

基于智能合约的多微电网市场化交易模型及算法

李芬¹, 李瑾², 仵松颀², 张森林², 陆月明²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 北京邮电大学网络空间安全学院, 北京 100876)

摘要: 针对传统的输配电网集中方式管理运行存在的成本高、效率低、透明度低等问题, 及多微电网中各博弈主体利益最大化需求, 建立公平的竞价规则及多目标动态规划模型。利用区块链可信账本和智能合约技术, 形成去中心化、透明开放、信息对称的市场化交易模型, 保证各方主体利益。对所构建的交易模型及求解算法进行仿真分析, 结果表明, 模型分配策略可有效平衡市场主体利益, 验证了该竞价规则在多微电网市场化交易场景下具有适用性和有效性。

关键词: 区块链; 多微电网; 智能合约; 市场化交易

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2020023

Multi-microgrid marketized transaction models and algorithms based on smart contracts

LI Fen¹, LI Jin², WU Songqi², ZHANG Senlin², LU Yueying²

1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., LTD, Shenzhen 518000, China

2. School of Cyberspace Security, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Facing the problems of high cost, low efficiency and low transparency existing in the traditional transmission and distribution networks under the centralized management, and the demand for maximizing the interests of all players in the multi-microgrid system, a fair bidding rule and multi-objective dynamic planning model were established. Using blockchain trusted ledger and smart contract technology, a decentralized, transparent, open and information symmetrical market-oriented transaction model was established to ensure the interests of all parties. The simulation results show that the model allocation strategy can effectively balance the interests of market participants, and verify the applicability and effectiveness of the bidding rules in multi microgrid market-oriented transaction.

Key words: blockchain, multi-microgrid, smart contract, market-oriented transaction

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-03-20

通信作者: 陆月明, ymlu@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金 (2019YFB2102400)

Foundation Item: The National Key R&D Program of China (2019YFB2102400)

论文引用格式: 李芬, 李瑾, 仵松颀, 等. 基于智能合约的多微电网市场化交易模型及算法[J]. 网络与信息安全学报, 2020, 6(4): 56-66.

LI F, LI J, WU S Q, et al. Multi-microgrid marketized transaction models and algorithms based on smart contracts[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2020, 6(4): 56-66.

1 引言

随着能源互联网的发展, 电力市场化改革的推进, 以及分布式发电、储能、电动汽车、需求侧响应的普及, 大量消费者转化为产消者, 为使可再生能源能够实现全部消纳, 减少能量过程中的损耗, 以新能源发电、低碳交通和信息技术高度融合的能源互联网, 为各类能源主体的加入和规模化生产利用提供了有效的解决方案^[1]。随着智能电网技术的推进和储能技术的发展, 大量独立决策产销者的接入将会产生新的商业模式, 由多个微电网组成的局域微电网系统形成能源互联网的一种典型子网^[2], 局域多微电网在电力市场中也将产生新的市场主体, 如分布式聚合商, 这使市场主体类型不再固定不变, 而是以更加灵活的形式呈现, 电力市场中的竞争日趋复杂。多微电网市场化交易中的一个关键问题在于如何设计安全、透明、高效、公平的交易模式和方法。现有研究对参与者组成、系统框架及交易模式提出了诸多提议^[3], 大多数认为应依照电力市场交易的经验建立交易中心, 采取集中式的市场化交易方式。然而, 配电网内的产销者具有数量庞大、单比交易规模较小、拥有发用电完全控制权、发用电特性不明显、报价策略不稳定等特点, 且各产销者对交易模式的公平性、私密性要求更高。

为了解决集中交易中可能出现的相关问题, 在现有能源物联网研究的基础上, 引入了区块链技术。区块链技术的核心是以去中心化、公开透明的方式运行和维护一个可靠的分布式数据系统, 从而减少传统分布式系统成本高、效率低、存储不安全等问题^[4], 针对能源的分布式资源交易、信誉评估、需求响应、电厂运行维护等是区块链可应用的场景^[5]。目前, 国内外一些企业已经尝试将区块链技术与能源领域结合起来^[6]; 早期的研究主要集中于区块链与其他领域的兼容性^[7-8]; 文献[9]研究和分析了基于区块链技术的能源交易的安全和隐私风险; 文献[10]提出了在能源互联网中区块链技术的兼容性分析和研究框架; 文献[11]建立了去中心化的能源博弈模型, 探讨了分布式资源安全的验证方法; 文献[12]提出了配电网多请求多响应报价的分布式多交易模

式。上述研究已取得了良好的效果, 但大部分项目仍存在中心机构, 且未考虑去中心化的交易体制以及智能合约的实现方法。如何建立分散式的电力交易模式, 搭建基于区块链的去中心化交易平台, 在保证各方利益平衡的条件下, 寻求有效的电力交易管理方式, 构建分布式能源多微电网市场交易模型和求解算法, 对配电网与能源互联网络技术的发展具有重要的意义和实用价值。

区块链技术作为分布式系统中的一个重要模块, 具有去中心化、能够建立交易双发的信任关系, 使其更好地应用于数据分析和最终决策。通过建立公平的竞价规则及多目标动态规划化模型, 在综合分析微电网运营商、分布式聚合商和用电大用户等市场主体需求及收益等基础上, 针对各方主体利益最大化这一复杂多目标优化问题, 对电能进行分配求解。利用区块链的可信账本和智能合约程序执行机制, 在 Fabric 超级账本技术框架上构建包含微电网运营商、分布式聚合商和用电大用户等市场主体的联盟链, 并将竞价规则及多目标动态规划化模型转化成智能合约部署在联盟链上, 对所构建的交易模型及求解算法进行仿真分析。结果表明, 基于所提模型得到的各时段电能分配策略可有效平衡市场各主体利益, 验证了该竞价规则在多微电网市场化交易应用场景下具有适用性和有效性。

2 多微电网市场主体数学模型

在多微电网系统中, 为了追求自身利益最大化, 参与市场博弈的微电网运营商、分布式聚合商以及用电大用户三方主体会通过制定不同阶段的不同购售电策略来影响市场变化。微电网运营商的主要交易行为是生产和售卖电量, 当自身系统发生缺电时, 需向分布式聚合商或其他微电网运营商购取电量; 分布式聚合商的主要交易是收集并存储分布式用户的分散电能, 通过购销差价赚取响应利润; 用电大用户则只考虑以较低成本获取所需电量, 如何在交易机制支撑下的市场条件中通过竞争获取超额利润, 是各方主体最关心的问题。

