, 有效解决了微电网交易效率低的问题。其次, 采用区块链存储交易信息, 确保了分布式能源交易信息的实时共享和安全传输, 有效解决了各方之间可信度问题。最后, 应用结果表明, 系统生成不可修改的可追溯交易记录, 所设计的机制有效提高了系统性能与分布式能源交易效率。

关键词: 微电网; 连续双向拍卖; 区块链; 高效匹配; 可追溯

中图分类号: TP315

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)11-0088-05

Research on microgrid distributed energy trading system based on blockchain

ZHANG Xintian, YANG Huaizhou, ZHU Kailong, HUANG Pei

(School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: The traditional microgrid trading market generally has the problems of low transaction efficiency, opaque price and easy to tamper with transaction information. Firstly, a blockchain-based microgrid distributed energy continuous two-way auction transaction mechanism is designed to achieve efficient matching between energy buyers and sellers, and effectively solve the problem of low transaction efficiency of microgrid. Secondly, the use of blockchain to store transaction information ensures the real-time sharing and safe transmission of distributed energy transaction information, and effectively solves the credibility problem between the parties. Finally, the application results show that the system generates unmodifiable traceable transaction records, and the designed mechanism effectively improves the system performance and distributed energy transaction efficiency.

Key words: microgrid; continuous two-way auction; blockchain; efficient matching; traceability

0 引言

随着能源行业的不断发展和智能化技术的飞速进步, 传统电网面临着能源浪费、交易可信度低等诸多挑战。如何实现高效且可信的能源交易成为了迫切需要研究的问题。微电网作为一种新型能源解决方案, 微电网不仅允许小规模能源的本地化生产、分布和消费, 而且为用户提供了更加灵活、可持续和经济的能源交易模式^[1]。

如今, 微电网交易领域的研究主要集中在区块链技术 and 博弈决策两大方向。李彬等学者^[2]提出一种分布式能源交易方案, 该方案引入了区块链技术, 设计了具体的系统架构、交易的流程以及交易结算的机制。王德文等学者^[3]以智能合约、分布式账

本及点对点的交易为基础架构, 提出一种基于区块链的分布式技术, 通过区块链的分布式特征, 使区域内的生产商和消费者能够方便地通过区块链进行交易, 从而保证了交易过程的安全可靠。在此基础上, 提出了一种基于双向竞价的方式来确定结算价格, 从而提高了结算价格的公平性和合理性。赵银波等学者^[4]以商业园区为研究对象, 通过博弈决策模型协调运营商和用户之间的供能产量和负荷需求, 以提高双方收益并促进能源的就近消纳。在经济市场背景下, Lee 等学者^[5]为微电网能源交易提出了一个方案, 该方案使用 Stackelberg 博弈的层次决策模型, 准确地分配能源供应商和需求方之间的交易量, 实现微电网交易的最大化收益。

传统的微电网交易在应对分布式能源交易时存

作者简介: 张欣甜(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 区块链, 微电网交易。Email: 1215855067@qq.com; 杨怀洲(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 物联网, 服务计算。

收稿日期: 2024-05-15

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用

在着一些不足。一方面,传统的集中交易方式难以适应分布式能源的海量、高频、小额交易特点,导致交易效率低下。另一方面,传统的交易缺乏透明度,价格信息不公开、易被篡改,给交易安全带来了隐患。区块链技术作为一种新兴的信息技术,有去中心化、不可篡改和透明可追溯等特征,为解决微电网交易中的难题提供了新思路。连续双向拍卖(Continuous Double Auction, CDA)机制的执行原理主要基于由多个买方和卖方组成的多对多市场结构。在这种结构中,卖方和买方在市场运行过程中的任意时刻都能够自由地提交自身的报价(称为限价指令)和接受他人的报价(称为市价指令)^[6]。通过合理地使用双向拍卖机制,可以有效地提高微电网交易效率^[7]。基于上述结论,本文提出一种基于区块链的微电网分布式能源交易系统。首先,针对微电网对交易存在价格不透明、交易信息易篡改等问题,引入区块链技术并设计了能源交易框架,通过共识机制确保了所有交易数据的真实性和一致性,有效防范了数据被篡改的风险。其次,针对微电网交易效率低、能源利用率低的问题,提出一种连续双向拍卖交易机制,该机制通过智能系统全面收集并分析市场上的交易信息,代理竞价以达成最大程度的交易匹配,从而实现了能源买卖双方的高效匹配。最后,设计实现区块链的分布式能源交易系统,系统生成不可修改的可追溯交易记录。

