

支持现货市场的分布式电力交易机制设计与实现

孟仕雨¹, 孙伟卿¹, 韩冬¹, 张巍¹, 杨文威², 肖敏², 薛贵挺³

(1. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093; 2. 上海嘉柒网络科技有限公司, 上海 200333;
3. 国家电网北京海淀供电公司, 北京 100086)

摘要: 伴随电力体制改革的不断深入和分布式能源的大量接入, 电力现货交易的商业模式正在被不断探索, 亟需提出新的交易机制来适应新的商业模式。首先, 基于去中心化的思想设计了一种适用于日内现货市场的分布式电力交易机制, 激励产消者根据自身实际发电能力或用电情况发起实时的点对点交易需求, 就近与周边产消者用户直接进行交易。然后, 应用区块链技术以智能合约的形式规定交易规则, 明确产消者的权利与义务。最后, 结合智能电表与智能终端搭建具有两层互操作层的分布式电力交易平台, 多信息融合通信, 支撑交易自动出清与结算。提出的分布式电力交易机制可实现产消者点对点多边竞价交易, 鼓励产消者合理申报交易需求, 实现能源的高效分配、合理利用。

关键词: 电力现货市场; 分布式交易; 区块链; 智能合约; 日内电力市场

Design and implementation of decentralized power transaction mechanism to spot market

MENG Shiyu¹, SUN Weiqing¹, HAN Dong¹, ZHANG Wei¹, YANG Wenwei², XIAO Min², XUE Guiting³

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Jiaqi Network Technology Co., Ltd., Shanghai 200333, China;
3. State Grid Haidian Power Supply Company, Beijing 100086, China)

Abstract: With the deepening of the reformation of power system and the massive access of distributed energy, the business model of electric power spot trading is being investigated. It is urgent to put forward a new trading mechanism to adapt to the new business model. Firstly, a decentralized power transaction mechanism is designed based on the idea of decentralization, which is suitable for the intraday spot market. It encourages prosumers to initiate real-time peer-to-peer trading demand according to their own actual demand of power generation capacity or electricity consumption. Prosumers can trade directly with others nearby. Then, the transaction rules are formulated in the form of smart contracts by applying the blockchain technology to define the rights and obligations of prosumers definitely. Finally, a distributed power trading platform with two interoperable layers is built by combining smart meter and smart terminal, multi-information fusion communication supported automatic clearing and settlement of transactions. The proposed decentralized power transaction mechanism can realize peer-to-peer multilateral bidding transactions among prosumers. It encourages prosumers to declare their trading demands appropriately, so as to achieve efficient distribution and rational utilization of energy resources.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777126).

Key words: power spot market; decentralized transaction; blockchain; smart contract; intraday electricity market

0 引言

近年, 国家发改委和能源局发布了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发[2015]9号),

要求着力构建主体多类型、竞争有序的电力市场格局^[1], 将市场竞争引入售电阶段是进一步深化电力市场改革的要务^[2]。传统电力市场将逐步由计划模式转化为具有用户交互性高、能源利用率高、调度控制灵活等特征的市场交易模式^[3]。同时, 为推进落实电力市场改革, 国家发改委和能源局又发布了

《关于开展电力现货市场建设试点工作的通知》，要求组织市场主体开展日前、日内、实时电能量交易，还原电力的商品属性，加快建设电力现货市场。

但是，在电力现货市场中市场参与主体的增加使得交易信息海量，对电力交易进行管理难度增大，大量产消者的接入将使未来的能源交易方式产生巨大改变^[4]，对交易管理和结算规则等配套机制提出了更高的要求。因此需要在遵循市场规律和保障电力系统安全稳定运行的前提下，针对电力现货市场的特点设计一种安全、高效、透明的市场运行模式和交易机制^[5]，防止剧烈波动的电价给电力市场带来风险。如何设计有效的电力现货交易机制，实现能源资源优化配置，成为市场化改革的重点问题之一^[6]。

根据国家发改委和能源局发布的《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》，分布式能源主动参与市场交易受到鼓励，电网内的电力用户自由交易成为可能，从而产生新的市场交易模式^[7]。新的交易模式下，各产消者均在发/用电特性和申报策略上具有很强的不确定性与差异性；并且，产消者的自利性使其对交易公平性和隐私性有更高要求^[8-9]。因此，可以在电力现货市场中引入去中心化的思想，结合区块链技术设计一种支持现货市场的分布式电力交易机制，以此来保证交易公平高效地执行^[10]。