2.1 市场公平交易机制

为确保多微电网各主体市场化交易的公平

性、透明性及信息有效性,在保证各方参与主体利益的同时,促进电能量生产成本不断降低及环保用电方式发展,本文设计以最小化购电花费为目标,优先满足集中、集约、环保行业用电、分布式聚合商电量合理存储的市场公平交易机制分配电量,满足合理用电量的同时最小化发电投入和电能量的浪费。具体市场公平交易规则如下:

- ① 多微电网市场主体在各阶段仅充当购电或售电一种主体参与交易;
- ② 根据售电方价格排序,优先满足低价格销售;
- ③ 根据购电方用量排序,优先满足大负荷购买;
- ④ 分布式聚合商会保证获得一定配额,可以在卖电量充足时,辅助存储电量,在购电需求旺盛时,缓解电能量供应压力;
- ⑤ 各售电方主体根据政府发布可再生能源发电补贴,自主调整各发电方式配比。

2.2 售电方收益模型

由于售电方内部可能含有间歇式能源(如风电、太阳能等),在 t 到 $t+\Delta t$ 期间,对外通常呈现多余电量。当系统有富余电量时,各方主体为了追求自身利益最大化向其他微电网运营商、分布式聚合商、用电大用户出售电量获取收益 $R_{\text{sell}}(t)$ 。另外,由于区块链技术下多微电网市场具有严格的奖惩机制,售电方还需要考虑提升可再生能源利用率带来的奖励收益 $R_{\text{reward}}(t)$,以及额外碳排放造成的惩罚成本 $C_{\text{punish}}(t)$ 等。

大用户售电收益如式(1)所示。

$$R_{\text{sell}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{\text{to-}O}} P_{\text{sell}}^{\text{to-}O_i}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{to-}O_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{\text{to-}A}} P_{\text{sell}}^{\text{to-}A_i}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{to-}A_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{\text{to-}C}} P_{\text{sell}}^{\text{to-}C_i}(t) Q_{\text{sell}}^{\text{to-}C_i}(t) \quad (1)$$

可再生能源利用收益如式(2)所示。

$$R_{\text{reward}}(t) = (U_{\text{re}}(t) - U_{\text{re0}}) \cdot R_{\text{rate}}(t) \quad (2)$$

碳排放惩罚成本如式(3)所示。

$$C_{\text{punish}}(t) = (H_{\text{CO}_2}(t) - H_{\text{CO}_20}) \cdot C_{\text{rate}}(t) \quad (3)$$

其中, $N_{\text{sell}}^{\text{to-}O}$ 表示参与购电的微电网运营商数量, $P_{\text{sell}}^{\text{to-}O_i}(t)$ 表示该时段出售给第 i 个微电网运营商 O_i 价格, $Q_{\text{sell}}^{\text{to-}O_i}(t)$ 表示该时段出售给第 i 个微电网运营商 O_i 电量; $N_{\text{sell}}^{\text{to-}A}$ 代表参与购电的分布式聚合商数量, $P_{\text{sell}}^{\text{to-}A_i}(t)$ 表示该时段出售给第 i 个分布式

聚合商 A_i 价格, $Q_{\text{sell}}^{\text{to-}A_i}(t)$ 表示该时段出售给第 i 个分布式聚合商 A_i 电量; $N_{\text{sell}}^{\text{to-}C}$ 表示参与购电的用电大用户数量, $P_{\text{sell}}^{\text{to-}C_i}(t)$ 表示该时段出售给第 i 个用电大用户 C_i 价格, $Q_{\text{sell}}^{\text{to-}C_i}(t)$ 表示该时段出售给第 i 个用电大用户 C_i 电量。 $U_{\text{re}}(t)$ 表示该时段供电可再生能源利用率, U_{re0} 为供电可再生能源标准利用率, $R_{\text{rate}}(t)$ 为系统奖励系数。 $H_{\text{CO}_2}(t)$ 表示该时段供电系统所产生的碳排放量, H_{CO_20} 表示供电系统标准的碳排放量, $C_{\text{rate}}(t)$ 为系统惩罚系数。

2.3 购电方成本模型

微电网运营商及分布式聚合商其自身产生电量或存储电量不一定与自身负荷平衡,对外呈现缺少电量。当系统缺电时,各参与主体会考虑向外界购电以保证自身负荷供电而产生购电成本 $C_{\text{buy}}(t)$,针对分布式聚合商购电还需考虑储能运行成本 $C_{\text{storage}}(t)$ 。

购电成本如式(4)所示。

$$C_{\text{buy}}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{buy}}^{\text{from-}O}} P_{\text{buy}}^{\text{from-}O_i}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{from-}O_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{buy}}^{\text{from-}A}} P_{\text{buy}}^{\text{from-}A_i}(t) Q_{\text{buy}}^{\text{from-}A_i}(t) \quad (4)$$

储能运行成本如式(5)所示。

$$C_{\text{storage}}(t) = c_{\text{storage}}(t) \cdot Q_{\text{storage}}(t) \quad (5)$$

其中, $N_{\text{buy}}^{\text{from-}O}$ 表示参与售电微电网运营商数量, $P_{\text{buy}}^{\text{from-}O_i}(t)$ 表示该时段从第 i 个微电网运营商 O_i 购电的价格, $Q_{\text{buy}}^{\text{from-}O_i}(t)$ 表示该时段从微电网运营商 O_i 购电的数量; $N_{\text{buy}}^{\text{from-}A}$ 表示参与售电分布式聚合商数量, $P_{\text{buy}}^{\text{from-}A_i}(t)$ 表示该时段从第 i 个分布式聚合商 A_i 购电的价格, $Q_{\text{buy}}^{\text{from-}A_i}(t)$ 表示该时段从第 i 个微电网运营商 A_i 购电的数量; $c_{\text{storage}}(t)$ 表示该时段分布式聚合商存储单位电能费用, $Q_{\text{storage}}(t)$ 表示当前时间段分布式聚合商存储电能数量。

