

基于区块链的园区级多边用电权交易机制及实现方法

黄家晖^{1,2}, 李超³, 黄微³, 赵文恺², 韩冬³

(1. 复旦大学 信息科学与工程学院, 上海 200438; 2. 国网上海市电力公司浦东供电公司, 上海 200122;
3. 上海理工大学 电气工程系, 上海 200093)

摘要: 负荷密集的商业园区、工业产业园区通常以合同形式对入驻企业进行电力资源分配, 但是该方法存在配置效率低、资源利用不充分等问题。为此, 提出了一种基于区块链的园区级多边用电权交易机制。包含双向拍卖规则和端对端交易的用电权益交易模型充分调动了园区的闲置电力容量, 通过市场化手段优化用电权配置, 避免了园区外线扩容改造的同时解决了企业临时增容需求问题。在此基础上, 基于以太坊私有链的用电权交易机制确保了多边交易过程的公开透明, 采用智能合约函数自动执行交易, 提高了撮合效率的同时减少了交易成本。通过仿真算例验证了所提交易机制及区块链交易平台的有效性。

关键词: 用电权交易; 区块链; 智能合约; 双向拍卖; 端对端

中图分类号: TM 761

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202112003

0 引言

电力市场的改革和通信技术的进步促进了电力行业数字化、智能化的发展趋势, 同时也对供电可靠性和电能质量提出了更高的要求^[1]。然而, 众多工业园区、经济开发区以及负荷密集的商业园区, 大多通过合同形式计划分配园区入驻企业的基本用电容量, 存在电力资源利用不充分、配置效率低等问题。一方面, 前期入驻园区的企业可获得较为充裕的用电容量, 而后期入驻的企业往往因园区电力资源总量的限制, 承担着分配所得容量低于其高峰时段用电需求的风险, 按合同签订配置容量的传统方法导致了园区内部分企业的电力资源闲置, 而部分企业用电需求急迫却无法得到及时增容的问题。另一方面, 传统电力市场的集中式交易存在手续繁杂、中介费用高和第三方公信力低等问题, 也无法完全保证交易过程的公开透明和可溯源。因此, 如何利用有限的电力资源实现园区总体效益最大化, 已成为亟待解决的问题之一。

产业园区作为新一轮电力体制改革的重要试点, 在传统集中式供电的基础上, 引入分布式新能源并完善相应的需求响应机制, 是其建立可靠供电模式的发展趋势之一。逐步放开的配售电价机制有助于需求响应的实施, 提高了负荷侧运行的灵活度, 为电源侧进一步优化提供了空间^[2]。文献[3]提出了一种园区级日前优化调度模型, 通过协调内部综合能源需求侧资源, 实现了电能供需就近平衡; 文献

[4]考虑电网可能存在的供电缺失问题, 提出了多园区有限电量优化调度策略, 通过多园区能量管理系统提高电能利用效率。上述研究充分利用了园区有限的容量资源, 但是对综合能源的设备配置有较高的要求, 设备装机周期和土地配置成本也在一定程度上阻碍了该模式的推广应用。以光伏为主的分布式电源作为传统电力方案的补充接入^[5], 可以优化园区的容量配置, 缓解园区面临的增容改造等问题, 但分布式新能源所具有的间歇性、随机性也给园区电能质量管控带来了挑战。对于避免涉及重资产改造的园区而言, 引入市场化的用电权 PUQ (Power Usage Quota) 交易在普适性和推广度等方面具有更大的优势。

目前, 国内外对区块链技术在电力能源交易领域的研究仍处于起步阶段^[6]。文献[7]提出了一种基于区块链的微电网电力交易匹配方法, 促进了配电网中新能源的实时利用; 文献[8]针对虚拟电厂控制中心与分布式单元之间的信任问题, 建立了区块链技术下半中心化的虚拟电厂鲁棒优化调度模型; 文献[9]将区块链技术引入面向居民用户的电力需求响应交易机制, 基于以太坊 Rinkeby 网络实现了所提交易机制的支持系统。国外已有若干基于区块链的能源市场交易试点应用: 文献[10]介绍了美国纽约基于区块链的端对端 P2P (Peer-to-Peer) 电能交易市场试点项目; 文献[11]介绍了荷兰的分布式能源就近消纳项目, 通过区块链技术推动了分布式光伏系统优先满足附近电动汽车的充电需求。

上述文献研究了区块链技术在能源系统领域具体场景下的应用案例。但是, 针对产业园区中电力资源配置效率低、使用不充分以及企业用户用能成本高、部分时段容量需求大等问题, 区块链技术的应用潜力尚未被深入发掘。本文聚焦于园区企业用户

收稿日期: 2021-06-11; 修回日期: 2021-10-14

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目 (52092120001M)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company (52092120001M)