区块链技术采用去中心化和去信任的方式集体维护一个可靠分布式数据库，具有去中心化、透明性、公平性以及防篡改的技术特点，可以有效解决传统中心化机构的高成本、低效率以及数据存储不安全的问题^[11]。由于区块链的技术特性，区块链技术在能源行业的应用具有很大的发展前景^[12]。研究人员将区块链的技术特点与能源交易相结合，探索其在能源领域应用的可行性^[13-14]和应用模式^[15-17]，并验证了电力系统与区块链技术的兼容性^[18]以及利用虚拟货币进行区域能源交易结算的可行性^[19]。文献[20]提出了一种应用于能源互联网的弱中心化电力交易和阻塞管理方法。文献[21]讨论了区块链技术在需求侧响应场景下的应用。文献[22]提出了以智能合约的形式存储电力交易信息并自动执行资金转移的电力交易方案。但是，对于如何在实际应用场景中搭建基于区块链的去中心化交易平台，激励用户行为仍有待进一步研究。

本文基于分布式电力市场中“多买方、多卖方”的应用场景，提出了支持现货市场的分布式电力交易机制。然后，使用基于区块链技术的智能合约将分布式电力交易机制数字化，以智能合约的形式规定了产消者的行为规范，替代人为仲裁并自动执行

交易结算和资金交易。最后，结合智能电表和智能终端搭建了可用于现货交易的分布式电力交易平台，实现了各产消者间点对点的电能交易。最后通过模拟实验验证该交易机制和方法的可行性。

1 分布式电力交易机制设计

1.1 交易流程

分布式能源参与的电力市场中，庞大的交易主体数量，多样的交易能源类型，随机波动的产消者供需量以及波动的实时电价给电力交易机制的设计提出了较高要求。

本文所设计的分布式电力交易市场中，产消者之间可以进行点对点分散式撮合交易，根据分布式电源交易规则，不要求交易双方的上网电力与用电负荷实时平衡^[23]。电网将平衡点对点交易的偏差余量，起了一个交易兜底的作用，它将按照现行政策中最低收购电价与最高售电电价对交易中未能平衡的电量进行兜底结算。整个交易流程如图1所示。

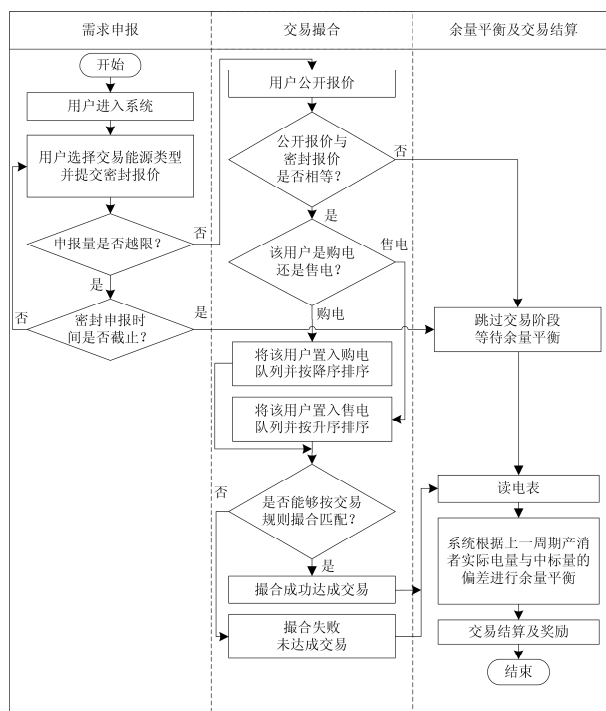


图1 分布式电力交易流程图

Fig. 1 Transaction flowchart of distribution network

1) 在发布交易阶段，任意用户均可在分布式交易平台上提交电量交易需求与报价。产消者利用不可逆向求解、易于校验的哈希函数，将自己的真实报价进行哈希加密作为密封报价，然后广播到系统中。这一方法使得密封报价既包含了不可篡改的真实报价信息，又不会提早泄露给其余产消者。密封

输出的结果如式(1)所示。

$$P = H(v) \quad (1)$$

式中: P 为密封报价; $H(v)$ 为 SHA-1 哈希函数; v 为真实报价。

同时系统将对用户的申报量进行检验, 若用户申报量超过其约束条件, 在有效时间内需要重新申报需求。超过时间为正确申报需求的, 则跳过交易阶段, 等本周期交易结束后, 直接进入余量平衡阶段。产消者申报电量约束。

$$p_n \leq p_{n,\max}, \forall n \in \Omega_p \quad (2)$$

式中: $p_{n,\max}$ 为第 n 个产消者负荷的上限; Ω_p 为产消者集合。

2) 在发布交易阶段结束后, 用户须公开其密封报价的数值, 验证与密封报价数值是否一致。通过验证后才能进入参与交易, 否则跳过交易阶段, 等本周期交易结束后, 直接进入余量平衡阶段。