2.4 目标函数

微电网运营商、分布式聚合商和用电大用户三方主体的竞争博弈目标是使自身利益最大化,即以最小成本获取最大效益,各主体的目标函数具体描述如下。

微电网运营商的目标函数如式(6)所示。

$$\max(R_O(t)) = \max(R_{\text{sell}}(t) + R_{\text{reward}}(t) - C_{\text{punish}}(t) - C_{\text{buy}}(t)) \quad (6)$$

其中, $R_O(t)$ 表示微电网运营商收益。

分布式聚合商的目标函数如式(7)所示。

$$\max(R_A(t)) = \max(R_{\text{sell}}(t) - C_{\text{buy}}(t) - C_{\text{storage}}(t)) \quad (7)$$

其中, $R_A(t)$ 表示分布式聚合商收益。

用电大用户的目标函数如式(8)所示。

$$\min(C_C(t)) = \min(C_{\text{buy}}(t)) \quad (8)$$

其中, $C_C(t)$ 表示用电大用户花费。

2.5 约束条件

(1) 微电网运营商约束条件

售电量约束如式(8)所示。

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-O}} Q_{\text{sell}}^{to-O_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-A}} Q_{\text{sell}}^{to-A_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-C}} Q_{\text{sell}}^{to-C_i}(t) \leq \sum_{i=1}^{N_M} Q_M^{M_i}(t) - \sum_{i=1}^{N_L} Q_{\text{load}}^{L_i}(t) \quad (9)$$

其中, N_M 表示该微电网运营商发电节点数量, $Q_M^{M_i}(t)$ 表示第 i 个发电节点该时段最大发电量, N_L 表示该微电网运营商负荷节点数量, $Q_{\text{load}}^{L_i}(t)$ 表示第 i 个负荷点该时段负荷电量。

售电价约束如式(10)~式(12)所示。

$$P_{\min}^O \leq P_{\text{sell}}^{to-O}(t) \leq P_{\max}^O \quad (10)$$

$$P_{\min}^A \leq P_{\text{sell}}^{to-A}(t) \leq P_{\max}^A \quad (11)$$

$$P_{\min}^C \leq P_{\text{sell}}^{to-C}(t) \leq P_{\max}^C \quad (12)$$

其中, $P_{\min}^O$ 表示各方主体出售给微电网运营商的最低价格, $P_{\max}^O$ 表示各方主体出售给微电网运营商的最高价格; $P_{\min}^A$ 表示各方主体出售给分布式聚合商的最低价格, $P_{\max}^A$ 表示各方主体出售给分布式聚合商的最高价格; $P_{\min}^C$ 表示各方主体出售给用电大用户的最低价格, $P_{\max}^C$ 表示各方主体出售给用电大用户的最高价格。

购电量约束如式(13)所示。

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{buy}}^{from-O}} Q_{\text{buy}}^{from-O_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{buy}}^{from-A}} Q_{\text{buy}}^{from-A_i}(t) \leq \sum_{i=1}^{N_L} Q_{\text{load}}^{L_i}(t) \quad (13)$$

购电价格约束如式(14)、式(15)所示。

$$P_{\min}^O \leq P_{\text{buy}}^{from-O}(t) \leq P_{\max}^O \quad (14)$$

$$P_{\min}^A \leq P_{\text{buy}}^{from-A}(t) \leq P_{\max}^A \quad (15)$$

(2) 分布式聚合商约束条件

售电量约束条件如式(16)所示。

$$0 \leq \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-O}} Q_{\text{sell}}^{to-O_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-A}} Q_{\text{sell}}^{to-A_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-C}} Q_{\text{sell}}^{to-C_i}(t) \leq Q_{\text{storage}}^A(t - \Delta t) - \sum_{i=1}^{N_L} Q_{\text{load}}^{L_i}(t) \quad (16)$$

其中, $Q_{\text{storage}}^A(t - \Delta t)$ 为该分布式聚合商上时段存储电量。

售电价约束条件如式(17)~式(19)所示。

$$P_{\min}^O \leq P_{\text{sell}}^{to-O}(t) \leq P_{\max}^O \quad (17)$$

$$P_{\min}^A \leq P_{\text{sell}}^{to-A}(t) \leq P_{\max}^A \quad (18)$$

$$P_{\min}^C \leq P_{\text{sell}}^{to-C}(t) \leq P_{\max}^C \quad (19)$$

购电量约束条件如式(20)所示。

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{buy}}^{from-O}} Q_{\text{buy}}^{from-O_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{buy}}^{from-A}} Q_{\text{buy}}^{from-A_i}(t) \leq Q_{\text{storage}}^A(t) + \sum_{i=1}^{N_L} Q_{\text{load}}^{L_i}(t) \quad (20)$$

其中, $Q_{\text{storage}}^A(t)$ 为该时段分布式聚合商的最大存储电量。

购电价约束条件如式(21)、式(22)所示。

$$P_{\min}^A \leq P_{\text{buy}}^{from-O}(t) \leq P_{\max}^A \quad (21)$$

$$P_{\min}^A \leq P_{\text{buy}}^{from-A}(t) \leq P_{\max}^A \quad (22)$$

(3) 用电大用户约束条件

购电价约束条件如式(23)、式(24)所示。

$$P_{\min}^C \leq P_{\text{buy}}^{from-O}(t) \leq P_{\max}^C \quad (23)$$

$$P_{\min}^C \leq P_{\text{buy}}^{from-A}(t) \leq P_{\max}^C \quad (24)$$

(4) 系统总功率平衡如式(25)、式(26)所示。

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-O}} Q_{\text{sell}}^{to-O_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-A}} Q_{\text{sell}}^{to-A_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{sell}}^{to-C}} Q_{\text{sell}}^{to-C_i}(t) = \sum_{i=1}^{N_{\text{buy}}^{from-O}} Q_{\text{buy}}^{from-O_i}(t) + \sum_{i=1}^{N_{\text{buy}}^{from-A}} Q_{\text{buy}}^{from-A_i}(t) \quad (25)$$

$$R_{\text{sell}}(t) = C_{\text{buy}}(t) \quad (26)$$

3 基于超级账本的智能合约市场化交易模型

3.1 基于区块链的多微电网市场结构

区块链技术是大数据时代技术飞速发展的产物,通过块链式数据结构和分布式节点共识算法存储并维护网络数据,采用密码学技术保证数据传输和访问的安全性,使用由自动化脚本组成的智能合约来编程和操作数据,其本质上是一个去中介化的数据库。如图1所示,其基本单元结构为区块,每个区块由区块头和区块主体组成,区块头的内容包括版本号、前一区块 Hash 值、Merkle 根、时间戳、难度值、随机数等区块间链接的外部信息;区块主体主要存储区块内所有交易数据的统一哈希值,呈 Merkle 树结构排列,用于数据处理与分析,为用户提供决策方案。各个区块主体在时间维度上形成了区块链,行间链路表示区块主体之间的互联,在时间维度上形成了块网络,增强了信息的可追踪性和安全可靠。