1 基于区块链的微电网能源交易系统

1.1 系统架构

区块链技术的引入,可有效地解决传统交易方式下用户间信任度低、交易成本高、信息难以公开、交易数据的安全性和透明性不足等多种问题。因此,本文构建一个基于区块链的微电网分布式能源交易平台,整体架构如图 1 所示。平台的交易架构主要分为 3 层次,分别是硬件层、应用层和区块链层。能源传输在硬件层实现、应用层为用户提供了便捷的交易途径、区块链层则确保了交易的安全与透明,以确保平台稳定、安全、高效运行^[8]。

框架的基础是硬件层,构建物理结构。用户通过智能电表与电网相连,电表采集能源数据并与区块链交互,实现交易结算^[9]。用户配备储能系统、发电设备和电表,在处于能量剩余、不足或平衡状态,可与其他用户或电网进行电力交易。电网在分布式能源交易中扮演辅助角色,负责收购余电或补充缺额电量,满足用户需求。

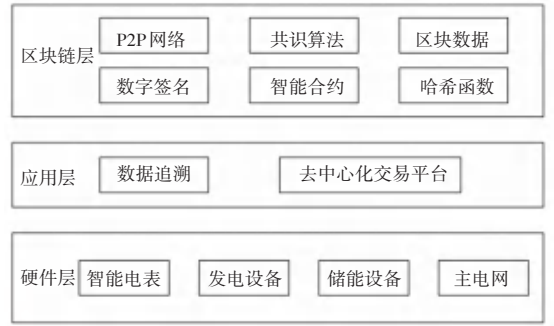


图 1 微电网能源交易系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram of microgrid energy trading system

框架的中间层是应用层,构建了一个分布式能源交易平台,集成了用户界面和去中心化应用程序。当微电网用户有意进行能源交易时,可通过该分布式能源交易平台发布自己出售或购买的能源信息,实现与智能合约的交互^[10]。这些交易请求随后被传递至区块链层处理。若请求满足所有交易条件,则获批准。

框架的最上层是区块链层,作为分布式账本进行交易数据记录和管理智能合约,通常用于确保交易安全、透明和可追溯。区块链记录了所有交易信息,每个区块包含了一定数量的交易信息,并通过哈希值与前一个区块相连,构成了一个不可篡改的链条,从而保证了交易数据的透明和可追溯性^[11]。区块链中存在能源匹配合约、能源结算合约,为流程的自动执行提供现实基础。其中,能源匹配合约可以让能源购买者和能源出售者,最大化地进行匹配。能源结算合约,使得交易完成后,智能电表提供反馈数据进行结算^[12]。

1.2 交易流程

基于区块链的微电网能源交易流程(见图 2)包含 4 个关键环节:信息审核、交易申报、交易匹配和交易结算。

(1)在信息审核阶段,市场监管中心负责核查用户身份,确保其符合市场准入标准。

(2)审核通过后,用户进入交易申报阶段,用户可以进行交易申请,例如向市场提交包含报价、需求数量等信息。

(3)进入交易匹配环节,使用连续双向拍卖机制进行能源匹配。若交易匹配失败,系统将会根据实际情况调整价格,从而促使交易达成。

(4)在交易结算阶段,若用户匹配不成功,将与电网进行交易完成清算,整个过程由智能合约统一执行。这一流程确保了微电网交易的透明、高效与安全,有效促进了微电网交易的发展。

