

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.05.033

考虑用户偏好和阻塞管理的多微网分布式电能交易区块链模型

胡开鑫¹, 刘洋^{1,2}, 李振伟¹, 伍宇铜¹, 李金鸿¹

(1. 四川大学电气工程学院, 成都 610065; 2. 四川大学智能电网四川省重点实验室, 成都 610065)

摘要: 在多微网分布式电能交易市场中, 用户偏好不完善、匹配机制不稳定会造成交易者违约, 同时, 潜在的线路阻塞问题也会影响配电网安全和交易效率。为此, 提出考虑用户偏好和阻塞管理的多微网分布式电能交易区块链模型。首先, 利用各微网主体申报价格、用户信誉值、历史合作基础、最大可供电能等信息构建用户合作偏好指标, 并对购售电双方进行评估, 形成合作偏好排序结果。其次, 提出基于Gale-Shapley算法的双边匹配机制, 使得参与主体能够在交易市场的双向选择中获得稳定匹配结果。再次, 提出基于深度优先搜索(depth-first search, DFS)算法的阻塞管理机制, 以保证部分线路拥堵时交易订单的顺利执行。最后, 基于MATLAB仿真平台和以太坊交易平台进行验证, 算例结果证明了所提交易策略可以有效缓解用户违约和线路阻塞问题, 提升微网主体间交易效率。

关键词: 分布式电能交易; 区块链; 用户合作偏好; Gale-Shapley 算法; DFS 算法

Multi-microgrid Distributed Energy Transaction Blockchain Model Considering User Preference and Congestion Management

HU Kaixin¹, LIU Yang^{1,2}, LI Zhenwei¹, WU Yutong¹, LI Jinhong¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Electric Power Grid of Sichuan Province, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In the multi-microgrid distributed power transaction market, imperfect user preference and unstable matching mechanisms will cause traders to default. At the same time, the potential line congestion will also affect safety of distribution network and transaction efficiency. Therefore, a multi-microgrid distributed power transaction blockchain model considering user preference and congestion management is proposed. Firstly, user preference indicators are constructed by using such information as user price, reputation value, historical cooperation base and maximum available power. The evaluation of both electricity buyers and sellers is conducted to form a ranking result of co-operation preference. Then, a bilateral matching mechanism based on the Gale-Shapley algorithm is proposed to enable participants to obtain stable matching results in the two-way selection of the transaction market. After that, a congestion management mechanism based on the depth-first search(DFS) algorithm is proposed to ensure the smooth execution of transaction orders in case of congestion of some lines. Finally, the verification is performed based on the Matlab simulation platform and Ethereum transaction platform. The result of the example proves that the proposed transaction strategy can effectively alleviate the problems of user default and line congestion as well as improve transaction efficiency.

Key words: distributed energy transaction ; blockchain ; user preference ; Gale-Shapley algorithm ; depth-first search algorithm

收稿日期:2024-12-20; 修回日期:2025-02-25

基金项目:四川省科技计划资助(2023YFG0132)。

Project Supported by Sichuan Science and Technology Program(2023YFG0132).

0 引言

随着中国售电侧与交易体制改革的协调推进,分布式能源交易已成为促进能源资源优化配置、可再生能源就地消纳的重要手段^[1-2]。微电网凭借其运行灵活、高度自治的优势,逐渐成为分布式能源参与市场化交易的重要主体^[3-4]。然而,多个微电网间小量、频繁的电能量交易特性,对交易模式的交易效率、数据安全等提出更高的要求^[5]。分布式交易模式虽然具有交易效率高^[6]、维护成本低^[7]等优势,但交易数据易篡改、难追溯等风险依然潜在地影响交易主体的利益^[8]。在此背景下,区块链技术以其去中心化、公开透明、数据可追溯等特点与分布式电能交易天然契合^[9]。因此,在多微网分布式电能交易中引入区块链技术具有重要意义。

在分布式交易市场中,往往存在用户拒绝匹配结果,从而造成交易违约现象。因此,需要构建指标衡量用户合作偏好并设计合理的匹配策略,以抑制恶意交易行为、提升交易履约率。文[10]按照“价格优先”的竞争原则,并应用连续双向拍卖机制交易匹配,但并未考虑用户违约行为。文[11]进一步引入信用评估,设计了“价格为主,信用为辅”的双向拍卖机制,可以一定程度约束恶意行为。但是,仅依靠价格和信用难以满足用户合作偏好多样化的需求。文[12]通过价格、历史交易结果、储能容量等指标构建交易主体偏好,能够更全面反映用户参与市场的竞争优势。然而在匹配环节,其改进的拍卖机制仍未赋予用户自主选择的权力,依然可能因为用户单方违约致使交易匹配失败。为此,仍需要进一步设计合理的匹配机制,以保证匹配结果的稳定性。文[13]将 Gale-Shapley 算法引入到分布式资源匹配中,算例结果证明该算法可以得到更稳定的匹配结果。但是,以上文献均未考虑配电网物理结构对交易匹配结果的影响。

在电能交割阶段,用户往往选择最优传输路径进行能量输送,但大规模电能交易同时传输,可能会引发严重的线路阻塞问题。因此,文[14]设计适用于智能合约的线路动态约束法,可以对匹配结果进行约束校核,并直接取消校核失败的交易订单。文[15]提出了实时滚动的安全校核方法,可以实时更新线路容量裕度,并对阻塞线路的所有订单进行等比例削减。但是,以上文献对阻塞订单的处理方式,均容易导致用户多次购电以满足需求。而相较于与电网的一次交易,多次匹配、多次交易必然效率很低。为此,需要进一步设计阻塞管理机制,实

现交易订单的一次结清。文[16]指出,在未来能源互联网框架下,所有电气设备可能主要以网状形式互联,并通过能源路由器实现区域内能量和信息的最优管理。文[17]进一步设计了配备能源路由器的配电网架构,并利用 DFS 算法进行路径搜索,算例表明在能源路由器参与下,可以通过路径选择缓解线路阻塞问题,进而提高订单交易效率。因此,需要对用户合作偏好和线路阻塞问题进行综合考虑。

综上所述,为解决能源路由器参与下用户违约和线路阻塞问题,文中提出了考虑用户合作偏好和阻塞管理机制的多微网分布式电能交易区块链模型。首先,利用各微网主体初始价格、用户信誉值、最大可供电能、历史合作基础等信息构建用户合作偏好指标,通过对购售电双方进行评估,形成合作偏好排序。其次,为确保参与主体能在交易市场的双向选择中获得稳定的匹配结果,提出基于 Gale-Shapley 算法的双边匹配机制。再次,为解决线路阻塞时交易订单无法顺利执行的问题,提出基于能源路由器和 DFS 算法的阻塞管理机制。最后,基于 MATLAB 仿真平台和以太坊交易平台进行验证,算例结果证明所提交易策略可以提高可再生能源的就地消纳能力。