随着多微电网市场化的兴起和发展,区块链技术的引入可以有效地构建能源与互联网的双赢生态圈,区块链网络与多微电网市场化交易的契合度。区块链根据接入模式的不同主要分为3种:公有链、私有链和联盟链。其中,公有链是完全去中心化的区块链,各方主体都可以访问并处理数据节点,其安全性完全由共识机制作为保障,具有完全去中心化、去信任化等特点,但其完全匿名化的交易方式并不适用于电力市场化交易;

私有链则是完全中心化的区块链,其网络链式机构及接入模式完全由私人控制,适用于内部结构的数据的内部管理及审计工作等;联盟链是部分去中心化的区块链,由部分授权节点完成共识,并通过对各方节点的公私钥控制及权限控制实现监管,适用于由多个组织或联盟参与的市场化交易。

随着市场对区块链的接受程度、区块链价值的认可程度的提高,区块链逐步向电力市场的各个主体渗透,在微电网运营商、分布式聚合商、用电大用户、政府等多种实体参与下,形成电网市场化交易联盟链,如图2所示。

联盟链将各主体以分布式点对点等网的方式连接起来,其结算规则通过数字化编码写入区块链,电力公司技术人员可对链中节点进行权限设置,具有特定权限的人可对节点上的数据信息进行修改,其共识机制由特定部分节点完成;智能电网、电网监控系统等数据提取部门将所提取数据上链;政府、银行、审计公司等单位作为监管协助部门完成发布政策、监管审计等工作;微电网运营商、分布式聚合商、用户等发售电方在已有的联盟链上进行协商签订智能合约,合约中约定的条件事项发生将触发合约执行,保存与合约相关的交易哈希及时间戳、支付验证等信息入链。相较于公有链在保证安全性的前提下,联盟链具有共识时间短、可拓展性强、具有可调整性等特点,同时便于进行查询、审计、统计等中心化操作。