3) 交易平台将绿电售电需求按报价从低到高的顺序排列置入绿电售电队列, 将绿电购电需求按报价从高到低的顺序置入绿电购电队列; 将非绿电交易需求的产消者按上述规则再进行排序置入非绿电售/购电队列。若价格相同则按照提交报价的时间进行排序。

4) 交易平台根据上述排序, 通过马歇尔路径实现产消者的交易匹配。即在买方报价高于卖方报价的前提下, 撮合最高价买方和最低价卖方, 在撮合次高价买方和次低价卖方。以此类推, 直到剩余所有买方报价低于卖方报价则本轮撮合结束。优先对绿电产消者进行撮合匹配, 余下的产消者再置入非绿电售/购电队列, 再按上述规则进行一轮交易。每次撮合的成交价格为交易双方的均价。

5) 系统读取上一周期用电情况, 交易平台根据产消者上一周期中标量及实际发/用电量进行余量平衡, 公共电网将平衡偏差电量, 本周期的偏差电量将在下一周期进行平衡。

6) 交易平台自动根据规则对本周期交易进行结算及奖励, 交易平台根据产消者上一周期申报量及实际发/用电量进行奖励, 本周期的奖励将在下一周期进行。

1.2 余量平衡规则

考虑到对负荷和电源的出力预测一般会存在误差, 在点对点交易结束后, 生产者和消费者分别与大电网交易偏差余量。

对于消费者来说, 当消费者实际消耗电量小于交易电量时, 则不对其进行退款, 相当于多余的电量由生产者出售给电网; 当消费者实际消耗电量多

于交易电量时, 则消费者需要从电网购电以满足电量消耗需求。考虑预测误差时, 单个消费者平衡支出 H 为

$$H = \begin{cases} 0, & \Delta W < 0 \\ C_{bg} \cdot \Delta W, & \Delta W > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_{bg} 为电网买入电价; ΔW 为消费者的预测偏差, $\Delta W < 0$ 表示实际耗电量小于预测值, 反之则大于预测值。

对于生产者来说, 当生产者实际发出电量多于交易电量时, 则其与电网交易多余电量; 而当生产者实际发出电量小于交易电量时, 则需要从电网购买电量以弥补自身出力不足。单个生产者的平衡支出 F 为

$$F = \begin{cases} C_{bg} \cdot \Delta Q, & \Delta Q < 0 \\ C_{sg} \cdot \Delta Q, & \Delta Q > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: C_{bg} 为电网买入电价; C_{sg} 为向电网售电价格; ΔQ 为发电的预测偏差, $\Delta Q < 0$ 表示实际发电量小于预测值, 反之则大于预测值。若 F 为负值则表示生产者需要向电网购电。

1.3 结算与奖励规则

在以太坊系统中存在两种类型的账户, 分别为外部账户与合约账户^[24], 外部账户由私钥控制, 可发起交易, 无与之相关联的智能合约; 合约账户由智能合约控制, 不能发起交易, 有与之相关联的智能合约。本文所设计的平台使用合约账户管理电力交易的资金结算, 使用一种能源代币应用于分布式电力交易市场中的点对点电力交易的结算, 智能合约自动完成结算过程, 该能源代币可以随时与等值人民币进行双向兑换。在每个交易周期结算后, 智能合约根据产消者的交易行为对其奖励相应数额的能源代币, 奖励措施促进了能源的生产和消费。产消者获得的奖励数额与其申报量准确度和市场交易均价有关, 具体规则如下:

反映产消者申报准确度的量记为申报准确系数, 第 n 个产消者在第 m 个交易周期的申报准确系数为

$$x_{n,m} = \frac{x'_{n,m} - x''_{n,m}}{x'_{n,m}} \quad (5)$$

式中: $x'_{n,m}$ 与 $x''_{n,m}$ 分别为第 n 个产消者在第 m 个交易周期申报量与实际相同的电量和偏差的电量, 其中若 $x_{n,m}$ 为负数时, 则表示对产消者罚款。

第 n 个产消者在第 m 个交易周期的交易数额为

$$A_{n,m} = \sum_{k=1}^{\eta} (E_{n,m,k} \cdot C_{n,m,k}) \quad (6)$$

式中: $E_{n,m,k}$ 、 $C_{n,m,k}$ 和 η 分别为第 n 个产消者在第 m 个交易周期第 k 笔成功撮合的电量, 成交电价和所有撮合成功的交易数。