1 基于区块链的多微网电能交易框架

文中所研究的多微网分布式电能交易模型由物理层、信息层和市场交易层3部分组成,整体架构见图1。在物理层中,各交易主体在交易结算后,通过配电网的物理架构进行能量传输。信息层主要采用加密算法进行技术支撑,以保证物理层与市场交易层之间安全的数据传输。在市场交易层,各微网主体通过区块链平台发布购售电信息,并调用智能合约,由智能合约的一系列函数实现用户匹配,并由区块链共识机制将交易结果打包成区块,保存于区块链上,从而实现公开透明、安全可靠的分布式电能交易。

在本架构中,交易主体主要由微电网和配电网运营商(distribution system operation, DSO)构成,各微电网内部包含风光 DG、储能装置、居民用户和电动汽车负荷。但是文中仅将微电网作为多主体间交易的最小单元,不考虑其内部能量调度问题。微电网在自身内部能量盈余时作为售电方,在能量缺额时作为购电方,与区域内其他微电网进行能量交易,形成多微网分布式电能交易市场。此时,DSO 主要为各微电网的交易起到“兜底”作用,即对交易结束后存在的过剩或缺供电能,分别按照上网电价

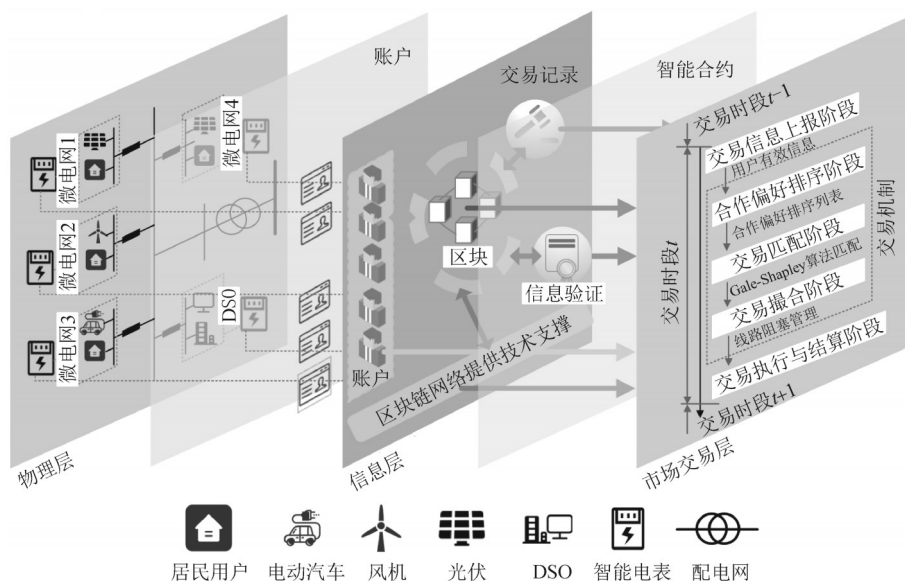


图1 多微网分布式电能交易框架

Fig. 1 Multi-microgrid distributed energy transaction framework

和分时电价集中出清。因此,基于区块链的多微网分布式电能交易流程主要分为以下5个阶段:

1)交易信息上报阶段。各微网主体首先通过智能电表在区块链平台上报自身用能需求,并根据市场供需情况和自身交易意愿,计算并上报初始价格,同时向自身账户存入一定资金用于交易结算。在上报时间截止后,参与主体将在规定时间内公开自身加密字符串,并由智能合约进行Hash运算以判断与密封信息是否一致,若不一致则视为无效信息,该主体不再参与本轮交易。

2)合作偏好排序阶段。智能合约收到所有交易主体的有效信息后,为促进微电网积极参与分布式市场交易,将根据各主体预置权重计算合作偏好值,并形成合作偏好排序,排序靠前的用户将优先成为选择合作的对象。

3)交易匹配阶段。对已经生成的合作偏好排序结果,利用 Gale-Shapley 算法求出稳定匹配解。匹配成功的用户若供需不平衡,则盈余或缺额部分按照偏好排序再次匹配,以实现所有购电方均购满电能或所有售电方均售完电能,未能匹配成功的用户则进入下一轮交易。

4)交易撮合阶段。对已匹配成功的用户,通过 DFS 算法确定两个用户间所有能量传输路径,并利用能源路由器的能源控制功能,选取最优路径进行电能输送。同时,文中假设交易节点的功率注入不会对其电压幅值造成影响,仅考虑线路容量不足导致的潮流越限。那么,当最优传输路径出现阻塞时,对线路订单进行一定程度削减,被削减电量选择次优传输路径继续输送,以实现配电网安全运行

和交易订单一次结清。

5)交易执行与结算阶段。当所用参与主体均实现初始购售电需求,智能合约将终止本轮交易,并根据实际交易情况进行费用结算,智能电表根据签约的电能订单完成能量传输。电能过剩或缺供的微电网,将与配电网进行交易以满足需求。最后,所有交易记录通过智能合约上传于区块链平台进行存储。

下文将从合作偏好排序、交易主体双边匹配、线路阻塞管理等方面对文中所提的分布式电能交易机制进行详细介绍。

2 基于用户偏好的交易调序机制

在实际分布式电能交易市场中,微电网主体因自身逐利性强等问题,极易出现交易违约现象,进而带来一定的经济损失。为了提高交易主体履约率,文中通过构建用户合作偏好指标,对所有参与市场交易的用户进行评估,以筛选出优质用户主体,从而降低交易风险和购电成本,推动分布式电能交易市场的良性发展。

2.1 交易主体初始信息

2.1.1 报价策略

为了规范市场行为,促进用户理性报价,文中将根据市场供需情况和自身意愿,为参与主体制定初始价格信息,并通过智能合约发布于区块链平台参与市场竞争。具体报价策略如下。

定义本轮交易中,购电主体 i 需求电能 $D_i(t)$ 、售电主体 j 供应电能 $S_j(t)$ 分别为:

$$D_i(t) = \{D_1(t), D_2(t), \dots, D_N(t)\} \quad i = \{1, 2, \dots, N\} \quad (1)$$

$$S_j(t) = \{S_1(t), S_2(t), \dots, S_M(t)\} \quad j = \{1, 2, \dots, M\} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, N 、 M 分别为参与市场的购电主体、售电主体个数。