对已有用电容量在不同时段的交易需求,提出了一种基于区块链技术——以太坊智能合约的多边用电权交易机制,有效解决了园区企业用户对某一时段用电资源的竞争问题,节约了园区增容涉及的土建、定额、多回路容量费等改造费用,降低了用户自身的用能成本;同时该交易机制在一定程度上起到了削峰填谷的作用,提高了园区整体的经济效益。然而,因企业用户间存在用电竞争关系而具有信任问题,传统集中式交易规则一方面占用了园区大量的计算资源,另一方面较难实现对用电权透明安全可信的转移^[12]。区块链技术具有去中心化、系统自治性、透明性、可溯源等特点^[13],以太坊平台作为目前广泛使用的区块链开发平台之一,其应用保证了交易过程的高效透明,其智能合约一旦满足设定条件即可自动执行,直接生成合约订单并被记录在区块链上,不需要经过第三方机构的审核和监管,安全高效地完成了用户之间用电权的转移。

本文首先设计了基于双向拍卖机制和P2P交易的用电容量交易机制,并引入偏差考核和超容罚款,以规范企业用户的市场行为;然后,在以太坊私有链上设计了可执行的多边用电权交易智能合约,进一步提高了交易平台的安全可靠性;最后,通过仿真算例验证了交易机制的合理性和区块链平台的有效性。

1 多边用电权交易机制与模式

针对园区与入驻企业签订合同方式存在的电力资源配置效率低、利用不充分等问题,本文设计了一种园区级企业用户之间的用电权交易机制,通过市场调节的手段优化园区整体的电力资源配置。用电权交易体系框架如图1所示。

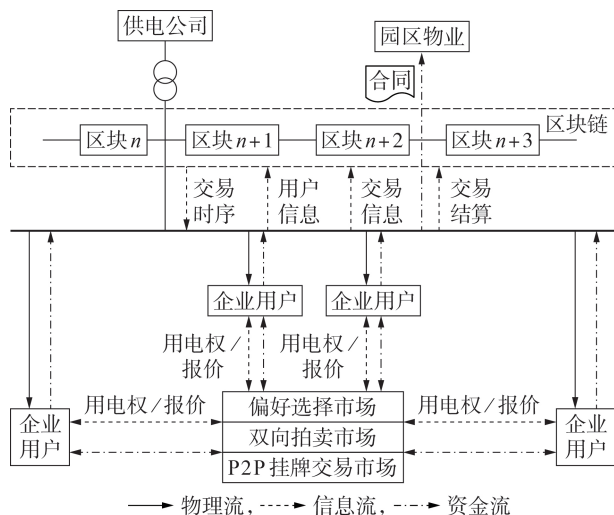


图1 用电权交易体系框架

Fig.1 Framework of PUQ trading system

供电公司按照规划方案为园区提供初始用电容

量,并收取月度电费。企业用户作为独立的用电主体,与园区物业之间签署合同,确定企业用户所持有的合同容量。企业用户可根据自身用电需求或实际生产需要,在交易市场作为买方/卖方向其他企业用户购买/出售一定时间内所持有的用电容量权益。整个交易过程在区块链平台上完成。

按照时间尺度可将用电权的交割时段划分为短期、中期、长期3个时段,分别表示交易企业用户未来所持有的1天、1周、1个月的用电权,见附录A图A1。开展交易前,园区需组织企业用户约定交易时间与交割时段,企业用户根据实际的用电需求,选择不同的交割时段进行用电权交易。

以短期交割时段(未来1天的用电权)的交易过程为例,说明企业用户参与交易的具体流程,被分为以下3个阶段。

1)阶段1为初始化阶段。企业用户注册时需要向平台提供企业名称、企业类型、其合同确定的基本用电容量及期望用电容量等信息。然后,构建相应的信用体系以确保用户的交易完成度和交易过程中的安全可靠性。注册时平台对企业用户设置相同的信用分数,在交易结束后根据企业用户的交易行为对其进行奖惩考核:对于积极参与、行为合规的企业用户而言,适当奖励其信用分;对于恶意竞争、扰乱市场的企业用户而言,按不同程度扣减相应的信用分。每次交易开始前企业用户需向平台提交保证金,以确保用户之间支付结算的顺利进行。

2)阶段2为市场交易阶段。以当天13:00—14:00交易时段为例,交易过程可分为用户偏好选择、密封报价、双向拍卖撮合、P2P挂牌交易、交易结算5个步骤,如图2所示。在用户偏好选择步骤,企业用户与事先达成约定的企业用户优先开展用电权交易;在密封报价步骤,企业用户向平台密封申报交割时段内所需交易的用电权数量及期望价格,其报量与报价信息不对其他企业用户公开^[14];市场交易平台采用基于双向拍卖的定价机制^[15-16],在双向拍卖过程中未能被成功撮合的企业用户可参与用电权P2P挂牌交易^[17];交易结算步骤包括交易结果的公示以及交易费用的结算。

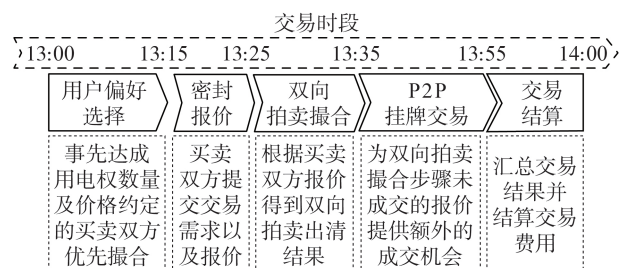


图2 市场交易阶段的具体步骤

Fig.2 Specific steps of market trading stage

园区级交易机制的具体实施过程如下。

步骤1:若企业用户有约定的交易对象,可在13:00—13:15时段向交易平台提交与其事先达成约定的企业用户名称及交易的用电权数量和价格信息,此类企业用户将被优先撮合。为了防止企业用户的误操作而导致交易失败,在规定时间内企业用户可不限次数地修改申请(步骤2与步骤4中同理)。