综上, 第 n 个产消者在第 m 个交易周期应得奖励的能源代币数额如式(7)所示。

$$f_{n,m}(x, y) = A_{n,m} \cdot (x_{n,m} + y_{n,m} \cdot G) \cdot b \quad (7)$$

式中: $A_{n,m}$ 为第 n 个产消者在第 m 个交易周期的交易数额; $x_{n,m}$ 为第 n 个产消者在第 m 个交易周期非绿电申报准确系数; $y_{n,m}$ 为第 n 个产消者在第 m 个交易周期绿电申报准确系数; G 为绿电奖励因子; b 为奖励因子。

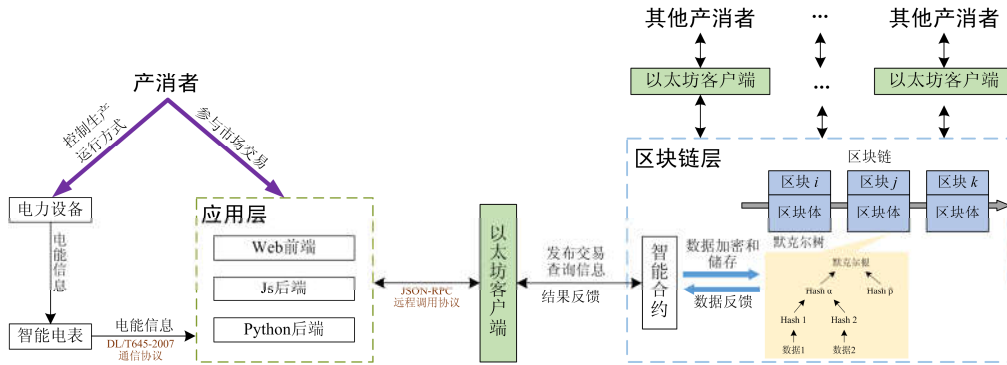


图2 分布式电力交易平台系统架构图

Fig. 2 System structure diagram of distributed power trading platform

1) 在应用层, 使用 Web 前端、Js 后端和 Python 后端技术搭建可视化操作应用, 用户通过应用层实现电能信息的读取和传输, 并参与市场交易。应用层经由智能电表接收存储发/用电设备的电量、功率等数据。智能电表遵循 DL/T645-2007 通信协议。该通信协议为主-从结构的半双工通信方式, 计算机为主站, 智能电表为从站, 从站通过 DL/T645-2007 协议向主站发送信息。地址编码是智能电表的唯一特征, 主站通过发出信息帧来控制主-从通信链路的建立与解除。每帧由帧起始符、从站地址域、控制码、数据域长度、数据域、帧信息纵向校验码及帧结束符 7 个域组成, 每域由若干字节组成。以太坊客户端 Geth(Go-Ethereum)作为以太坊节点, 是接入以太坊区块链的接口, 应用层通过远程调用协议 JSON-RPC 接入以太坊客户端 Geth, 进一步调用智能合约, 从而实现交易发布、信息上传及查询。

2) 在区块链层, 基于以太坊公共区块链开发平台, 采用以太坊原生的数据存储、网络通信方法和共识算法, 创建以太坊私有链。使用 Solidity 编程语言编写图灵完备的智能合约, 明确市场产消者的权利和义务, 实现信息传输的智能化, 使得信息不

2 分布式电力交易平台设计

2.1 总体架构

在分布式电源渗透率较高的电网系统中, 各产消者的供给与需求具有很强的随机性和波动性, 为了满足各产消者的供需要求, 需要依靠区块链技术的去中心化、透明性、公平性以及防篡改的技术特点建立安全可靠的交易平台, 通过区块链技术实现交易结算。

本文所设计的交易平台总体架构如图 2 所示, 主要包括应用层和区块链层两个互操作的层。

可篡改。以太坊是目前使用最广泛的公共区块链平台, 其底层是一个图灵完备的以太坊虚拟机(Ethereum Virtual Machine, EVM), 其分散储存在每个节点的计算机上。智能合约运行在 EVM 上, 可以接受来自外部的通信请求, 通过触发代码逻辑, 进一步处理数据以及反馈信息。各产消者经过区块链节点接入区块链对等网络, 将能源信息与交易信息存储于区块链中。每当区块链中发生数据更新, 各节点都能获得一份完整的数据副本, 实现数据在各对等节点之间的实时更新和存储。为了确保每笔交易的完整性, 区块链中采用默克尔树(Merkle Trees)的形式存储信息^[25]。在每个区块中存储着默克尔树的根哈希值, 记录了每笔交易的完整信息和每个节点的变动情况。每次信息变动被写入区块链时被 Hash 算法加密, 形成叶子节点, 叶子节点两两之间再一次被加密运算, 最后形成默克尔根。通过默克尔根可以快速验证交易的正确性。