于是,本轮交易中,市场的总供需比为

$$SDR = \sum_{j=1}^M S_j(t) / \sum_{i=1}^N D_i(t) \quad (3)$$

考虑到价格与供需比之间的反比关系,可以得出基于市场供需比的交易参考电价为^[18]:

$$\lambda^{\text{buy}}(t) = \begin{cases} \lambda_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - \frac{SDR^2[\lambda_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - \lambda_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)]}{1 + SDR} & 0 \leq SDR \leq 1 \\ \lambda_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - \frac{SDR[\lambda_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - \lambda_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)]}{1 + SDR} & SDR \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda^{\text{sell}}(t) = \begin{cases} \lambda_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t) + \frac{\lambda_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - \lambda_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)}{1 + SDR} & 0 \leq SDR \leq 1 \\ \lambda_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t) + \frac{\lambda_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t) - \lambda_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)}{SDR + SDR^2} & SDR \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: $\lambda^{\text{buy}}(t)$ 、 $\lambda^{\text{sell}}(t)$ 分别为第 t 时段内参考购电价格和售电价格; $\lambda_{\text{grid}}^{\text{buy}}(t)$ 、 $\lambda_{\text{grid}}^{\text{sell}}(t)$ 分别为第 t 时段内与配电网交易的购电价格和售电价格。

在已知参考电价的基础上,各主体根据自身需求和意愿调整报价,可以增强用户在交易市场中的竞争优势。因此,最终参与主体的报价策略为^[19]:

$$\lambda_i(t) = \lambda^{\text{buy}}(t) + \eta_i \frac{D_i(t)}{Q_i^{\text{Total}}} [\lambda^{\text{buy}}(t) - \lambda^{\text{sell}}(t)] \quad (6)$$

$$\lambda_j(t) = \lambda^{\text{sell}}(t) - \frac{S_j(t)}{Q_j^{\text{Load}}} [\lambda^{\text{buy}}(t) - \lambda^{\text{sell}}(t)] \quad (7)$$

式(6)、(7)中: $\lambda_i(t)$ 、 $\lambda_j(t)$ 分别为购电方 i 、售电方 j 的初始报价; Q_i^{Total} 、 Q_j^{Load} 分别为第 t 交易时段内购电方 i 总发电量和售电方 j 负荷电量; η_i 为购电方 i 参与意愿因子, $\eta_i \in (0, 1]$ 。

2.1.2 用户信誉值

在文中交易模式下,所有参与用户的初始信誉值设定为 100,并在每轮交易结束后,由区块链平台根据合约订单履行情况计算更新,具体公式为^[20]:

$$C(t) = \begin{cases} 100 & \Delta Q(t) \leq \varepsilon \\ 100 \times [1 - \Delta Q(t)] & \varepsilon < \Delta Q(t) \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta Q(t) = [Q^{\text{contract}}(t) - Q^{\text{actual}}(t)] / Q^{\text{contract}}(t) \quad (9)$$

式(8)、(9)中: $C(t)$ 为第 t 交易时段内用户信誉值; $Q^{\text{contract}}(t)$ 、 $Q^{\text{actual}}(t)$ 分别为第 t 交易时段用户合约订单电量和实际履行电量; $\Delta Q(t)$ 为第 t 交易时段用户电量偏差率; ε 为允许电量偏差率。

2.1.3 历史合作基础

对于购电方而言,与售电方的历史合作次数严

重影响双方的交易粘性,合作次数越多、交易越频繁的售电方就越有可能成为供电可靠的选择对象。因此,文中通过量化历史合作次数形成定量分级,具体公式为^[21]

$$K_{ij}(t) = 100 \times \sum_{k=0}^{K_i} K_{ij} / K_i \quad (10)$$

式(10)中: $K_{ij}(t)$ 为第 t 交易时段内用户 i 、 j 的合作基础分值; K_i 为用户 i 历史交易总数; K_{ij} 为用户 i 在前 K_i 次交易中,与用户 j 的交易次数。

2.1.4 最大可供电能

对于售电方而言,可提供的电能越多,其在交易市场中电能供应能力越强,越能吸引更多的购电用户。因此,最大可供电能是衡量其市场竞争优势的重要指标,具体公式为

$$S_j(t) = \max[G_j(t) - B_j(t)] \quad (11)$$

式(11)中: $S_j(t)$ 为用户 j 在第 t 交易时段内所能提供的最大电能; $G_j(t)$ 为用户 j 在第 t 交易时段内生产电能; $B_j(t)$ 为用户 j 在第 t 交易时段内自身需求电能。

2.2 用户合作偏好

对于售电方而言,初始价格、历史合作基础及最大可供电能影响其在交易市场中的竞争地位,因此,智能合约将根据售电用户的初始价格、历史合作基础及最大可供电能综合计算购电方与其合作偏好值,具体公式为

$$P_{ij}^{\text{score}} = \alpha_i \lambda_j(t) + \beta_i K_{ij} + \gamma_i \left(\frac{S^{\min} + S^{\max} - S_j}{S^{\max}} \right) \quad (12)$$

式(12)中: P_{ij}^{score} 为购电方 i 对售电方 j 的合作偏好分值; $\lambda_j(t)$ 为售电方 j 初始价格; $S^{\min}$ 、 $S^{\max}$ 、 S_j 分别为交易市场中售电方的最小供电量、最大供电量及售电用户 j 的最大可供电量; α_i 、 β_i 、 γ_i 为购电方 i 预置的权重系数,且 $\alpha_i + \beta_i + \gamma_i = 1$ 。需要说明的是,每个用户可以自行设定权重值,以满足自身交易需求^[22]。

对于购电方而言,参与市场交易的初始价格及信誉值影响着售电用户与其进行交易的意愿,因此,智能合约将根据购电用户的初始价格和信誉值综合计算售电方与其合作偏好值,具体公式为

$$P_{ji}^{\text{score}} = \varphi_j \lambda_i(t) + \phi_j \left(\frac{C^{\min} + C^{\max} - C_i}{C^{\max}} \right) \quad (13)$$

式(13)中: P_{ji}^{score} 为售电方 j 对购电方 i 的合作偏好分值; $\lambda_i(t)$ 为购电方 i 初始报价; $C^{\min}$ 、 $C^{\max}$ 、 C_i 分别为交易市场中购电用户最小信誉值、最大信誉

值及购电方 i 的信誉值; φ_j 、 ϕ_j 为售电方 j 预置的权重系数,且 $\varphi_j + \phi_j = 1$ 。同样,每个用户根据自身需求自行预设权重值。

智能合约将根据合作偏好值,按照从高到低形成排序结果,排序靠前的用户在匹配过程中拥有更高的优先级,具体的匹配机制将在第3节详细介绍。

3 基于 Gale-Shapley 算法的双边匹配机制

所有参与主体在分布式交易市场内都具有接受或拒绝合作的权力,而在其追求自身利益最佳的情况下,往往存在用户拒绝匹配结果而另选合作对象的问题,并造成严重的市场违约现象。为此,需要设计合理的匹配机制,以保障匹配结果的稳定性,降低用户违约行为。