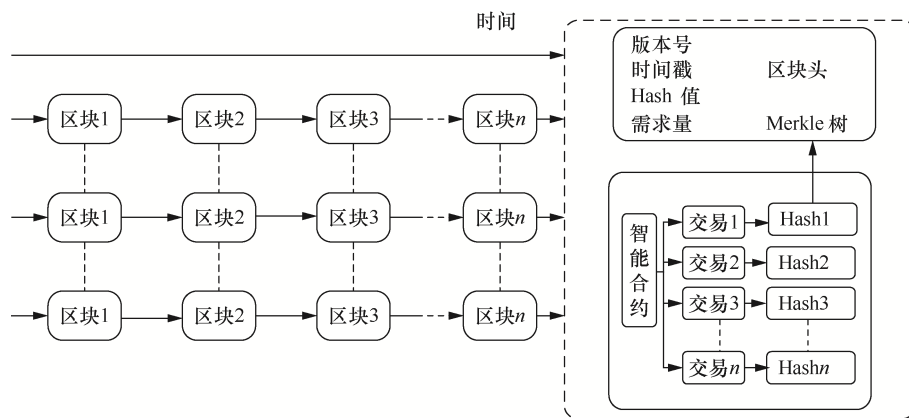


图1 数据区块主体图

Figure 1 The main figure of the data block

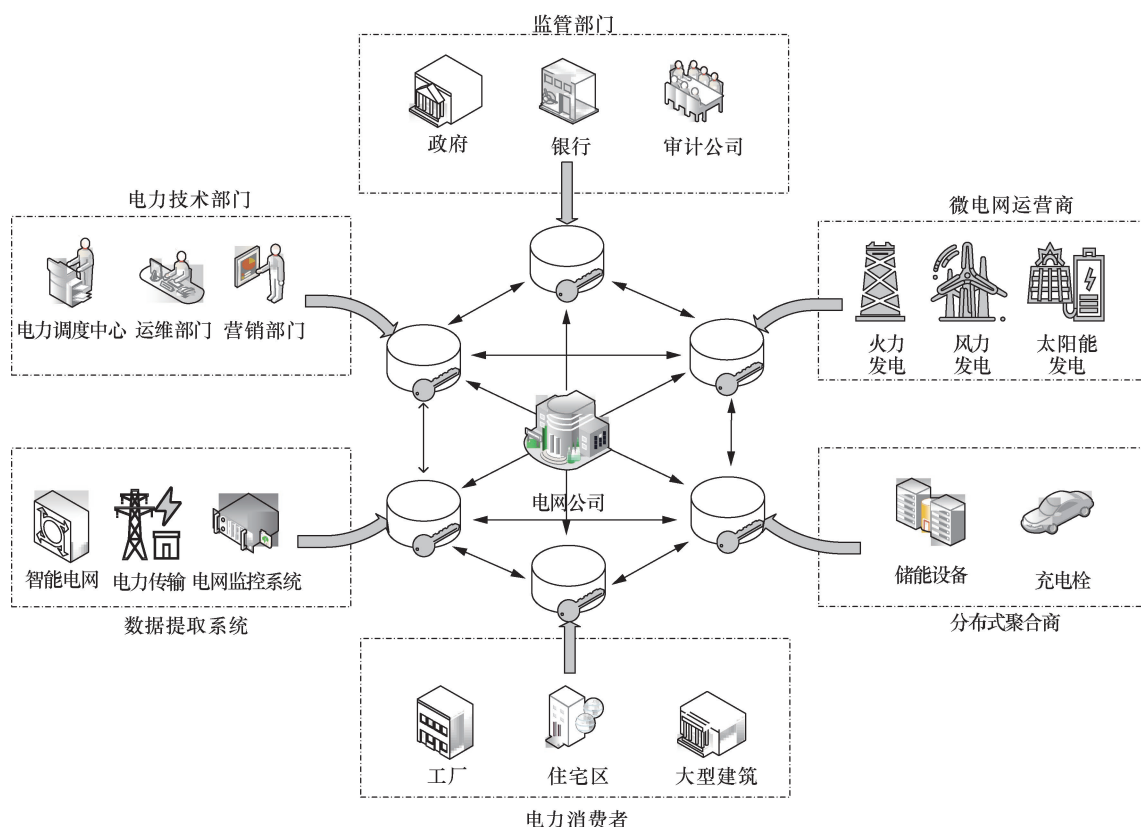


图 2 基于联盟链的多微电网市场化交易联盟链

Figure 2 Multi-microgrid market-based trading alliance chain based on alliance chain

3.2 超级账本智能合约

超级账本 (hyperledger) 是一个促进区块链跨行业应用的开源项目, 其目标是开发区块链和分布式记账系统的跨行业发展和协作, 以支持主要技术、金融和供应链公司的全球业务交易。该项目将采用框架方式和专用模块, 并继承独立的开放协议和标准, 包括区块链的共识机制和存储模式, 以及身份服务、访问控制和智能合约。如图 3 所示, 超级账本系统架构支持应用程序接口 (API, application programming interface)、软件开发工具包 (SDK, software development kit)、命令行界面 (CLI, command-line interface) 接口进行顶层访问。从内部角度来看, 其主要包括身份认证服务 (membership service)、区块链服务 (blockchain service)、链码服务 (chain-code service) 3 个模块。

身份认证服务本质上是身份管理, 它验证并授予网络成员的身份。Fabric 身份识别为整个区块链网络提供身份管理、隐私、保密和可审核的

服务, 通过公钥基础设施 PKI 和去中心化共识机制, 将非授权区块链转化为授权区块链。目前, 它是设计上最接近联盟链思想的区块链, 提高了商业应用的安全性、隐私性、监督性、审计性和性能要求。

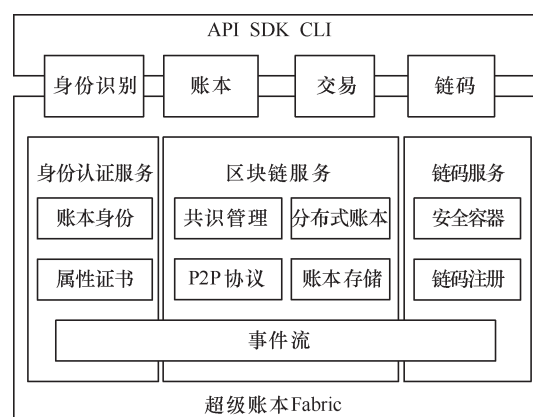


图 3 超级账本系统架构

Figure 3 Super ledger system architecture

区块链服务主要包括 3 个重要模块: 共识管理、分布式账本和 P2P 协议。共识管理主要负责

验证新的交易提案和出块的正确性,且依赖于链码模块。分布式账本主要包括区块链和状态两部分,其利用一系列的连锁区块链记录历史交易,并记录对应账本的最新状态,形成一个 key-value (K-V) 数据库。P2P 协议组件主要提供数据流、流量控制和单一复用请求功能。

链码服务也可被称为 Fabric 的智能合约,使用一段代码处理网络成员所同意的业务逻辑。和以太坊相比, Fabric 链码和底层账本是分开的,升级链码时无须迁移账本数据到新链码中,真正实现了逻辑与数据的分离。

超级账本的智能合约主要包括执行交易和记账两个部分,如图 4 所示。超级账本链码通过远程过程调用 (RPC, remote procedure call) 通信协议与对等节点交互。当对等节点接收到客户端的输入请求时,它会向相应的链码发送一个链码消息对象,包含待输入信息、调用者信息。链码调用区块链数据库中的 invoke 方法来获取账户状态信息,并通过发送获取数据 (get state) 和写入数据 (put state) 消息向对等节点发送预提交状态。链代码将最终输出结果发送到对等节点,对等节点认可输入和输出后完成第一个签名提交。之后,客户端收集所有对等节点的第一次提交信息,组装事务并签名,将事务发送到服务节点并将其排队。最后,服务节点生成区块,并将它们发送到

每个对等节点,把输入和输出落实到账本上,然后完成第二个提交过程。

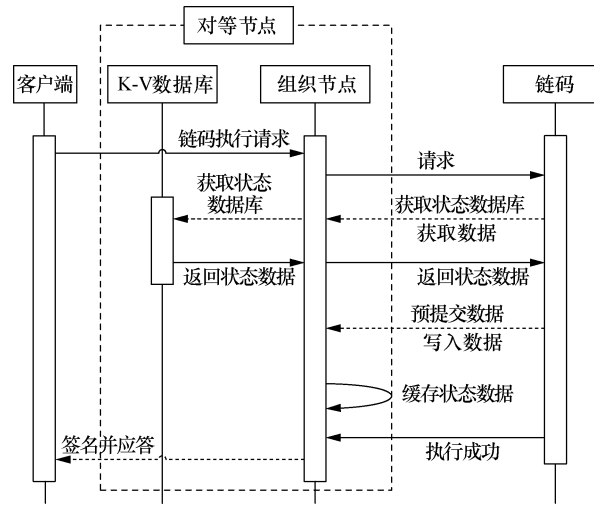


图 4 基于超级账本的智能合约
Figure 4 Smart contract based on super ledger

3.3 多微电网市场化交易智能合约

基于联盟链的微电网智能合约形成过程如图 5 所示。多微电网市场化交易形成智能合约的过程主要由认证管理和商定合约两个步骤完成,发电单元节点通过向调度中心节点发送密钥申请并返回交易地址过程完成认证管理;用电单元通过向调度中心发布用电量请求,发电单元通过向调度中心提供报价及电量,发电单元通过向调度中心提供报价及电量确保报价真实可信及市