2.2 基于智能合约的交易机制实现

智能合约为交易平台底层代码, 是对产消者进行撮合交易的最终规则, 因此智能合约必须遵循自愿竞价、信息保密和合约自动执行的原则。

本文设计的智能合约包含身份验证模块、时间判断模块、密封报价模块、撮合模块、余量平衡模块 5 个主要功能模块。

1) 身份验证模块。该模块的作用为仅允许被授权用户访问该交易系统, 保证交易系统的安全性。

2) 时间判断模块。考虑到产消者的出力和负荷预测准确度, 设定一个交易周期 ΔT 为 $15 \text{ min}^{[26]}$, 按时间顺序划分当前交易周期 T_i 的交易流程:

① 密封报价。0~3 min 时, 产消者向系统平台密封申报下一交易周期 T_{i+1} 的发/用电需求及期望电价。

② P2P 交易撮合。3~10 min 时, 交易平台对产消者的交易需求进行撮合。

③ 余量平衡。10~13 min 时, 公共电网平衡上一交易周期 T_{i-1} 的中标电量与实际发/用电量之间的偏差电量。

④ 交易结算与奖励。13~15 min 时, 智能合约根据产消者本周 T_i 的交易进行结算, 根据产消者上一周期 T_{i-1} 的申报交易电量与实际发/用电量的偏差情况奖励能源代币。

3) 密封报价模块。用户通过该模块向系统中密封申报下一阶段的交易需求总量和期望交易单价。用户申报的交易需求信息被存储在区块中。

4) 撮合模块。密封报价之后, 智能合约通过该模块对产消者的交易需求进行撮合。撮合成功后输出每笔交易的申报量及交易额。撮合顺序以按能源类型及偏好为第一优先级, 按最低经济成本为第二优先级进行撮合。该模块包含 3 个函数:

① 按类型撮合函数。该函数被查询撮合结果函数调用, 分别检索两类数组中能源类型和能源偏好为绿电成员, 按低成本撮合的原则, 将生产者数组按报价从低到高排序, 将消费者数组按报价从高到低排序, 逐一对两类数组中的成员进行匹配。若生产者报价不高于消费者报价, 则撮合成功。交易单价为交易双方报价的平均值, 交易量为消费者申报的交易总量和生产者申报的交易总量中的最小值。

② 按低成本报价撮合函数。该函数类似于按类型撮合函数, 检索两类数组中的全部成员, 剩余步骤与按类型撮合函数相同。

③ 交易函数。该函数被按类型匹配函数和按低成本报价匹配函数共同调用。若交易双方资金充足, 则到交易结算阶段确认交易, 自动进行资金转移并存储交易结果。否则取消该次交易。

5) 余量平衡与奖励模块。余量平衡模块的交易对象包括全部参与平台的交易主体, 该模块按交易主体的不同划分为 3 个主要功能函数。

① 读表函数。电表向智能合约提交用户上一周期 T_{i-1} 真实的发/用电量, 因此必须保证电表数据真实可靠。设计读表函数的目的在于将用户与电网公司提供的唯一电表进行绑定, 电表与用户一样, 访问智能合约都需要通过以太坊账户访问, 因此电表也有一串特定的账户地址。绑定电表函数只能由系统管理者访问, 输入用户地址、电表标识码和电表地址对用户和电表进行绑定。其中, 电表标识码为电表的编号, 是证明电表唯一性的特征字符。读表函数由电表直接访问, 通过应用层向智能合约输入当前电表标识符和该用户上一周期的实际发/用电量, 将上一周期实际发/用电量存储在区块中。

② 余量平衡函数。智能合约根据电表实际电量与产消者上一交易周期 T_{i-1} 的中标电量之间的偏差电量进行余量平衡。

③ 奖励函数。智能合约根据电表实际电量与产消者上一交易周期 T_{i-1} 的申报电量之间的偏差电量进行奖励, 自动进行资金转移并存储结果。

3 算例仿真

为验证本文所设计机制的有效性以及经济性, 按照第 2 节所示交易平台的架构搭建分布式电力交易仿真平台, 进行交易仿真测试。实验应用场景一共有 6 个用户, 包括 1 个储能, 1 个光伏, 1 个可控电源, 2 个常规负荷 A 和 B, 以及 1 个电动汽车。其中, 储能和光伏设置为绿电生产者, 常规负荷 A 设定为绿电消费者, 可控电源设定为非绿电生产者, 常规负荷 B 与电动汽车设定为非绿电消费者。