3.1 Gale-Shapley 算法

多微网分布式电能交易匹配是典型的“多对多”匹配问题,即多个购电用户同时匹配多个售电用户。Gale-Shapley 算法有3个良好的求解优势:①Gale-Shapley 算法可以实现帕累托最优匹配,即不存在其他匹配结果能使得部分或全部参与者利益提高,同时又不损害其他任何一个参与者利益^[23]。②Gale-Shapley 算法是防策略性的,即任意用户隐瞒其真实偏好排序,都无法提高自身利益^[24]。③Gale-Shapley 算法的匹配结果是稳定的,即任意用户拒绝匹配结果而另选其他合作都无法提高自身利益^[25]。因此,文中引入 Gale-Shapley 算法,以快速求出多个微电网之间稳定匹配关系。

3.2 匹配步骤

为了激励用户积极参与分布式电能交易市场,文中综合考虑价格、信誉值、历史合作基础、最大可供电量等因素,形成完整的用户偏好序列,并利用 Gale-Shapley 算法求解最优匹配策略。具体双边匹配过程详述如下。

第1轮,所有购电方 i 向偏好最靠前的售电方 j 递交合作意愿申请,各售电方 j 根据自身的偏好排序选择暂时接受排序靠前的用户,并拒绝排序靠后的用户。假定用户 i_n 与用户 j_n 暂时匹配成功, $k+1$ 。

第2轮,未匹配成功的购电方 i 继续根据偏好列表向售电方 j 递交合作意愿申请,假设用户 i_m 在用户 j_n 的偏好列表更靠前,则此时用户 i_m 与用户 j_n 暂时匹配成功,用户 i_n 恢复待匹配状态, $k+1$ 。

第 k 轮, $k \geq 2$, 第 $(k-1)$ 轮中被拒绝的购电用户 i 向下一个偏好的售电用户 j 递交合作申请,直到所有的参与用户均已按合作偏好排序依次全部

发出申请,匹配结束。此时,各参与主体的匹配结果即为最终的双边匹配结果。未匹配成功的用户退出本轮交易,等待下一轮交易。

4 基于深度优先搜索算法的阻塞管理机制

对于已匹配成功的微电网主体,若所有分布式电能交易均选择最优路径同时传输,可能会导致传输线路拥堵。因此,有必要构建一个合理的阻塞管理机制,以解决电能传输中线路阻塞问题。因此,文中引入深度优先搜索算法,并利用能源路由器构建一种阻塞管理的理论模型。

首先利用有向图 $G=(V,E)$ 来表示多微网间分布式网络拓扑结构。在有向图 G 中,有限非空节点集 $V=\{1,\dots,N\}$ 代表各微电网主体,边集 E 代表微电网间的电能传输线路。定义拓扑邻接矩阵 A , 邻接矩阵 A 的元素 a_{ij} 代表着节点 i 与节点 j 的连接关系,并规定若节点 i 与节点 j 相连接,则 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ ^[26]。

根据已构建的有向图结构,各微电网间存在着一条或多条能量传输路径,那么当两节点间最优线路出现阻塞时,依然可以通过能源路由器选择其他冗余线路进行电能传输,以保证交易的顺利完成。因此,在确定网络拓扑模型基础上,进一步寻找节点间传输路径对解决路径冲突问题至关重要。为此,文中引入 DFS 算法,用于查找任意两节点之间所有可能的传输路径。其具体思路如下^[27]:

1)以某一微网节点作为父节点,根据邻接矩阵 A , 从其第一个子节点出发,若有相邻边未被搜索到,则沿该路径进行深度搜索。

2)当该子节点搜索完毕,回溯到父节点,继续访问其余子节点,直到所有子节点均被访问,即可得到两节点间的所有连接路径。

当某条线路出现阻塞时,若该线路的最大订单未超出线路容量,则根据式对线路其余小额订单进行削减,以凸显大额订单的交易优势,激励大额订单用户参与分布式市场交易;否则,根据式对该线路所有订单进行削减^[28]。被削减的订单电量将通过能源路由器选择次优传输路径进行电能输送。

$$\begin{cases} \Delta P_{i,j-l(m,n)} = \frac{P_{l(m,n)}^{\max} - \max P_{l(m,n)}}{\sum_{l(m,n)} P - \max P_{l(m,n)}} \times P_{i,j-l(m,n)} \\ 0 \leq \max P_{l(m,n)} \leq P_{l(m,n)}^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{i,j-l(m,n)} = \frac{P_{l(m,n)}^{\max}}{\sum_{l(m,n)} P} \times P_{i,j-l(m,n)} \\ P_{l(m,n)}^{\max} \leq \max P_{l(m,n)} \end{cases} \quad (15)$$

式(14)、(15)中: $\Delta P_{i,j-l(m,n)}$ 为交易主体 i 、 j 在线路 $l(m,n)$ 的订单削减量; m 、 n 为节点编号; $P_{l(m,n)}^{\max}$ 为线路 $l(m,n)$ 容量上限; $\max P_{l(m,n)}$ 为线路 $l(m,n)$ 最大订单量; $P_{i,j-l(m,n)}$ 为交易主体 i 、 j 在线路 $l(m,n)$ 的订单传输量; $\sum_{l(m,n)} P$ 为线路 $l(m,n)$ 总传输量。

5 算例分析

为了验证所提分布式电能交易策略可行性,文中在 Windows10 64 bit 操作系统中,通过 MATLAB 平台和以太坊交易平台进行仿真验证。为满足两节点间存在多条传输线路的需求,算例基于具有“环型”特征的 IEEE 14 节点系统,设计了6个购电方(B_1 - B_6)、6个售电方(S_1 - S_6)和配电网运营商 DSO,节点详细部署情况见图2。其中,改进的 IEEE 14 节点配电网系统中各支路容量裕度为 130 kW,各微网主体均配备能源路由器,由能源路由器对电能进行定量定向传输处理,其初始申报信息见表1、2,该时段内配电网上网电价 0.4 元/(kWh),购电电价 1.35 元/(kWh)。

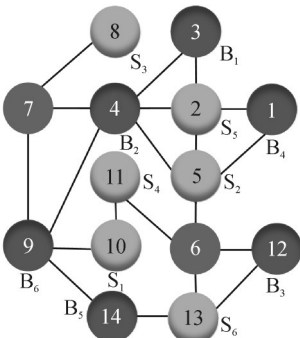


图2 IEEE 14节点架构图
Fig. 2 Structure diagram IEEE 14-node system

表1 购电主体初始申报信息

Table 1 Initial declaration information of each power purchase entity				
购电主体	所在节点	初始价格/ [元·(kWh) ⁻¹]	申报电量/ kWh	信誉值
B ₁	3	1.164	85	95
B ₂	4	1.085	88	92
B ₃	12	1.193	75	99
B ₄	1	1.059	91	90
B ₅	14	1.117	72	96
B ₆	9	1.179	68	98