步骤2:未参与步骤1或在步骤1中未能交易成功的企业用户可根据自身需求作为买方或卖方在13:15—13:25时段向交易平台密封申报交割时段内所需购买或出售的用电权数量及其期望的交易价格。

步骤3:在13:25—13:35时段,交易平台自动将投标信息进行排序,买方报价从高到低排序,卖方报价从低到高排序,报价相同则按照报价的时间先后排序。将买卖双方按照上述顺序分别置于买方、卖方撮合队列。同时,设定报价上限,以防止企业用户间的不正当竞争。交易平台按照双向拍卖规则对买卖双方进行撮合。当买方的最高报价高于或等于卖方的最低报价时,才能够撮合成功,如图3所示,图中 $p_{b,k}$ 、 $p_{s,k}$ 分别为排序后的第 k 个买方、卖方报价。撮合成功后,成交价格为二者报价的平均值,成交数量为二者报量的较小值,若企业用户的交易需求全部得到满足,则将其移出撮合队列,直至撮合队列中的买方最高报价低于卖方最低报价或者买卖双方有一方的撮合队列全部成交清空为止。

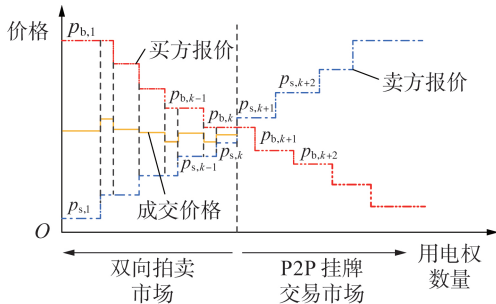


图3 买方与卖方报价曲线

Fig.3 Bidding curves of buyers and sellers

步骤4:在双向拍卖市场交易中未能被成功撮合的企业用户可在13:35—13:55时段参与P2P挂牌交易。在此阶段,各方可以查询当前卖方的最低报价和买方的最高报价,根据自身需求决定是否需要调整报价或用电权数量来发布限价交易、市价交易或者撤单放弃交易^[17],具体交易行为定义见附录A表A1。其中,市价为图3中双向拍卖市场阶段用电权的最大成交量所对应的成交价格,这在一定程度上保护了买卖双方的利益不受部分用户恶意报价的影响。若企业用户放弃购买或者出售用电权,可以选择撤单,清除自身的报价、报量信息。

步骤5:13:55—14:00进入交易结算阶段。企业用户 i 的总成交金额 P_i 可表示为:

$$P_i = \sum_{j \in \Omega_i^s} M_{i,j} P_{i,j} \quad (1)$$

式中: Ω_i^s 为所有与企业用户 i 进行用电权交易的企业用户集合; $M_{i,j}$ 、 $P_{i,j}$ 分别为企业用户 i 与企业用户 j 之间达成交易的用电权数量、成交价格, $M_{i,j} > 0$ 表示企业用户 i 从企业用户 j 处购买用电权, $M_{i,j} < 0$ 表示企业用户 i 向企业用户 j 出售用电权。

企业用户 i 最终持有的用电权数量 M_i^F 为:

$$M_i^F = M_i^A + M_i^T \quad (2)$$

$$M_i^T = \sum_{j \in \Omega_i^s} M_{i,j} \quad (3)$$

式中: M_i^A 为合同约定的企业用户 i 的基本用电容量; M_i^T 为企业用户 i 与其他企业用户交易所得用电权。

本文设计的用电权交易机制实现了交易环节的量价公开,为所有市场参与者打造了一个公平透明的交易环境。

3)阶段3为交割考核阶段。该阶段是企业用户在按短期、中期、长期交割时段结束后,对其用电权的使用情况进行相应的奖惩考核,以约束其市场行为。考虑到企业用户可能存在恶意竞争、信用违约、浪费资源等情况,该阶段设置了偏差考核与超容罚款2个环节,通过经济手段促进企业用户市场行为的合理规范性。

偏差考核对象为买方企业用户,根据实际容量使用情况与交易容量的偏差程度,对其信用分进行一定程度的增加或扣减。该考核主要用于约束买方企业用户在下次交易中购买用电权的随意性,确保交易得到的用电权能够发挥作用,对卖方企业用户则不做该考核,具体描述如下。