在仿真测试中, 一个交易周期为 $\Delta T=15 \text{ min}$, 产消者每 15 min 提交一次交易申报需求。0~3 min 为密封报价阶段; 3~10 min 为 P2P 交易撮合阶段; 10~13 min 为偏差余量平衡阶段; 13~15 min 为交易结算与奖励阶段。

为了鼓励产消者参与分布式电力交易, 同时兼顾买卖双方的各方利益, 将式(7)中的奖励因子 b 设为 0.02, 为引导消费者购买绿电, 促进可再生能源消纳, 将绿电奖励因子 G 设为 1.08。9:00 时各产消者的申报情况如表 1 所示, 其中申报量为正数表示出售电量, 申报量为负数表示购买电量。

由于在绿电购电队列中常规负荷 A 报价最高, 优先进行撮合配对, 在绿电售电队列中根据报价的排列顺序为: 光伏、储能、常规负荷 A 依次与光伏和储能进行撮合, 直到满足购电需求, 且常规负荷 A 的报价均高于光伏和储能的报价, 因此均能撮合成功。又由于常规负荷 A 申报的购电量 125 kWh 大于光伏和储能申报的总售电量 108 kWh, 剩余 17

kWh 电量继续进入非绿电购电队列等待撮合。由于在非绿电购电队中常规负荷 B 报价最高, 首先进行撮合配对。每次交易的电价取交易双方报价的均值。本周期的最终交易撮合结果如表 2 所示。

表 1 9:00 时各产消者的申报情况

Table 1 Declaration information of each prosumers at 9:00

用户	申报量/ kWh	报价/ (元/kWh)	报价加密结果
储能	56	0.437	e17997cddb78cc32acf 194ebed9a98be9980c5f
光伏	52	0.434	3df8be712a6f80902014 59d2e5baf753a51568a9
可控电源	154	0.438	590587a7deb24075cb97 e9bbe094c1dc2f2f905c
常规负荷 A	-125	0.623	6268b0a11de9e888c5aa 6a1f4c03db8d8d54817b
常规负荷 B	-121	0.515	5b1ef77223835a33370 b23ff0e17fe714122fcf7
电动汽车	-29	0.440	69960f531dedbc8d391c 886dc9abc828e7dc3f8

表 2 9:10 时撮合结果

Table 2 Matchmaking results at 9:10

交易序号	交易双方	交易电量/kWh	交易电价/ (元/kWh)
1	光伏 常规负荷 A	52	0.528
2	储能 常规负荷 A	56	0.530
3	可控电源 常规负荷 B	121	0.476
4	可控电源 常规负荷 A	17	0.530
5	可控电源 电动汽车	16	0.439

不考虑产消者的预测偏差时, 本次交易结算及奖励结果如表 3 所示。其中奖励收益率为产消者获得的奖励数额与交易数额的百分比, 此时奖励收益率仅与产消者的能源类型有关。生产(或购买)能源类型相同的产消者获得的收益率相同。绿电产消者售卖电成本较高, 而奖励收益率也较高。

表 3 不考虑余量平衡时的结算结果

Table 3 Settlement results without equilibrium margin

用户	交易电 量/kWh	平均交易价 格/(元/kWh)	奖励数 额/元	净收 益/元	奖励收 益率/%
储能	56	0.530	0.641	30.321	2.16
光伏	52	0.528	0.593	28.049	2.16
可控电源	138	0.478	1.319	67.283	2.00
常规负荷 A	125	0.529	1.428	67.553	2.16
常规负荷 B	121	0.476	1.152	58.748	2.00
电动汽车	16	0.439	0.140	7.164	2.00