需要说明的是,本算例通过 MATLAB 平台对所提出的基于用户偏好的双边匹配及阻塞管理策略进行仿真计算,通过以太坊客户端 Ganache 新建一条私有链,并将 MATLAB 计算结果以常数形式部署于

表2 售电主体初始申报信息
Table 2 Initial declaration information of each electricity sales entity

售电主体	所在节点	初始价格/ [元·(kWh) ⁻¹]	申报电量/kWh
S ₁	10	0.911	99
S ₂	5	0.988	83
S ₃	8	0.927	82
S ₄	11	0.793	103
S ₅	2	0.853	90
S ₆	13	0.788	108

该私有链的智能合约中,然后配合 Metamask 钱包记录交易结果。此外,本算例假定以太币与人民币换算关系为 1 ether=1 元,且以太币仅用于记录智能合约执行结果,不具有市场价值,实际资金结算方式仍采用人民币。

5.1 分布式电能交易结果分析

当所有参与主体通过区块链平台申报交易信息后,由智能合约根据预置权重自动进行偏好计算和用户匹配,并根据实际情况进行电能交割,最终的电能交易情况见图3,其中 B_1S_5 代表微网主体 B_1 从微网主体 S_5 处购买电能, S_1G 代表微网主体 S_1 向配电网出售电能,其余以此类推。此外,1 部分代表购电用户的第二笔交易,2 部分代表该订单因线路阻塞被削减的电量。

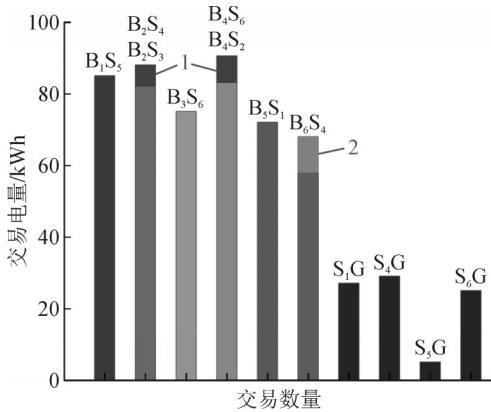


图3 分布式电能交易结果
Fig. 3 Distributed energy trading results

根据图3信息可知,本时段内交易市场表现为“供大于求”,所有购电方均通过分布式交易市场满足了自身需求,而售电方则将未售完的电能通过配电网进行出清。具体而言,购电方 B_2 分别从售电方 S_3 购买 82 kWh、售电方 S_4 购买 6 kWh,购电方 B_4 分别从售电方 S_2 购买 83 kWh、售电方 S_6 购买 8 kWh,其余购电方通过一笔交易即可满足需求。这是因为购电方 B_2 、 B_4 信誉值偏低,导致二者在售电方合作偏好排序中处于劣势地位,售电方 S_3 、 S_2 可提供电能少,

导致二者亦处于劣势地位,最终形成了 B_2 和 S_3 、 B_4 和 S_2 的匹配结果,而购电方 B_2 、 B_4 未满足的电能只能从售电方 S_4 、售电方 S_6 再次购买。其次,购电方 B_6 从售电方 S_4 购买的68 kWh电能,因线路阻塞被削减10 kWh,被削减的部分通过其他路径继续传输,具体细节会在5.4节进行介绍。

此外,文中设置所有用户的账户初始金额为100,购电用户的资金结算见表3。分析表3可知,购电方 B_1 与售电方 S_5 以1.008 5元/kWh的电能交易电价达成85 kWh的电能交易订单,其消耗85.722 5元的购电收入,账户余额14.277 5元。DSO以上网电价收购售电方 S_1 、 S_4 、 S_5 、 S_6 总盈余电能86 kWh,最终DSO账户结余65.6元。此处智能合约记录的资金结算结果,确认了智能合约的有效执行。

表3 购电用户的交易结果

Table 3 Transaction results of electricity buyers

购电用户	交易地址	交易对象	交易电量/ kWh	交易电价/[元· (kWh) ⁻¹]	账户余额/元
B_1	0X879C...	S_5	85	1.008 5	14.277 5
B_2	0XD4E6...	S_4	6	0.939 0	11.874 0
B_3	0X98CF3...	S_3	82	1.006 0	25.712 5
B_4	0XB5C9...	S_6	8	0.923 5	7.661 5
B_5	0XEE87...	S_2	83	1.023 5	26.416 0
B_6	0XC515...	S_1	72	1.022 0	32.952 0
DSO	0XEDD8...	S_1 、 S_4 、 S_5 、 S_6	86	0.400 0	65.600 0

因此,文中所提的分布式电能交易模型能够综合考虑参与主体的偏好意愿,并促进用户积极履约维护信用,同时,考虑了线路阻塞的订单交割情况,以保证配电网的安全运行。

5.2 基于合作偏好的交易调序机制分析

为了满足用户多样化的选择意愿,文中设计了基于用户合作偏好的交易调序机制,购电用户对售电用户的合作偏好排序图见图4,图顶端数字代表偏好分值,如购电用户 B_5 对售电用户 S_1 的合作分值为68,其余以此类推。售电用户合作偏好排序图见图5。根据图中信息可知,对于购电方而言,售电方 S_6 、 S_4 因价格合理且可提供电能多,其在各购电用户的偏好排序始终靠前;售电方 S_1 虽价格略占劣势,但根据表4可知,售电方 S_1 与购电方 B_6 的历史合作次数多,因此其在购电方 B_6 的偏好排序相对靠前;售电方 S_2 、 S_3 由于可提供电能少且历史交易不频繁,其在各购电用户的偏好排序均靠后。对于售电方而言,购电方 B_2 、 B_4 虽报价合理,但其信誉值较低,导致