若企业用户 i 实际使用的最大需求 M_i^{actual} 与其最终持有的用电权数量 M_i^F 的差值绝对值不超过 αM_i^T ($\alpha \in [5\%, 20\%]$),即如式(4)所示,表示企业用户 i 实际使用的用电容量偏差相较于购入用电权处于一个波动很小的范围内,则判定企业用户 i 为诚实用户。连续 N 次均被判定为诚实用户的企业用户可以获得信用分 c_{cr} 作为奖励。

$$|M_i^{\text{actual}} - M_i^F| \leq \alpha M_i^T \quad (4)$$

若 M_i^{actual} 与 M_i^F 的差值绝对值满足式(5),则判定企业用户 i 为不诚实用户,需要扣除信用分 c'_{cr} 作为惩罚。

$$\alpha M_i^T < |M_i^{\text{actual}} - M_i^F| \leq \beta M_i^T \quad (5)$$

式中: β 的取值范围建议为 $[40\%, 60\%]$ 。

若 M_i^{actual} 与 M_i^F 的差值绝对值满足式(6),则判定企业用户 i 为极其不诚实用户,扣除比不诚实用户更多的信用分 c''_{cr} 作为惩罚。当企业用户的信用分低于一定的程度或被完全扣除时,禁止该企业用户参

与未来的用电权交易。

$$|M_i^{\text{actual}} - M_i^F| > \beta M_i^F \quad (6)$$

超容罚款环节基于企业用户的超容数量进行相应的罚款,不论买方还是卖方都需要接受该考核,以确保整个园区用电的安全、有序与公平。若企业用户*i*实际使用的最大需量 M_i^{actual} 超过其最终持有的用电权数量 M_i^F ,则需支付的罚金 R_i' 为:

$$R_i' = (M_i^{\text{actual}} - M_i^F) P_{\text{st}} W \quad (7)$$

式中: P_{st} 为在交易前设定的用电权标准成交单价, W 为结算系数,二者的取值可以参考《供电营业规则》设定, P_{st} 可设为参考两部制按最大需量计费的基本电费单价, W 一般设为3。

本文所提用电权交易机制不仅考虑了交易环节的公正透明,对企业用户是否合理利用交易所得用电权也进行了一定程度的考核监管,且针对企业超容用电的情况进行的经济惩罚较为严厉。园区收取的超容罚金可用于园区物业的增值服务,如临时车位预约、快递接收、抢修保电等,该罚金从企业用户的保证金中扣除。待交割时段结束后,用户可申请退还账户中剩余的保证金。

2 基于以太坊智能合约的用电权交易实现方法

区块链技术是一种去中心化的分布式账本数据系统,通过加密算法、共识机制等计算机技术解决了传统中心化机构的效率低、成本高以及数据存储安全存在隐患等问题。以太坊是基于区块链技术的新型可编程开发平台,具备便于智能合约交互而无需担心共识协议等优势^[18-19],在以太坊中的每位参与者均可作为“矿工”,所有“矿工”收集当前时段的全部交易及传递信息,竞先求解一道数学难题,最先得到答案的“矿工”将获得记账权,并负责打包及播报数据^[9]。基于上述特性,将用电权智能合约部署在以太坊私有链上^[20],供电公司、园区、参与交易的企业用户共同作为节点接入,供电公司作为电能供应方,园区作为智能合约的发起者,企业用户作为市场参与者,三方一同维护平台中的交易数据,以多方共同主导、去中心化的形式,保证交易市场的公正透明和可靠性。

本文设计的多边用电权交易智能合约包含初始化函数、用户偏好选择函数、密封报价函数、双向拍卖撮合函数、P2P挂牌交易函数、交割结算函数六大核心功能函数,每个核心功能函数又包括了若干个辅助函数。智能合约函数的内部逻辑过程见附录A图A2,依次调用各个函数就可完成一轮多边用电权交易流程。

1) 初始化函数。

企业用户在区块链平台上调用初始化函数

$f_{\text{initial}}(x_{\text{name},i}, x_{\text{type},i}, x_{\text{capacity},i}, \dots)$ 完成注册信息,包括企业名称 $x_{\text{name},i}$ 、企业类型 $x_{\text{type},i}$ 、基本用电容量 $x_{\text{capacity},i}$ 等,“矿工”进行信息核实,若无误则显示注册成功。智能合约按照企业用户注册的时间顺序为其分配身份标识号ID,并将此ID信息存储到企业用户的结构体中。企业用户的初始信用分数 $C_{\text{CR},0}$ 在注册时被设定为100分。区块链上各成员自主检验信息,将包含正确信息的区块添加至本节点,并拒绝添加包含错误信息及恶意信息的区块,以保证链上数据的正确性。

2) 用户偏好选择函数。

在交易开始之前,企业用户调用用户偏好选择函数向智能合约所在地址提交相应的保证金,由“矿工”确认转账信息。需提交保证金 D_i 的计算式为:

$$D_i = w_i P_{\text{st}} M_i^F \quad (8)$$

$$w_i = C_{\text{CR},0} / C_{\text{CR},i} \quad (9)$$

式中: M_i^F 为企业用户*i*预期交易的用电容量; w_i 为企业用户*i*的保证金系数; $C_{\text{CR},i}$ 为企业用户*i*的实时信用分。企业用户的信用分越低,则 w_i 越大,需要提交越多的保证金才能够参与交易。当信用分低于临界信用分 $C_{\text{CR},s}$ 时禁止该企业用户参与交易,建议设置 $C_{\text{CR},s}$ 为20分。