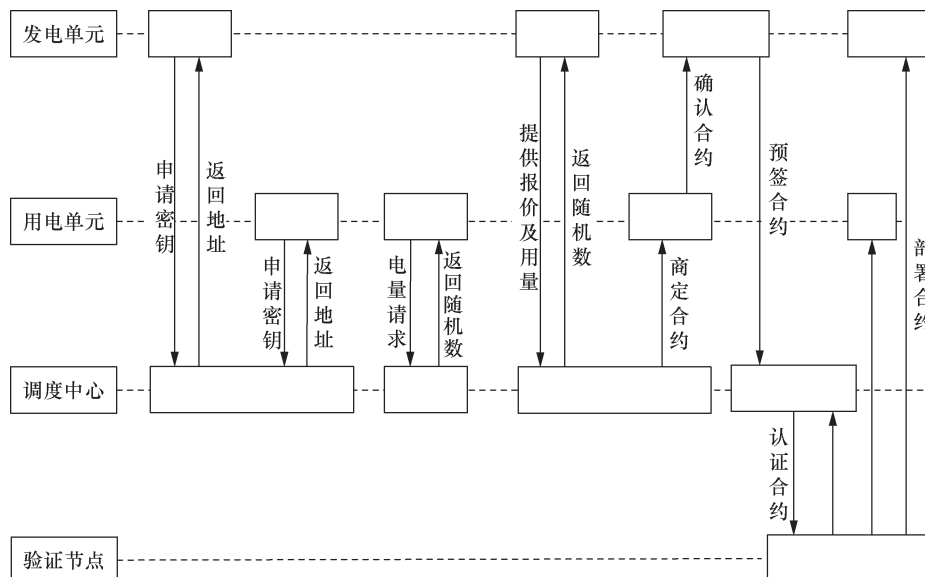


图 5 基于联盟链的微电网智能合约形成过程
Figure 5 Formation process of micro-grid smart contract based on alliance chain

场公平竞争，调度中心返回随机数用锁定交易；调度中心进行竞价及协商，达成共识后双方通过私钥签名将最终交易信息写进智能合约，并交由调度中心节点验证及广播，调度中心对确认交易信息后的智能合约进行签名，最终由验证节点写入区块链。

多微电网市场化交易智能合约遵循以下规则：

- 1) 微电网运营商可发布购取或售卖请求；
- 2) 分布式聚合商可发布购取或售卖请求；
- 3) 电力大用户只可发布购取请求；
- 4) 各购方均可接受竞价约束中定价；
- 5) 售方电价在竞价环节为保密信息；

6) 售电方主体在发布售电量分配时，需保证分布式聚合商售电量大于分布式聚合商提出购电需求 20%；

- 7) 合约触发执行后自动结算。

按照合约签订及部署执行的时间顺序，将交易流程分为 4 个阶段（交易需求提交阶段、分配资源阶段、分配调整阶段、交易结算阶段），并为各阶段设计函数，其交易流程如下。

(1) 购电需求发布函数

多微电网中各主体均可发布购电需求，在发布交易之前需向各自合约地址转入保证金，避免出现虚假请求，保证分配电量后合约顺利签订。市场主体 K 根据自身需求向电能量联盟链中的调度节点及售方节点发布购电请求 I_K ，包含利用调度节点 D 公钥 $D_{\text{publickey}}$ 生成带有时间戳的交易认证和利用市场主体 K 私钥 K_{private} 生成信息传输地址 $K_{\text{private}} | T_{\text{address}}^k, Q_{\text{buy}}^k | [t, \Delta t]$ 表示主体 K 从时间段 t 到 $t+\Delta t$ 期间发布的购电量。

购电请求如式(27)所示。

$$I_K = \{Q_{\text{buy}}^k | [t, \Delta t], K_{\text{private}} | T_{\text{address}}^k, S_{\text{signK}}\} \quad (27)$$

(2) 售电需求发布函数

多微电网中微电网运营商、分布式聚合商可发布售电请求，在发布交易之前需向各自合约地址转入保证金，避免出现虚假请求，保证分配电量后合约顺利签订。主体 L 根据自身需求向电能量联盟链中调度节点发布售电请求 I_L ，包含利用调度节点 D 公钥 $D_{\text{publickey}}$ 生成带有时间戳的交易认证和利用调度节点 L 私钥 L_{private} 生成信息传输地

址 $K_{\text{private}} | T_{\text{address}}^k, P_{\text{sell}}^l \text{ and } Q_{\text{sell}}^l | [t, \Delta t]$ 表示主体 L 从时间段 t 到 $t+\Delta t$ 期间发布的售价和售电量。

售电请求如式(28)所示。

$$I_L = \{P_{\text{sell}}^l \text{ and } Q_{\text{sell}}^l | [t, \Delta t], L_{\text{private}} | T_{\text{address}}^L\} \quad (28)$$

(3) 资源分配函数

调度中心节点首先利用其私钥 D_{private} 对接收到的购电请求 I_K 解密，计算出当前时间段总购电电量，并按照购电量由大到小形成购电队列；然后对接收到的售电请求 I_L 解密，依据售电竞价从低到高对售电节点排序成售电队列，队列截至售卖电量等于购电电量请求，依次对购电方进行分配电量，使购电方花费达到最小。调度中心节点按购电用量从大到小队列顺序依次反馈分配结果，优先满足计划用电量较大购电方，减少毁约成本，保护售电方主体利益，并发送带有调度中心签名的合约脚本 C_{D-K} 给购电方。

其合约脚本如式(29)所示。

$$C_{D-K} = \{P_{\text{sell}}^{\text{LtoK}} \text{ and } Q_{\text{sell}}^{\text{LtoK}} | [t, \Delta t], T_{\text{address}}^L, T_{\text{address}}^D, S_{\text{signD}}\} \quad (29)$$

其中， S_{signD} 为调度中心节点签名。

购电节点在接收到调度中心签约的合约脚本后，向合约中包含的售电节点地址发送带有购电节点签名的合约脚本 C_{K-L} 。

其合约脚本如式(30)所示。

$$C_{K-L} = \{P_{\text{sell}}^{\text{LtoK}} \text{ and } Q_{\text{sell}}^{\text{LtoK}} | [t, \Delta t], T_{\text{address}}^L, T_{\text{address}}^D, T_{\text{address}}^L, S_{\text{signK}}, S_{\text{signD}}\} \quad (30)$$