二者的偏好优先级比较靠后,而购电方 B_3 、 B_6 报价合理且信用记录良好,使得二者在售电方合作偏好排序中始终占优。

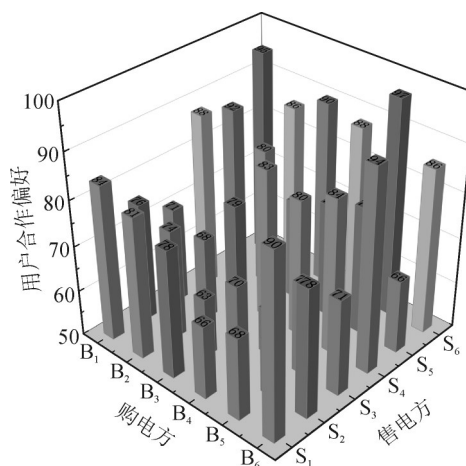


图4 购电用户合作偏好排序图

Fig. 4 Diagram of cooperation preference ranking among electricity buyers

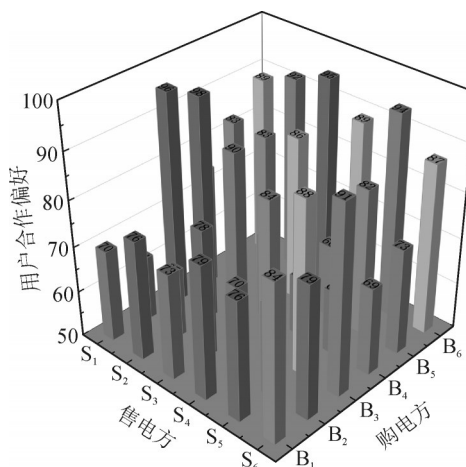


图5 售电用户合作偏好排序图

Fig. 5 Diagram of cooperation preference ranking among electricity sellers

综上所述,文中所提的基于用户合作偏好的交易调序机制,通过更全面地反映参与主体选择意愿,有效地保障了优质用户的市场优势,一定程度上降低了交易违约风险,激励了用户理性报价与积极履约,进而促进分布式电能交易市场的良性健康发展。

5.3 基于 Gale-Shapley 算法的匹配结果分析

基于 Gale-Shapley 算法的交易主体双边匹配过程见图6,其中第10轮为最终的匹配结果。根据图6信息可知,由购电方依据各自偏好排序依次向靠前的售电方递交合作申请,而各售电方则根据自身偏好选择暂时匹配或直接拒绝,对于暂时匹配的用户双方,当有更偏好的用户发出邀请时,原匹配对解散,更偏好的双方进入暂时匹配状态。例如,在第

表4 各微网主体间历史合作次数
Table 4 The number of historical cooperation between each microgrid entity

购电主体	售电主体	历史合作次数	购电主体	售电主体	历史合作次数
B ₁	S ₁	14	B ₄	S ₁	7
	S ₂	5		S ₂	6
	S ₃	2		S ₃	2
	S ₄	9		S ₄	10
	S ₅	8		S ₅	9
	S ₆	12		S ₆	10
B ₂	S ₁	10	B ₅	S ₁	10
	S ₂	4		S ₂	6
	S ₃	6		S ₃	4
	S ₄	13		S ₄	11
	S ₅	9		S ₅	7
	S ₆	11		S ₆	11
B ₃	S ₁	9	B ₆	S ₁	18
	S ₂	5		S ₂	4
	S ₃	3		S ₃	5
	S ₄	11		S ₄	12
	S ₅	8		S ₅	2
	S ₆	10		S ₆	8

1 轮匹配过程中,购电方 B₁向售电方 S₆提交合作申请并被暂时接受,但当购电方 B₃在第2轮向 S₆提交合作申请时,由于 B₃在售电方 S₆的用户合作偏好比 B₁更靠前,导致原 B₁与 S₆的匹配关系解散,B₃与 S₆成为新的暂时匹配对,B₁重新回归待匹配状态,直到最

终匹配成功。
此外,根据第10轮匹配结果可知,最终稳定匹配状态为(B₁,S₅)、(B₂,S₃)、(B₃,S₆)、(B₄,S₂)、(B₅,S₁)、(B₆,S₄)。显然,售电方 S₃、S₂不能一次满足购电方 B₂、B₄的用能需求,二者未购满的电能继续根据偏好列表再次匹配,具体过程不再详细展示,最终购电方 B₂、B₄缺额电能分别由售电方 S₄、S₆出售。

为了进一步分析合作偏好的改变对匹配结果的影响,用户 B₅、B₆隐瞒真实合作偏好后的匹配结果见表5。根据表5信息可知,用户 B₅、B₆隐瞒自身偏好后,用户 B₁-B₄匹配到自身偏好更加靠前的售电用户,而 B₅、B₆的匹配结果反而更差。因此,文中所提出的基于 Gale-Shapley 算法的匹配机制,能够尝试所有可能的匹配组合,并最终收敛于所有用户都满意的匹配解,从而保障了匹配机制的公平性和稳定性,有效缓解了用户单方面违约的问题。

5.4 阻塞管理机制分析

未考虑阻塞管理的电能交易情况见图7,显然,售电方 S₁向购电方 B₅传输 72 kW,售电方 S₄向购电方 B₆传输 68 kW,两笔交易在线路 l(10,9) 的总传输量为 140 kW,已超出线路可承载的最大容量。若直接削减订单,被削减的用户需要从电网购电或与微网主体重新匹配,由此导致的多次交易亦会损害用户参与分布式电能市场的积极性。