用户偏好选择阶段适用于已达成交易共识的企业用户,通过优先撮合其达成用电权交易,免除了后续流程。企业用户向平台提交期望交易的对方企业用户信息,以及与其事先约定的交易用电权数量和价格,只有当买方和卖方输入的参数信息一致时,智能合约函数才会自动执行从而达成交易,在“矿工”核实无误后,调用余额校验函数 $f_{\text{checkBalance}}(x_{\text{balance},i})$,核验买方企业用户*i*的钱包余额 $x_{\text{balance},i}$ 不得低于报量与报价的乘积,核验成功则进行转账。

3) 密封报价函数。

经交易权限核实后,企业用户在密封报价阶段结束前调用密封报价函数,密封向智能合约申报用电权价格及数量等投标信息。“矿工”对企业用户的报价信息进行分类,分别加入买方、卖方撮合队列。“矿工”核实钱包余额后将报量、报价信息存储至区块链。

4) 双向拍卖撮合函数。

首先对买方、卖方报价队列进行排序。将卖方报价 $p_{s,i}$ 按照从低到高进行排序,将买方报价 $p_{b,j}$ 按照从高到低进行排序。然后按照双向拍卖规则的成交价格结算交易金额,成交价格为 $(p_{s,i} + p_{b,j})/2$,即买卖双方报价的均值,成交量为买卖双方报量的较小值 $\min\{q_{s,i}, q_{b,j}\}$,其中 $q_{s,i}$ 、 $q_{b,j}$ 分别为卖方*i*、买方*j*的报量。

5) P2P挂牌交易函数。

未出清的企业用户可在P2P挂牌交易阶段调用查询函数查询各方报价。买方可以查询当前卖方队列中的最低报价,卖方相应地也可查询当前买方队列中的最高报价,根据自身需求决定是否需要调整报价或报量。若各方修改报量、报价并提交,则进行限价交易;若买方更改后的报价高于卖方的报价,则成交价格为双方报价的均值;若各方仅修改并提交报量,并未报价,则进行市价交易,市价 p_{balance} 为上一阶段双向拍卖最大成交容量所对应的成交价格。限价交易和市价交易的成交数量仍为买卖双方报量的较小值。

“矿工”执行函数完成交易结算,核验钱包余额,核验通过则进行转账,更新企业用户所持有的用电权数量。若企业用户决定放弃交易,也可进行撤单,平台执行撤单函数 $f_{\text{withdraw}}(p_{s,i}, p_{b,j}, q_{s,i}, q_{b,j})$,买方或卖方清空自身的投标信息并退出市场。

6)交割结算函数。

平台调用交割结算函数计算各企业用户的交易偏差量及超容容量,根据企业用户的交易诚实度进行奖励或扣减其信用分,并存储信用分信息。若企业用户存在超容行为,则超出部分需要按市价的 W 倍向园区支付相应罚金。由“矿工”执行函数核验信息及钱包余额,若核验成功则进行转账,若核验失败则记录此次欠款并从下一次交易的保证金中扣除。

3 算例仿真分析

3.1 仿真数据

考虑现实配电网络拓扑因素,本文仿真场景设置为上海市某一产业园区10 kV配电站内,该站变压器总额定容量为3 200 kW·A。参考《上海市物价局关于降低工商业电价有关事项的通知》,设定相应的标准电价为42元/kW,其他参数设置见附录A表A2。

3.2 仿真结果分析

为了验证本文设计的多边交易机制的有效性,在实验室环境下搭建用电权交易平台,使用Solidity语言将用电权交易机制智能合约化,经Remix在线编译器将其编译为可识别的字节码,通过Geth客户端部署到以太坊私有链上。构建以太坊私有链的Geth版本为1.9.23,在CPU为Intel Core i5 1.4 GHz,内存为8 GB的计算机上进行仿真。

仿真算例以短期交割时段为例,同时考虑供需平衡、供小于求、供大于求3种场景(场景1—3)。区块链的相关运行参数描述如下:区块链类型为以太坊私有链,智能合约部署的消耗gas总量为3 549 718(gas为工作量的计量单位,用作计量以太坊智能合约执行命令所产生的消耗),合约哈希值为0x3e004f39d9321a04af2a056deddc2b81fe009c68e910

8827a8a3f62fd616104f,区块数量为179。其中,合约哈希值是指智能合约在私有链上存放的地址;区块数量是指仿真算例在供需平衡场景下运行1轮完整的交易所产生的区块数量。以下分析具体的用电权交易流程以及各企业用户在未来1天内所得的用电权。企业用户A、B、C、D的注册结果如表1所示。

表1 企业用户的注册结果

Table 1 Registration results of enterprise users

企业用户	注册ID	初始用电容量/kW
A	1	50
B	2	230
C	3	1 020
D	4	770

密封报价阶段,买卖双方的投标信息如表2所示,表中企业用户A、B为交易买方投标者,企业用户C、D为卖方投标者。

表2 买卖双方的投标信息

Table 2 Bidding information of buyers and sellers

场景	买方报价 / (元·kW ⁻¹)		买方报量 / kW		卖方报价 / (元·kW ⁻¹)		卖方报量 / kW	
	用户A	用户B	用户A	用户B	用户C	用户D	用户C	用户D
1	50	33	150	130	40	34	200	130
2	70	34	150	130	40	40	80	20
3	50	45	50	70	35	40	200	150