其中， S_{signK} 为购电主体节点签名。

售电方在接收到购电方合约脚本后，向购电节点发送带有售电方签名的合约脚本 C_{L-D} 。

其合约脚本如式(31)所示。

$$C_{L-D} = \{P_{\text{sell}}^{\text{LtoK}} \text{ and } Q_{\text{sell}}^{\text{LtoK}} | [t, \Delta t], T_{\text{address}}^L, T_{\text{address}}^D, T_{\text{address}}^L, S_{\text{signL}}, S_{\text{signK}}, S_{\text{signD}}\} \quad (31)$$

其中， S_{signL} 为售电主体节点签名。

(4) 分配调整函数

监测在合约签署过程中是否有购电方或售电方签署合约不响应，若售电方签署中断，则购电方将已有合约发至调度中心节点，调度中心节点依据售电队列继续分配电量，购电方实际付费超

出原资源分配阶段费用从原合约售电方账户扣除。若购电方签署中断,则售电方损失从购电方账户中扣除。

(5) 交易结算函数

在电能传输时间阶段后,智能电表上传实际发电情况,智能合约根据发电情况进行结算。首先,退还未参与发电的售电方保证金;其次,根据合约判断实际交易情况,若交易参与者均按照合约内容配电,则按照合约规定报价及用量结算,若购电方实际用量超过约定电量,则需要购买备用电量以维持平衡,参与各方首先应按照约定电价及电量结算,购电方仍需补偿系统备用费 F 。

系统备用费如式(32)所示。

$$F = P_R \cdot Q_R \quad (32)$$

其中, P_R 为调度备用电量的单位成本价格, Q_R 为调度电量。若购买方实际用电低于约定电量,则购售双方按照约定电价及电量结算。最后退还参与交易主体的保证金。

4 实验分析

为验证设计的多微电网市场化交易模型的有效性,本文将多微电网市场化交易智能合约发布至基于Fabric的超级账本搭建的联盟链上,模拟配电网场景进行仿真测试。实验环境为Intel Core i7-7700HQ CPU@2.8 GHz, 16 GB 内存, CentOS7 操作系统。该实验场景包含4个微电网运营商、4个分布式聚合商、2个用电大用户市场主体,微电网运营商、分布式聚合商可同时对多方主体出售电量,各参与主体也可同时购买微电网运营商、分布式聚合商的出售电量。

在仿真实验中,多微电网产销者每隔20 min 根据自身需求向全网节点发送购电请求和售电需求,提交下一时段的购售电需求,在整个交易时间段流程中,前2 min 属于售电需求发布阶段,2~4 min 属于资源分配阶段,4~6 min 属于分配调整阶段,剩余时间为电量配送阶段,到本交易时段结束后,再进行交易结算。各类型主体的竞价策略区间描述为:微电网运营商购电方可接受的价格区间为0.5~1.1 元/kW·h;分布式聚合商主体购电方可接受的价格区间为0.5~0.95 元/kW·h;用电大用户购电方可接受的价格区间为0.5~1.05 元/kW·h。

在测试之前,先向各用户账户中预存,并令2个微电网运营商、2个分布式聚合商为售电方,2个微电网运营商、2个分布式聚合商、2个大用户用电商为购电商。为验证智能合约有效性,共进行6次交易,测试供电方是否能按规定时间签署合约。

各多微电网主体第1次交易数据如表1所示。微电网运营商A提出3.0 MW·h的用电需求,微电网运营商B提出3.3 MW·h的用电需求,分布式聚合商A提出3.6 MW·h的用电需求。微电网运营商1提交售电需求电量为5.0 MW·h,微电网运营商2提交售电需求电量为4.6 MW·h,分布式聚合商1提交售电需求电量为4.4 MW·h,分布式聚合商2提交售电需求电量为6.0 MW·h;微电网运营商1提交分配给微电网运营商、分布式聚合商、用电大用户电量分别为2.2 MW·h、1.4 MW·h、1.4 MW·h,定价分别为0.71 元/kW·h、0.75 元/kW·h、0.87 元/kW·h。

各多微电网售电方主体发布售电需求后达成售电量成交结果如图6所示,图中共包含4个多微电网售电方主体的6次交易,如第1次交易中,微电网运营商1分配给微电网运营商、分布式聚合商、用电大用户的电量全部售出,微电网运营商2分配给微电网运营商、分布式聚合商、用电大用户的电量成交比例为0.34、1.00、1.00。

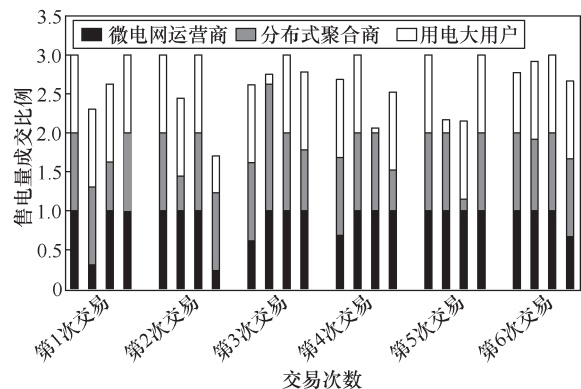


图6 售电方主体电量成交比例
Figure 6 Sales results of the main electricity sales parties

智能合约达成时间随着参与多微电网市场交易的主体数变化的曲线如图7所示,随着参与多微电网市场交易的主体数变化的增加,智能合约达成时间成本逐渐增大,当有1 000个市场主体参与交易时,合约达成时间成本为0.087 s,随着参与