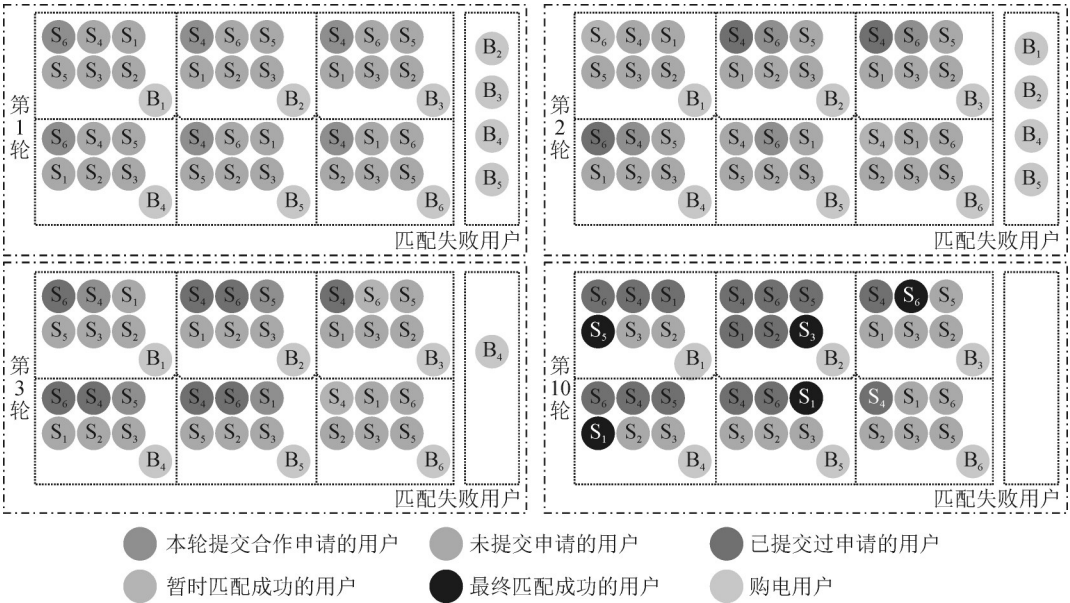


图6 基于 Gale-Shapley 算法的匹配过程图

Fig. 6 Matching process diagram based on Gale-Shapley algorithm

表5 隐瞒偏好对匹配结果的影响

Table 5 The impact of concealing preferences on matching results

用户	合作偏好排序	匹配结果
B ₁	S ₆ >S ₄ >S ₁ >S ₃ >S ₂ (真实)	S ₅
	S ₆ >S ₄ >S ₁ >S ₃ >S ₂ (真实)	S ₆
B ₂	S ₄ >S ₆ >S ₃ >S ₁ >S ₂ >S ₅ (真实)	S ₃
	S ₄ >S ₆ >S ₃ >S ₁ >S ₂ >S ₅ (真实)	S ₅
B ₃	S ₄ >S ₆ >S ₃ >S ₁ >S ₂ (真实)	S ₆
	S ₄ >S ₆ >S ₃ >S ₁ >S ₂ (真实)	S ₄
B ₄	S ₆ >S ₄ >S ₃ >S ₁ >S ₂ >S ₅ (真实)	S ₂
	S ₆ >S ₄ >S ₃ >S ₁ >S ₂ >S ₅ (真实)	S ₁
B ₅	S ₄ >S ₆ >S ₁ >S ₃ >S ₂ (真实)	S ₁
	S ₄ >S ₂ >S ₆ >S ₁ >S ₃ >S ₅ (隐瞒)	S ₂
B ₆	S ₄ >S ₁ >S ₆ >S ₂ >S ₃ >S ₅ (真实)	S ₄
	S ₃ >S ₄ >S ₆ >S ₃ >S ₁ >S ₂ (隐瞒)	S ₃

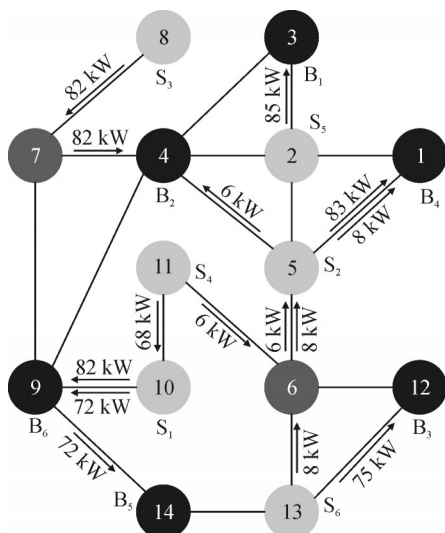


图7 未考虑阻塞管理的交易路径图

Fig. 7 Transaction path graph without congestion management

针对上述情况,文中提出了基于DFS算法的阻塞管理机制。根据DFS算法搜索可得出, S_1 与 B_5 共有33条传输路径, S_4 与 B_6 共有13条传输路径,算法搜索共用时0.026 s。而在文中所提策略下, S_1 与 B_5 之间的72 kW未超出线路容量,因此选择通过能源路由器,对 S_4 与 B_6 的68 kW进行削减,以彰显大额订单的市场优势。考虑线路容量的电能传输情况见图8, S_1 与 B_5 之间的72 kW依然通过 $l(10,9,14)$ 输送, S_4 与 B_6 之间的68 kW分两部分输送: $l(11,10,9)$ 传输58 kW, $l(11,6,5,4,9)$ 传输剩余的10 kW。

综上所述,文中所提的阻塞管理机制,既可以保障配电网的线路安全,又可以实现订单的一次结清,同时凸显大额订单的市场优势,以提升用户积极参与分布式电能交易的积极性。

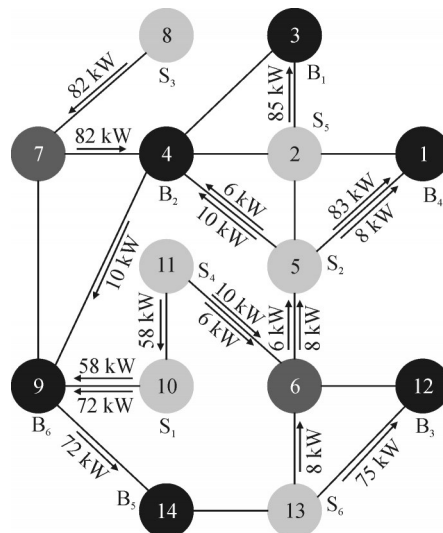


图8 考虑阻塞管理的交易路径图

Fig. 8 Transaction path graph considering congestion management

6 结论

针对传统集中交易模式存在交易效率低、维护成本高等弊端,并考虑到偏好指标不完善、匹配算法不稳定所造成的用户违约,以及订单交割时线路阻塞等问题,文中提出了基于区块链技术的多微网分布式电能交易模型,并设计基于用户合作偏好的交易对象匹配策略,和能源路由器参与的阻塞管理机制,最后通过仿真平台进行实验验证,所得主要结论如下:

1)文中设计的用户偏好指标能够更全面反映用户的选择意愿并筛选出优质用户,进而能够激励用户积极参与市场并履行合约以获得更高的优先权。

2)文中设计的基于Gale-Shapley算法的双边匹配机制能够尝试所有可能的匹配组合,并最终收敛于所有用户都满意的匹配解,有效解决用户拒绝匹配结果并另选合作对象的违约问题。

3)文中基于能源路由器和DFS算法构建的阻塞管理理论模型,能够有效解决线路阻塞并实现交易订单的一次结清,同时凸显大额订单的市场优势,进而提升用户参与市场交易的积极性。

在未来工作中将继续关注能源互联网和能源路由器的发展,继续探索解决用户违约和线路阻塞的交易机制,并搭建智能合约形成分布式电能交易模型。

参考文献:

- [1] 裴林,黄成,杨啸,等.考虑隐私保护和去中心化的分布式能源交易模式研究[J].电力系统保护与控制,

- 2024, 52(2): 143-154.
- PEI Lin, HUANG Cheng, YANG Xiao, et al. A distributed energy trading model considering privacy protection and decentralization[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 143-154.
- [2] 白杨, 谢乐, 夏清, 等. 中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 1-7.
- BAI Yang, XIE Le, XIA Qing, et al. Institutional design of Chinese retail electricity market reform and related suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 1-7.
- [3] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
- LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [4] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
- XIAO Shijie. Consideration of technology for constructing Chinese smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.
- [5] 张力菠, 童立敏, 周德群, 等. 基于区块链的园区能源互联网弱中心化电力交易机制[J]. 广东电力, 2021, 34(2): 1-9.
- ZHANG Libo, TONG Limin, ZHOU Dequn, et al. Less-centralized electricity transaction mechanism of park energy internet based on blockchain[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(2): 1-9.
- [6] 吉斌, 莫峻, 王佳瑶. 基于区块链技术的弱中心化电力互济交易通信可靠性研究[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 85-92.
- JI Bin, MO Jun, WANG Jiayao. Study on communication reliability of weakly centralized electricity mutual transaction based on blockchain technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 85-92.
- [7] 陈涛, 刘洋, 李文峰, 等. 基于区块链技术的微网自适应定价策略及经济调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 17-28.
- CHEN Tao, LIU Yang, LI Wenfeng, et al. Adaptive microgrid price-making strategy and economic dispatching method based on blockchain technology[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(6): 17-28.
- [8] 李廷. 基于区块链的多微网系统去中心化交易研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- LI Ting. Blockchain technology based decentralized energy trading for multiply-microgrid systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [9] 逮遥, 毛知新, 邱志斌. 区块链技术在能源物联网领域的发展与应用综述[J]. 广东电力, 2021, 34(7): 1-12.
- LU Yao, MAO Zhixin, QIU Zhibin. Review of development and applications of blockchain technology in the field of energy internet of things[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(7): 1-12.
- [10] 王健, 周念成, 王强钢, 等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5072-5084.
- WANG Jian, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Electricity direct transaction mode and strategy in microgrid based on blockchain and continuous double auction mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5072-5084.
- [11] 祝垒, 陈中, 颜云松, 等. 基于权威证明的微电网分层交易策略[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4356-4365.
- ZHU Lei, CHEN Zhong, YAN Yunsong, et al. Hierarchical transaction strategy of microgrid based on proof of authority[J]. Power System Technology, 2021, 45(11): 4356-4365.
- [12] QIU Weiqiang, ZHOU Tian, YU Shuyang, et al. Decentralized trading mechanism of shared energy storage in a residential community considering preference of trading subjects[J]. Energy Reports, 2022(8): 474-484.
- [13] 唐家俊, 吴晓刚, 张思, 等. 基于Gale-Shapley算法的虚拟电厂与分布式资源匹配机制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 65-73.
- TANG Jiajun, WU Xiaogang, ZHANG Si, et al. Matching mechanism for virtual power plants and distributed energy resources based on Gale-Shapley algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 65-73.
- [14] 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): 2237-2245.
- MA Teng, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Energy decentralized transaction model of multi-microgrid in distribution side based on blockchain[J]. Power System Technology, 2021, 45(6): 2237-2245.
- [15] 吴治国, 刘继春, 张帅, 等. 多售电主体点对点交易模式及其动态过网费机制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 100-108.
- WU Zhiguo, LIU Jichun, ZHANG Shuai, et al. Peer-to-peer transaction model of multiple power sellers and its dynamic network fee mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 100-108.
- [16] ZHANG Huaguang, LI Yushuai, GAO DW, et al. Distributed optimal energy management for energy internet[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3081-3097.
- [17] JIANG Xingyue, SUN Chuan, CAO Lingling, et al. Peer-to-peer energy trading with energy path conflict management in energy local area network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 2269-2278.
- [18] 何鑫雨, 董萍, 刘明波, 等. 基于双层演化博弈模型的

- 多区域点对点能源共享机制[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 163-174.
- HE Xinyu, DONG Ping, LIU Mingbo, et al. Multi-region P2P energy sharing mechanism based on two-stage evolutionary game model[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 163-174.
- [19] 王毅, 赵辉辉, 侯兴哲, 等. 基于链码和多阶段混合拍卖机制的微电网分布式电能交易模型[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1302-1309.
- WANG Yi, ZHAO Huihui, HOU Xingzhe, et al. Distributed electricity transaction mode in microgrid based on chaincode and multi-stage hybrid auction mechanism[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1302-1309.
- [20] 李振伟, 刘洋, 许立雄, 等. 计及信誉值和电气距离的分布式电能交易区块链模型[J]. 电力建设, 2023, 44(2): 132-144.
- LI Zhenwei, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Distributed energy transaction blockchain model considering reputation value and electrical distance[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(2): 132-144.
- [21] 曹清山. 售电市场放开环境下基于多属性决策的电力客户经济性评估和选择研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- CAO Qingshan. Multi-attribute decision making model for customer economic evaluation and selection in opening electricity market[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [22] WANG Ting, DU Zhen'an, ZHANG Kanjun, et al. Reliability evaluation of high voltage direct current transmission protection system based on interval analytic hierarchy process and interval entropy method mixed weighting[J]. Energy Reports, 2021(7): 90-99.
- [23] DUBINS L E, FREEDMAN D A. Machiavelli and the Gale-Shapley algorithm[J]. The American Mathematical Monthly, 1981, 88(7): 485-494.
- [24] BALINSKI M, SÖNMEZ T. A tale of two mechanisms: Student placement[J]. Journal of Economic Theory, 1999, 84(1): 73-94.
- [25] ABDULKADIROGLU A, SONMEZ T. School choice: A mechanism design approach[J]. American Economic Review, 2003, 93(3): 729-747.
- [26] 赵鹏杰, 吴俊勇, 林凯骏, 等. 基于一致性算法的多微电网点对点分布式能量交易策略[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 205-216.
- ZHAO Pengjie, WU Junyong, LIN Kaijun, et al. Peer to peer distributed transactive energy strategy for multi-microgrid based on consistency algorithm[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 205-216.
- [27] 徐岩, 张荟, 马天祥, 等. 含分布式电源的配电网故障紧急恢复与抢修协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 38-46.
- XU Yan, ZHANG Hui, MA Tianxiang, et al. Coordinated optimization strategy of fault emergency recovery and repair for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 38-46.
- [28] 张永平, 焦连伟, 陈寿孙, 等. 电力市场阻塞管理综述[J]. 电网技术, 2003, 27(8): 1-9.
- ZHANG Yongping, JIAO Lianwei, CHEN Shousun, et al. A survey of transmission congestion management in electricity markets[J]. Power System Technology, 2003, 27(8): 1-9.
- 胡开鑫(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式电能交易、能源区块链的应用(E-mail: ikaixin0214@stu.scu.edu.cn)。
- 刘洋(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统高性能计算及算法优化、能源区块链应用、综合能源系统规划运行(通信作者)(E-mail: yang.liu@scu.edu.cn)。
- 李振伟(1997—), 男, 硕士, 主要研究方向为分布式电能交易、能源区块链应用。
- 伍宇铜(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为用户侧储能优化运行。
- 李金鸿(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统规划运行。