考虑到产消者出力(负荷)预测一般存在误差, 在 10:15 时, 电网平衡产消者的发/用电余量, 产消者分别与公共电网交易偏差余量。

以可控电源和常规负荷 A 的交易为例, 可控电源的平均交易价格为 $C_{\text{cps}}=0.478$ 元/kWh, 常规负荷 A 的平均交易价格为 $C_{\text{cl}}=0.529$ 元/kWh, 交易数额分别为 65.964 元和 66.125 元。假设此时电网电价 C_{bg} 为 0.7 元/kWh, 向电网售电价格 C_{sg} 为 0.3 元/kWh, 且产消者均存在 $\pm 5\%$ 的偏差余量, 以此假设条件将得到下述计算结果。可控电源的偏差余量 $|\Delta Q|=6.9$ kWh, 当发电量小于交易电量时, 需要向电网购买电量 6.9 kWh, 则平衡损失为 $|\Delta Q| \times (C_{\text{bg}} - 0.478) = 1.532$ 元; 当发电量大于交易电量时, 多发电量 6.9 kWh 需要向电网销售, 则其平衡损失为 $|\Delta Q| \times (0.478 - C_{\text{sg}}) = 1.228$ 元。常规负荷 A 的偏差余量 $|\Delta W|=6.25$ kWh, 当消耗电量小于交易电量时, 多购买的电量不能退款, 相当于损失 $|\Delta W| \times 0.529 = 3.306$ 元; 当消耗电量大于交易电量时, 需要向电网买电, 则其平衡损失为 $|\Delta W| \times (C_{\text{bg}} - 0.529) = 1.069$ 元。

为进一步研究偏差余量对产消者的经济影响, 分别计算了不同偏差余量下产消者的经济损失率, 如图 3 所示。结合表 4 可知, 当偏差余量的范围较小时, 奖励数额有可能大于平衡损失, 此时产消者

表 4 考虑余量平衡时的结算结果

Table 4 Settlement results with equilibrium margin

用户	偏差量/ kWh	平衡 损失/元	奖励 数额/元	净损 失/元	经济损 失率/%
可控 电源	6.9	1.228	1.236	-0.008	-0.012
	-6.9	1.532	1.089	0.443	0.672
常规 负荷 A	6.25	1.069	1.357	-0.288	-0.436
	-6.25	3.306	1.353	1.953	2.954

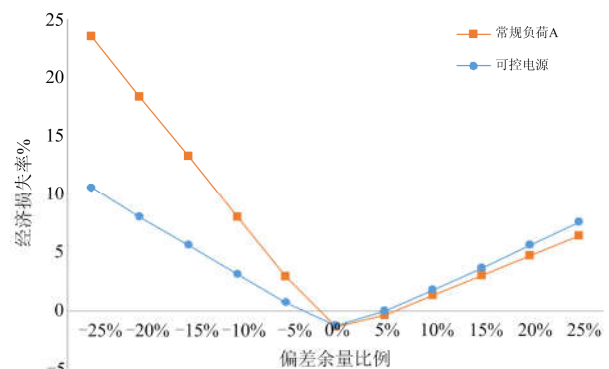


图 3 不同偏差余量下产消者的经济损失率

Fig. 3 Economic loss rate of prosumers under different deviation margin

仍有经济收益。当偏差余量增大时, 平衡损失逐渐增大而奖励数额逐渐减少, 可控电源和常规负荷 A 的经济损失率与偏差余量百分比的绝对值呈正相关。显然, 偏差余量会对产消者造成经济损失, 偏差余量越大则经济损失越大。因此, 为了增加经济效益, 产消者应尽量减少偏差余量。

4 结论

本文分析了电力现货市场交易的特点, 提出了一种可以进行点对点撮合交易的电力分布交易机制。根据交易机制, 基于以太坊设计了包含硬件层、区块链层、应用层的分布式电力交易平台。仿真结果验证了交易机制的合理性, 并促进了绿电消纳。

区块链技术的去中心化、去信任、可编程和不可篡改等特性, 使其在电力现货交易里具有广阔的应用前景。但是, 目前的区块链技术研究和基础理论还处于初级阶段, 关于安全校验、能源调度等问题还有待进一步探索。