在供需平衡场景(场景1)下,双向拍卖成交结果如表3所示。在双向拍卖市场,企业用户A与C、D成功匹配并进行交易结算,企业用户B因报价过低没有成功匹配。双向拍卖后企业用户A、D的需求已全部出清,被移出交易队列。企业用户C仍有180 kW的剩余用电权,故企业用户B、C进入P2P交易阶段。该阶段企业用户C、D的中标收益分别为900、5460元。

表3 场景1的双向拍卖成交结果

Table 3 Double auction results of Scenario 1

参与企业用户	中标企业用户	成交价格 / (元·kW ⁻¹)	中标量 / kW	中标收益 / 元
A	C, D	45, 42	20, 130	-6 360
B	—	—	—	—
C	A	45	20	900
D	A	42	130	5 460

在P2P挂牌交易市场,企业用户B、C均对自身报价进行了调整,调整之后企业用户B的报价为46元/kW,企业用户C按市价42元/kW报价,根据限价交易原则,成交价格为44元/kW。P2P交易后,企业用户B容量完成清零,企业用户C仍然剩余50 kW用电权未出清,但因缺少卖家无法匹配,随即退出交易。该阶段企业用户C的中标收益为5720元。3种场景的整个交易流程结果如表4所示。

表4 3种场景下交易流程完成后的交易结果

Table 4 Trading results after completion of trading process under three scenarios

场景	参与企业用户	中标企业用户	成交价格 / (元·kW ⁻¹)	中标量 / kW	中标收益 / 元
1	A	C, D	45, 42	20, 130	-6 360
	B	C	44	130	-5 720
	C	A, B	45, 44	20, 130	6 620
	D	A	42	130	5 460
2	A	C, D	55	80, 20	-5 500
	B	—	—	—	—
	C	A	55	80	4 400
	D	B	55	20	1 100
3	A	C	42.5	50	-2 125
	B	C	40	70	-2 800
	C	A, B	42.5, 40	50, 70	4 925
	D	—	—	—	—

在供小于求场景(场景2)下,因企业用户A报价最高,因此会优先为企业用户A进行匹配,企业用户C、D的报量与企业用户A匹配完之后均退出市场。企业用户A只有部分需求得到满足,而企业用户B因缺乏卖方匹配,需求无法得到满足。故在该场景下,双向拍卖结束后没有P2P交易阶段,整个交易流程提前完结。

在供大于求场景(场景3)下,双向拍卖阶段根据交易规则优先撮合企业用户C与A交易。双向拍卖后所有买方容量均成功出清,剩余卖方企业用户C与D只能退出交易。

本文所提交易机制采用密封报价的形式,鼓励买卖双方基于自身需求合理报价,即使在供小于求或者供大于求的市场中,也可以为买卖双方争取最大收益。3种场景下各企业用户的用电容量更新结果如表5所示。

表5 3种场景下交易后的企业用户用电容量

Table 5 Enterprise users' capacities after trading under three scenarios

企业用户	初始用电容量 / kW	交易后用电容量 / kW		
		场景1	场景2	场景3
A	50	200	150	100
B	230	360	230	300
C	1 020	870	940	900
D	770	640	750	770

市场交易阶段结束后,各企业用户在交割时段内使用交易所得的用电权。在交割考核阶段,3种场景下买方用户的偏差考核结果如表6所示。

在场景1下,企业用户B被判定为诚实用户,若该企业用户连续在3次交易中被判定为诚实用户,则可获得信用分加1分的奖励;企业用户A在本次考核中被判定为不诚实用户,故对其进行信用分减5分的惩罚。在场景2下,企业用户B未能成功购得用电权,故不参与本轮偏差考核;企业用户A的偏差

表6 3种场景的偏差考核结果

Table 6 Deviation assessment results of three scenarios

场景	参与交易企业用户	交易后用电容量 / kW	实际最大需量 / kW	信用分 / 分
1	A	200	230	95
	B	360	350	100
2	A	150	110	95
3	A	100	126	90
	B	300	300	100

考核结果为信用分减5分。在场景3下,企业用户B被判定为诚实用户;企业用户A被判定为极其不诚实用户,对其信用分进行减10分的惩罚。

在超容罚款环节,根据式(7)对超容用户收取罚金,3种场景下各企业用户的超容罚金结果如表7所示。以场景1为例说明,企业用户A需缴纳3 780元罚金,企业用户B未超容故无需缴纳罚金,企业用户C、D需分别缴纳1 260、11 340元罚金。本轮交易园区共收取16 380元罚金,作为后续提供增值服务的资金来源。

表7 3种场景的超容罚金

Table 7 Fines for excess capacities of three scenarios

场景	参与交易企业用户	交易后用电容量 / kW	实际最大需量 / kW	罚金 / 元
1	A	200	230	3 780
	B	360	350	—
	C	870	880	1 260
	D	640	730	11 340
2	A	150	110	—
	B	230	240	1 260
	C	940	912	—
	D	750	768	2 268
3	A	100	126	3 276
	B	300	300	—
	C	900	903	378
	D	770	740	—