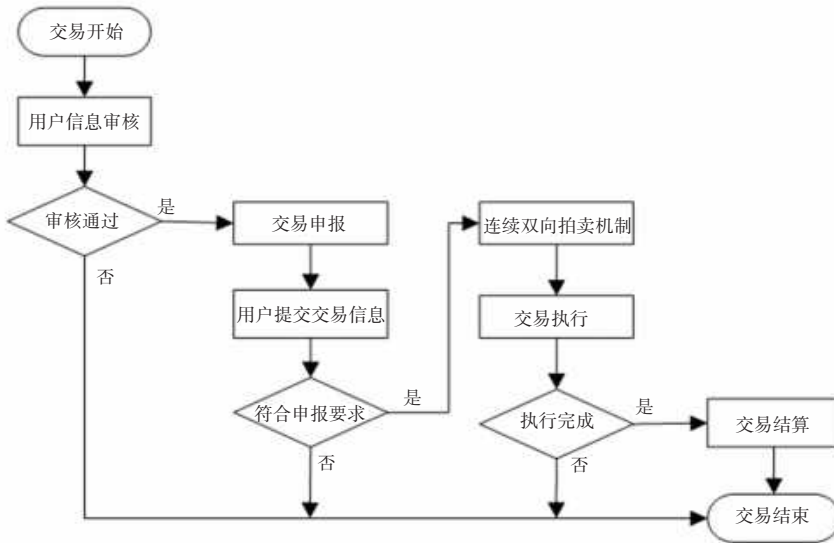


图2 微电网能源交易流程

Fig. 2 Energy transaction process of microgrid

2 基于区块链的微电网能源交易机制

2.1 连续双向拍卖交易机制

本文所研究的连续双向拍卖交易机制架构如图3所示。在微电网中,能源生产者和消费者分别扮演卖家和买家的角色参与双向拍卖。双方竞标活动在固定的时间段 T 内进行,要求竞标双方的发电类型相同,且竞标排序遵循“价格优先,时间优先”的原则,从而确保交易的公平、高效和有序进行^[13]。

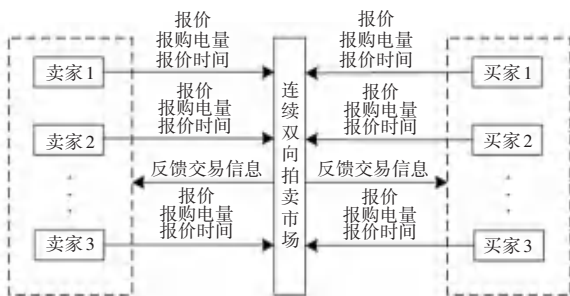


图3 连续双向拍卖交易机制架构

Fig. 3 Structure of continuous two-way auction trading mechanism

文中对于某个卖家 s_i , 发布竞标价格为 P_s , 保留价格为 R_s , 电力数量为 A_s , 则所有卖家的出价集合为 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 。对于某个买家 b_j 发布竞标价格为 P_b , 保留价格为 R_b , 竞标的电力数量为 A_b , 则所有买家出价的集合为 $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 。在连续双向拍卖机制中,系统首先根据“价格优先,时间优先”的原则进行排序。具体来说,买方用户按

照竞标价格从高到低以及报价时间进行排序,而卖方用户则按照竞标价格从低到高以及报价时间进行排序,系统会根据买卖双方的排序关系和交易数量进行一轮匹配^[14]。交易的价格为匹配双方报价的平均值,而交易量则取匹配双方中较小的数值,以确保交易的顺利进行^[15]。其双方交易的价格和交易数量计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{i,j} = \frac{P_i + P_j}{2} \\ A_{i,j} = \min(A_i, A_j) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $P_{i,j}$ 表示用户 i 和用户 j 之间的交易价格; P_i 表示买方 i 的报价; P_j 表示卖方 j 的报价; $A_{i,j}$ 表示用户 i 和用户 j 之间的交易量; A_i 表示买方 i 的交易量; A_j 表示卖方 j 的交易量。

若一轮用户匹配失败,系统自动通知用户调整报价进入二轮匹配。然而,用户在此过程中需预先设定一个保留价格,即在交易中不可突破的最高可接受购买价格(对于买方)或最低可接受出售价格(对于卖方)^[16]。在这一保留价格范围内,系统会依据上一轮的交易数据和市场动态,智能地为用户提供合适的报价建议方案,力求在后续的匹配过程中提高成交概率。系统调整后卖方和买方报价方案的计算公式为:

$$\begin{cases} P_s = P_j - \beta(P_j - P_{s,\max}) \\ P_b = P_i + \beta(P_{b,\min} - P_i) \end{cases} \quad (2)$$