表1 第1次交易数据
Table 1 First transaction data

售电方主体	发布售电量/MW·h	价格/元/kW·h	购电方主体	购电需求/MW·h	成交电量	交易金额
微电网运营商 1	2.2	0.71	微电网运营商 A	3.0		
			微电网运营商 B	3.3	2.2	1.562
	1.4	0.75	分布式聚合商 A	3.6		
			分布式聚合商 B	2.4	1.4	1.05
	1.4	0.87	大用户用电商 A	3.0	0.7	0.609
			大用户用电商 B	3.7	0.7	0.609
微电网运营商 2	2.3	0.89	微电网运营商 A	3.0	0.7	0.623
			微电网运营商 B	3.3		
	1.2	0.74	分布式聚合商 A	3.6	1.2	0.888
			分布式聚合商 B	2.4		
	1.1	0.87	大用户用电商 A	3.0	1.1	0.957
			大用户用电商 B	3.7		
分布式聚合商 1	2.1	0.75	微电网运营商 A	3.0	1.0	0.75
			微电网运营商 B	3.3	1.1	0.825
	1.6	0.89	分布式聚合商 A	3.6		
			分布式聚合商 B	2.4	1.0	0.89
	0.7	0.71	大用户用电商 A	3.0		
			大用户用电商 B	3.7	0.7	0.497
分布式聚合商 2	1.3	0.87	微电网运营商 A	3.0	1.3	1.131
			微电网运营商 B	3.3		
	2.4	0.73	分布式聚合商 A	3.6	2.4	1.752
			分布式聚合商 B	2.4		
	2.3	0.75	大用户用电商 A	3.0		
			大用户用电商 B	3.7	2.3	1.725

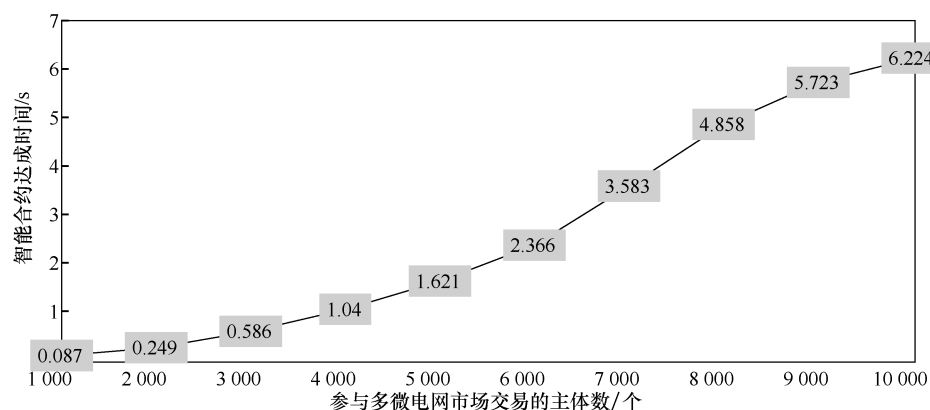


图7 智能合约达成时间随着参与多微电网市场交易的主体数变化的曲线

Figure 7 The curve of smart contract completion time with the number of participating in multi-microgrid market transaction

多微电网市场的主体由1 000个增加到10 000个，智能合约达成时间成本由0.087 s增加到6.224 s。

实验结果表明，多微电网内市场主体可在规定时间内提交购售电需求及报价；智能按照市场化交易规则执行资源分配及结算，且最终的交易结果满足安全约束条件。

5 结束语

建立公平的市场机制，各方利益最大化的算法模型，保证交易公开透明、信息对称成为关键。基于区块链技术，本文建立了一种基于智能合约的公平的竞价规则及多目标动态规划化模型。利用

Fabric 超级账本技术框架, 构建了多种市场主体参与的联盟链, 并将竞价规则及多目标动态规划模型转化成智能合约部署在联盟链上进行实验, 搭建了可实际运行的多微电网分布式市场化交易平台。结果表明, 基于所提模型得到的各时段电能分配策略可有效平衡市场各主体利益, 验证了该竞价规则在多微电网市场化交易应用场景下具有适用性和有效性。利用区块链技术多微电网市场化交易中的应用值得深入研究, 后续研究方向包括: 适用于配电网电能的各主体最优报价及能量配比研究, 基于区块链的电网交易共识机制研究, 基于区块链的多微电网市场化交易的溯源机制研究等。

参考文献:

- [1] ZHOU K L, YANG S L, SHAO Z. Energy internet: the business perspective[J]. Applied Energy, 2016, (178): 212-222.
- [2] ZHAO M, YU Q. Research of voltage control strategy for power management system in DC microgrid[C]//2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI). 2017: 338-343.
- [3] 蔡金棋, 李淑贤, 樊冰, 等. 能源互联网中基于区块链的能源交易[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 24-31.
CAI J Q, LI S X, FAN B, et al. Blockchain based energy trading in energy internet[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 24-31.
- [4] 赵敏, 沈沉, 刘锋, 等. 基于博弈论的多微电网系统交易模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 848-857.
ZHAO M, SHEN C, LIU F, et al. A game-theoretic approach to analyzing power trading possibilities in multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 848-857.
- [5] 平健, 严正, 陈思捷, 等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7137-7145, 7487.
PING J, YAN Z, CHEN S J, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7137-7145, 7487.
- [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] MIHAYLOV M, JURADO S, AVELLANA N, et al. NRGcoin: virtual currency for trading of renewable energy in smart grids[C]//Proceedings of 2014 the 11th International Conference on the European Energy Market (EEM). 2014: 1-6.
- [8] ALAM M T, LI H, PATIDAR A. Bitcoin for smart trading in smart grid[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Workshop on Local and Metropolitan Area Networks. 2015: 1-2.
- [9] 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, 2016: 1.
- [10] AKTER M N, MAHMUD M A, et al. A hierarchical transactive energy management system for microgrids[C]// Proceedings of 2016 Power and Energy Society General Meeting (PESGM). 2016.
- [11] 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 X, SUN H B, GUO Q L. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638.

- [12] 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 J, CHEN S J, ZHANG N, et al. Decentralized transactive mechanism in distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.

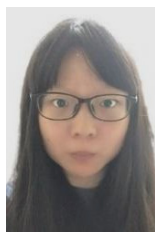
作者简介



李芬 (1969—), 男, 广东信宜人, 深圳供电局有限公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统计量管理及计量自动化信息系统开发建设。



李瑾 (1996—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为区块链技术、网络空间安全。



许松颀 (1998—), 女, 陕西西安人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为区块链技术、网络空间安全。



张森林 (1996—), 男, 河南商丘人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为区块链技术、网络空间安全。



陆月明 (1969—), 男, 江苏苏州人, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为分布式计算、区块链技术、网络空间安全。