场景1的算例结果表明,本文所提交易机制充分调用了企业用户的闲置电力资源,有效解决了部分用户临时增容的需求。相较于传统增容方案所需的用户站改造费、开关站土建费、外线工程扩容费等高昂的建设成本以及漫长的用电申请和改造周期,本文所提交易机制不仅在极大程度上节约了建设费用和时间成本,还帮助部分企业用户通过交易赚取一定的费用,实现了对园区现有资源的最大化利用和合理化配置。

4 结论

本文设计了一种园区级多边用电权交易机制,利用区块链技术的特性,对用电权这种数字资产进行市场化分配,部署在以太坊私有链上的测试结果表明:

1) 本文设计的多边用电权交易规则使买方报价

大于等于卖方报价的部分通过双向拍卖进行匹配,剩余部分通过P2P市场挂牌交易进行匹配,利用市场化的手段实现了园区企业用户之间用电容量的优化配置;

2)偏差考核和超容罚款这2个环节通过信用分奖惩和罚款手段,约束了平台用户的交易行为,进一步规范了市场秩序,保障了园区用电权交易的公平公正;

3)通过区块链平台保证交易数据多方一致、不可篡改、可溯源等,在以太坊私有链上进行测试,完成了企业用户用电权的挂单、交易、结算、考核等一系列过程,确保了园区多边交易的安全可靠;

4)通过算例仿真展示了3种场景的交易结果,即使是在供远小于求或者供远大于求的场景下,本文所提交易机制仍能满足部分企业用户的需求,验证了交易机制的合理性,也表明该交易机制适用于不同的市场环境。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 鞠平,周孝信,陈维江,等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备,2018,38(5):2-11.
JU Ping, ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang, et al. “Smart Grid Plus” research overview[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 2-11.
- [2] 吴鸣,任学婧,周丹,等. 新电改背景下产业园区供电系统容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(5):2-8.
WU Ming, REN Xuejing, ZHOU Dan, et al. Optimal allocation method for capacity of power supply system in industrial park under new electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 2-8.
- [3] 胡鹏,艾欣,杨昭,等. 考虑电能共享的综合能源楼宇群日前协同优化调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):239-245.
HU Peng, AI Xin, YANG Zhao, et al. Day-ahead optimal scheduling for cluster building with integrated energy system considering power sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 239-245.
- [4] 江友华,杨金婉,赵乐,等. 电网供电缺失环境下多园区有限电量优化调度策略[J]. 电力建设,2021,42(1):105-116.
JIANG Youhua, YANG Jinwan, ZHAO Le, et al. Optimal scheduling strategy for limited electricity in multiple parks in the absence of power supply from grid[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(1): 105-116.
- [5] 徐嘉辉,马立新. 区块链技术在分布式能源交易中的应用[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):17-22,30.
XU Jiahui, MA Lixin. Application of blockchain technology in distributed energy transaction[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 17-22, 30.
- [6] KIM M, SONG S, JUN M S. A study of block chain-based peer-to-peer energy loan service in smart grid environments[J]. Advanced Science Letters, 2016, 22(9):2543-2546.
- [7] 邓明辉,唐郑熠,黄达,等. 基于区块链的微电网电力交易匹配机制[J/OL]. 电力自动化设备. (2021-07-26)[2021-09-09]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202107017>.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] MENGELKAMP E, GÄRTTNER J, ROCK K, et al. Designing microgrid energy markets: a case study-the Brooklyn microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 210:870-880.
- [11] ANDONI M, ROBU V, FLYNN D, et al. Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 100:143-174.
- [12] 韩冬,张程正浩,孙伟卿,等. 基于区块链技术的智能配售电交易平台架构设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):89-96.
HAN Dong, ZHANG Chengzhenghao, SUN Weiqing, et al. Framework design of smart distribution trading platform based on blockchain technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 89-96.
- [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.
- [14] 武庚,曾博,李冉,等. 区块链技术在综合需求侧响应资源交易中的应用模式研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3717-3728.
WU Geng, ZENG Bo, LI Ran, et al. Research on the application of blockchain in the integrated demand response resource transaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3717-3728.
- [15] 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):5072-5084,5304.
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, 5304.
- [16] 伍雨柔,程杉,魏荣宗. 基于双向拍卖的多微电网协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(3):96-101.
WU Yurou, CHENG Shan, WEI Rongzong. Coordinated optimization scheduling of multi-microgrid based on double-auction[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(3): 96-101.
- [17] 王浩然,陈思捷,严正,等. 基于区块链的电动汽车充电站充电权交易:机制、模型和方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):425-436.
WANG Haoran, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Blockchain-enabled charging right trading among EV charging stations: mechanism, model, and method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 425-436.
- [18] 王蓓蓓,李雅超,赵盛楠,等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术[J]. 电力系统自动化,2019,43(14):53-64.
WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Shengnan, et al. Key technologies on blockchain based distributed energy transaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64.
- [19] 张帆. 基于区块链与属性基加密的物联网访问控制研究[D]. 南京:南京邮电大学,2020.
ZHANG Fan. Research on Internet of Things access control

based on blockchain and attribute-based encryption[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.

- [20] AITZHAN N Z, SVETINOVIC D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2018, 15(5): 840-852.