参考文献

- [1] CHEN H, WANG X, LI Z, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(4): 151-158. DOI: 10.1186/s41601-019-0128-2.
- [2] 石帮松, 张靖, 李博文, 等. 多类型售电公司共存下竞价售电的市场均衡研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(5): 62-67.
SHI Bangsong, ZHANG Jing, LI Bowen, et al. Market equilibrium study on multiple types of electric power retailers bidding[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 62-67.
- [3] 史连军, 邵平, 张显, 等. 新一代电力市场交易平台架构探讨[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(24): 67-76.
SHI Lianjun, SHAO Ping, ZHANG Xian, et al. Discussion on architecture of new-generation electricity trading platform[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(24): 67-76.
- [4] 周海明, 刘超群, 刘敦楠, 等. 能源互联网选择权放开交易研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(21): 5412-5417.
ZHOU Haiming, LIU Chaoqun, LIU Dunnan, et al. Internet option open energy trading research[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(21): 5412-5417.
- [5] 冯伟林. 现货与期货交易并存的电力市场理论建模与实证研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
FENG Weilin. Theoretic modeling and empirical research of electricity market with spot and futures trade[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [6] FORFIA D, KNIGHT M, MELTON R. The view from the top of the mountain: building a community of practice with the GridWise transactive energy framework[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2016, 14(3): 25-33.
- [7] TUSHAR W, YUEN C, MOHSENIAN-RAD H, et al. Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading the potential of game-theoretic approaches[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, 35(4): 90-111.
- [8] 陈亦杰, 刘故帅, 张忠会. 考虑电动汽车群和新增实体的电力市场多方交易策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 33-40.
CHEN Yijie, LIU Gushuai, ZHANG Zhonghui. A study on multi-party trading strategy of electricity market considering electric vehicle group and new entity[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 33-40.
- [9] AMIN U, HOSSAIN M J, LU JUNWEI, et al. Cost-benefit analysis for proactive consumers in a microgrid for transactive energy management systems[C] // 2016 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), September 25-28, 2016, Brisbane, Australia: 1-6.
- [10] 朱文广, 熊宁, 钟士元, 等. 基于区块链的配电网电力交易方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(24): 165-172.
ZHU Wenguang, XIONG Ning, ZHONG Shiyuan, et al. Power trading method for distribution network based on block chain[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 165-172.
- [11] HUANG P, KALAGNANAM J, NATARAJAN R, et al. Analytics and transactive control design for the pacific northwest smart grid demonstration project[C] // 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 4-6, 2010, Gaithersburg, USA: 449-454.
- [12] 杨德昌, 赵肖余, 徐梓潇, 等. 区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(13): 3664-3671.
YANG Dechang, ZHAO Xiaoyu, XU Zixiao, et al. Developing status and prospect analysis of blockchain in energy internet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3664-3671.
- [13] ALAM M T, LI H, PATIDAR A. Bitcoin for smart trading in smart grid[C] // The 21st IEEE International Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, April 22-24, 2015, Beijing, China: 1-2.
- [14] 王安平, 范金刚, 郭艳来. 区块链在能源互联网中的应用[J]. *电力信息与通信技术*, 2016, 14(9): 1-6.

- WANG Anping, FAN Jingang, GUO Yanlai. Application of blockchain in energy interconnection[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016, 14(9): 1-6.
- [15] 李彬, 曹望璋, 祁兵, 等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 736-744.
- LI Bin, CAO Wangzhang, QI Bing, et al. Overview of application of block chain technology in ancillary service market[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 736-744.
- [16] 曾鸣, 程俊, 王雨晴, 等. 区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3672-3681.
- ZENG Ming, CHENG Jun, WANG Yuqing, et al. Primarily research for multi module cooperative autonomous mode of energy internet under blockchain framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681.
- [17] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在大用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
- OUYANG Xu, ZHU Xiangqian, YE Lun, et al. Preliminary applications of blockchain technique in large consumers direct power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [18] SABOUNCHI M, WEI J. Towards resilient networked microgrids: blockchain-enabled peer-to-peer electricity trading mechanism[C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-5.
- [19] MIHAYLOV M, JURADO S, AVELLANA N, et al. NRGcoin: virtual currency for trading of renewable energy in smart grids[C] // 11th International Conference on the European Energy Market (EEM14), May 28-30, 2014, Krakow, Poland: 1-6.
- [20] 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.
- [21] 武赓, 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.
- [22] 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.
- [23] 国家能源局. 关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL]. [2018-03-20]. http://www.nea.gov.cn/2017-12/27/c_136855153.htm.
- National Energy Administration. Notice on piloting market-based trading of distributed generation[EB/OL]. [2018-03-20]. http://www.nea.gov.cn/2017-12/27/c_136855153.htm.
- [24] 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.
- LI Bin, QIN Qiuyue, QI Bing, et al. Design of distributed energy trading scheme based on blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 961-972.
- [25] HIROSE S, KUWAKADO H. Redactable signature scheme for tree-structured data based on Merkle tree[C] // 2013 International Conference on Security and Cryptography (SECRYPT), July 29-31, 2013, Reykjavik, Iceland: 1-8.
- [26] 贺宜恒, 周明, 武昭原, 等. 国外典型电力平衡市场的运作模式及其对中国的启示[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3520-3528.
- HE Yiheng, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Study on operation mechanism of foreign representative balancing markets and its enlightenment for China[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3520-3528.

收稿日期: 2019-08-01; 修回日期: 2019-10-23

作者简介:

孟仕雨(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、分布式能源; E-mail: mengsy6731@126.com

孙伟卿(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为智能电网、电力系统评估与优化; E-mail: sidswq@163.com

韩冬(1984—), 男, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力系统优化、电力市场。E-mail: han_dong@usst.edu.cn

(编辑 张爱琴)