在式(2)中,调价后卖家的报价 P_s 则是基于卖

方 j 的当前报价 P_j 以及上一轮交易中成功匹配的卖家集合内的最高成交价格 $P_{S, \max}$ 来确定的。相应地, 调价后买家的报价 P_B 则是基于买方 i 的当前报价 P_i 以及上一轮已成功匹配的买家集合中的最低成交价格 $P_{B, \min}$ 来确定的。为了实现适应性地调整用户在下一轮的报价, 引入了一个调整因子 β , 其取值范围介于 $0 \sim 1$ 之间, 用来控制报价变动的比例。

在二轮匹配后, 若用户仍未成功匹配, 将按照电力公司的电价和用户所申报的电量自动与电网进行电力交易。匹配成功的用户则会执行智能合约, 由网络中的共识节点对合约进行一致性验证^[17]。验证通过后, 智能合约将被加入新区块, 等待执行和结算^[18]。截止能源交易条约执行时间前, 系统将结合智能电表数据和多重签名验证合约履行情况, 随后自动实现电能和资金的划转结算, 无需人工干预, 大大提高了交易匹配的效率^[19]。

2.2 实验分析

假定当前市场购买电价为 0.59 元/(kW · h), 配电网的回收电价为 0.31 元/(kW · h)。本实验考虑太阳能、风力等设备发电能力和标准电价影响, 为验证连续双向拍卖机制的可行性, 假定微电网交易存在 4 个产消者和 4 个消费者, 实验中用户提交的交易需求数据见表 1。

表 1 用户提交的交易需求

Table 1 Transaction requirements submitted by users

角色	节点	保留价格/元	数量/(kW · h)	报价/元
卖家	S_1	0.34	220	0.41
卖家	S_2	0.41	540	0.45
卖家	S_3	0.45	435	0.50
卖家	S_4	0.40	300	0.45
买家	B_1	0.58	400	0.53
买家	B_2	0.56	480	0.51
买家	B_3	0.55	830	0.49
买家	B_4	0.53	500	0.46

通过 Python 实验模拟该交易机制, 实验得出的匹配结果见表 2。实验中, 卖家 S_1 报价最低, 因此可与买家 B_1 完成匹配, 由于 S_1 交易量小于 B_1 的需求量, 所以此次交易的成交量为 S_1 的交易量; 而卖家 S_3 的报价高于买家 B_3 的报价, 导致双方未能直接匹配, 因此将进入二轮系统代理调价。假设调整因子 β 为 0.1 , 则调价后双方的成交价为 0.492 ; 最终, 买家 B_3 和 B_4 由于报价过低未能在市场上匹配到卖家, 则自动与电网以市场价进行交易。

表 2 匹配结果

Table 2 Matching results

匹配结果	交易数量/(kW · h)	交易价格/元
$S_1 - B_1$	220	0.470
$S_2 - B_1$	180	0.490
$S_2 - B_2$	360	0.480
$S_4 - B_2$	120	0.480
$S_4 - B_3$	180	0.470
$S_3 - B_3$	435	0.492
电力公司 - B_3	215	0.590
电力公司 - B_4	500	0.590

由表 2 分析可知, 当市场中供大于求, 卖家拥有更多选择, 通过卖家合理选择可以获得更高收益。图 4 详细对比了传统直接与电网进行电力买卖产生的收支情况和实验中使用的连续双向拍卖交易机制产生的收支情况的差异。经过计算, 买家的总支出减少了 12% , 卖家的总收益提高了 55% 。实验表明, 本文提出的连续双向拍卖交易机制可以增大收入、节省支出、并实现买卖双方的高效匹配, 从而提升了交易的效率。

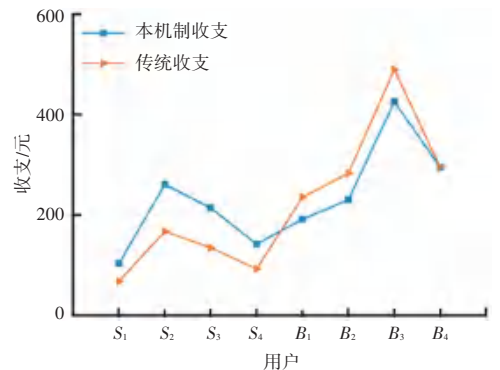


图 4 收支情况比较

Fig. 4 Comparison of income and expenditure

3 系统实现

本文通过 FISCO BCOS 平台进行了节点的仿真部署, 实现了基于区块链的微电网能源交易。该系统的主要功能为产权市场、我的产权、能源交易、我的能源等功能。具体如图 5 所示, 展示了剩余能源、交易中的能源和正在出售的产权。