作者简介:

黄家晖(1993—),男,江苏泰州人,博士研究生,研究方向为人工智能在能源互联网中的应用(E-mail:huang11seu@



黄家晖

hotmail.com);

赵文恺(1983—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要研究方向为能源互联网和能源大数据分析(E-mail:zww602@163.com);

韩冬(1984—),男,黑龙江哈尔滨人,讲师,博士,主要研究方向为电力市场和能源区块链技术(E-mail:han_dong@usst.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Park-level multilateral power usage quota trading mechanism and implementation method based on blockchain

HUANG Jiahui^{1,2}, LI Chao³, HUANG Wei³, ZHAO Wenkai², HAN Dong³

(1. School of Information Science and Technology, Fudan University, Shanghai 200438, China;

2. Pudong Power Supply Company of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

3. Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Commercial and industrial parks with intensive load usually allocate power resources to enterprises in the form of contract, which has some problems such as low allocation efficiency, insufficient resource utilization, and so on. Therefore, a park-level multilateral PUQ (Power Usage Quota) trading mechanism based on blockchain is proposed. The PUQ trading model including double auction rules and P2P (Peer-to-Peer) trading, fully mobilizes the idle power capacity in the park and optimizes the allocation of PUQs through market-oriented means, which avoids the expansion and reconstruction of the park and solves the problem of meeting enterprises' temporary demand in capacity increase. On this basis, the PUQ trading mechanism based on the Ethereum private chain ensures the openness and transparency of multilateral trading process, and the smart contract function is adopted to automatically execute the trading, which improves the matching efficiency and reduces the trading cost. The effectiveness of the proposed trading mechanism and blockchain trading platform is verified by a simulation example.

Key words: power usage quota trading; blockchain; smart contract; double auction; peer-to-peer

附录 A

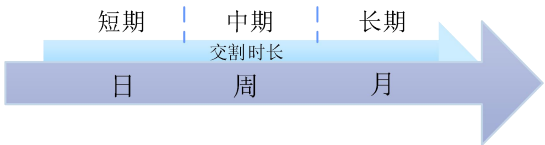


图 A1 用电权的交割时段
Fig.A1 Delivery time for PUQs

表 A1 P2P 挂牌交易市场的交易行为
Table A1 Transaction behaviors in P2P trading market

交易行为	说明
限价交易	买/卖方指定交易用电权数量及价格（若有一方未指定价格，默认其报价为市场市价），若出现价格低于等于/高于等于该价格的报价，则成交，成交价格为二者报价的均值
市价交易	买卖双方指定用电权交易数量，但均未指定价格，按照当前市场市价成交，成交量为双方报量的较小值
撤单	放弃购买或出售用电权，清除自身的报价报量信息

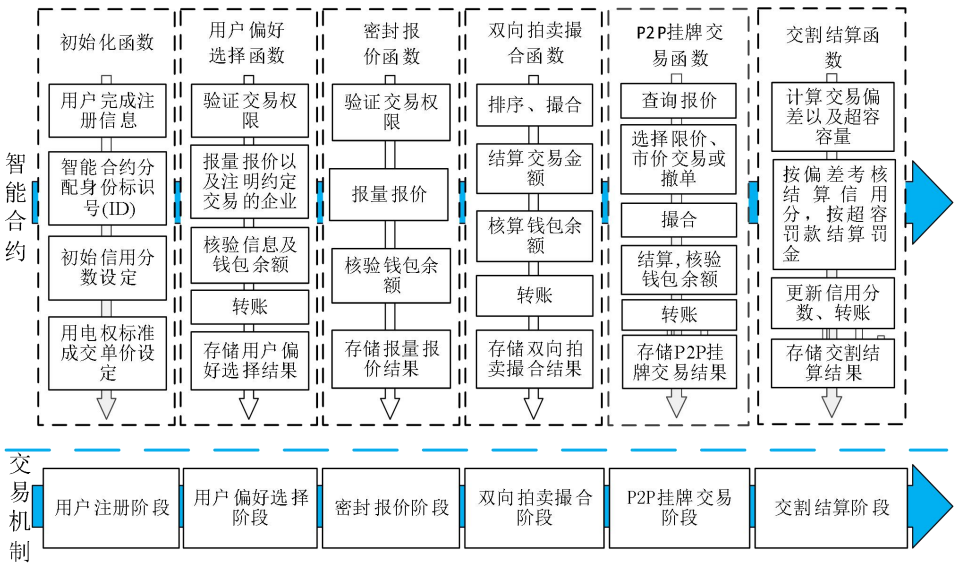


图 A2 智能合约的核心函数
Fig.A2 Core functions of smart contracts

表 A2 参数设置
Table A2 Parameter setting

参数	取值	参数	取值
标准电价/（元·kW ⁻¹ ）	42	诚实次数 N	3
保证金系数	2	奖励信用分 c_{cr}	1
惩罚系数	3	惩罚信用分 1 c'_{cr}	5
报价上限/（元·kW ⁻¹ ）	84	惩罚信用分 2 c''_{cr}	10
初始信用分	100	偏差考核 $\alpha\%$	10
禁止交易信用分	20	偏差考核 $\beta\%$	50