区块链采用链式数据结构, 每个区块都包含前一个区块的哈希值, 形成一个连续且不可篡改的记录^[20]。产权交易详细信息如图 6 所示, 微电网交易过程中, 系统生成不可修改的可追溯交易记录, 确保了交易数据的透明性和可追溯性, 从而解决了交易过程中价格不透明以及交易信息易篡改问题。

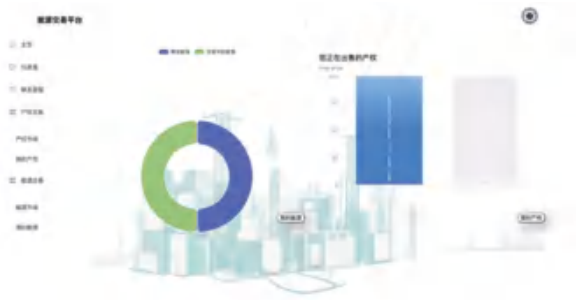


图5 能源交易系统

Fig. 5 Energy trading system



图6 产权交易详细信息

Fig. 6 Details of property rights transactions

4 结束语

本文提出将微电网与区块链进行结合,介绍了分布式能源的交易架构和交易流程。在交易机制方面,采用连续双向拍卖交易机制实现能源买卖双方的高效匹配,解决了微电网交易效率低的问题。通过 FISCO BCOS 平台建立区块链网络,设计了基于区块链的微电网分布式能源交易系统,提升了能源交易的透明度,确保每一笔交易信息都可追溯,从根源上解决了交易信息易篡改的问题。

参考文献

[1] 马天男,彭丽霖,杜英,等. 区块链技术下局域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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 赵银波,高红均,王仲,等. 考虑用户电能替代的商业园区运营商多能交易博弈优化决策[J]. 电网技术,2021,45(4):1320-1331.

[5] LEE J, GUO J, CHOI J K, et al. Distributed energy trading in microgrids: A game-theoretic model and its equilibrium analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3524-3533.

[6] 王华锋. 基于连续双向拍卖的认知无线网络动态频谱管理方法研究[D]. 南昌:华东交通大学,2014.

[7] 杨升宝. 基于区块链的微电网电能可信交易研究[D]. 南昌:南昌大学,2021.

[8] 刘朋. 基于区块链技术的分布式能源交易方法研究[D]. 南宁:广西大学,2022.

[9] 李云洁,者佳男. 基于区块链技术改进的微电网双边竞价策略[J]. 现代计算机,2023,29(19):31-36.

[10] 徐小舒. 基于区块链的微电网电能交易机制研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2021.

[11] 李刚,赵琳颖,关雪,等. 基于博弈策略的能源区块链安全交易机制[J]. 电力建设,2021,42(12):127-135.

[12] MEI Huawei, LI Gen. Energy efficiency of microgrid and the application of blockchain in microgrid[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2020,558(5):115-124.

[13] 刘忠途,张志龙,陈鹏,等. 基于区块链和混合连续双向拍卖的分布式电力交易机制[J]. 科学技术与工程,2023,23(16):6931-6936.

[14] 张志龙,刘忠途. 基于区块链技术的微电网交易机制[J]. 信息技术与信息化,2023(2):136-139.

[15] 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.

[16] 邓明辉. 区块链技术在微电网电力交易中的研究与应用[D]. 福州:福建工程学院,2022.

[17] 李心荷. 基于联盟区块链的微电网电能交易研究[D]. 长春:长春工业大学,2021.

[18] 秦金磊,孙文强,李整,等. 适用于微电网区块链的信用共识机制[J]. 电力系统自动化,2020,44(15):10-18.

[19] 郭策. 基于区块链技术的光伏微电网电能交易研究[D]. 广州:广东工业大学,2020.

[20] 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.