微电网中基于区块链的电能交易方法

秦金磊[1,2],孙文强[1,2],朱有产[1,2],李 整[1,2]
(1. 华北电力大学 计算机系,河北 保定 071003;
2. 华北电力大学 复杂能源系统智能计算教育部工程研究中心,河北 保定 071003)

摘要:随着微电网内部分布式电源技术日益成熟、渗透率不断增加,大量电能产消者的加入给微电网的电能交易带来了新的机遇和挑战。在新形式下,传统的集中式电能交易方法存在交易效率低、维护成本大、隐私性低、信息安全系数低、信息透明度低等问题。为此,提出了基于区块链技术的微电网电能交易方法。首先,利用基于区块链系统的微电网电能所有权和代币交换方法,保障交易双方信息隐私及交易数据的安全。在区块链信息系统中,产消者与消费者进行电能所有权、代币的交易,使用智能合约保障交易双方的权益。然后,提出了基于信用的共识机制,将信用值作为微电网节点的基础属性,以信用值影响节点获得挖矿奖励的概率,约束微电网内节点的行为。最后,提出基于拍卖机制的微电网电能匹配方法和消费者出价策略。微电网中产消者出售多余电量,消费者根据自身需求发起对产消者电量的竞拍。使用拍卖机制和估价策略激励消费者理性竞价,提升微电网的内部消费,维持微电网内部的供需平衡。算例结果表明,所提微电网电能交易方法可进行多边竞价交易,有效提高微电网内部的自我消费,确保微电网的经济效益,保障交易的安全运行。

关键词:区块链;微电网;拍卖算法;电能交易;智能合约
中图分类号:TM 761 **文献标志码**:A DOI:10.16081/j.epae.202005032

0 引言

随着电力体制改革的有序推进,分布式电源产消者将可以进行电力市场交易并参与市场竞争。国家能源局在2017年10月公布了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》,文件明确允许分布式电源与消费者直接进行电能交易,但需要向电网公司支付适当的“过网费”[1]。在此形势下,微电网内将会出现大量的产消者进行电力市场交易,然而产消者与消费者之间的电能交易具有订单多、规模小以及分散化的特点,双方之间并没有建立适合的交易平台,无法直接完成交易,大多数电能产消者只能通过向上级电网出售电量以获得补贴。因此,如何设计一种安全、高效以及信息对称透明的微电网电能交易方法,完成电力资源的高效配置,是微电网改革的重点[2-4]。

现大多数研究认为微电网的电能交易仍需沿用第三方管理机构处理微电网的电能交易。但是,集中式交易模式可能会出现以下问题:①交易中心运行以及维护成本高,交易自由度低,微电网的有效运行得不到保障;②交易用户与第三方管理机构始终无法相互信任,第三方管理机构的维护信任成本高;③交易中心内用户的隐私无法得到保障,交易信息不透明,无法保障电能交易的安全性及公平性;④交易中心始终存在数据丢失及数据被篡改的可能性,目标大且易被攻击,可能直接损害交易双方的隐私安全及交易安全[5]。

为了保障微电网的安全、有效运行,可以将区块链技术应用于微电网交易中[6]。区块链技术通过运用时间戳、非对称加密、Merkle树、数字签名、共识机制等保障电能交易双方匿名交易及交易安全结算[7]。信息透明、消息匿名等特点是区块链技术最核心的优势,保障了交易双方能够在缺少第三方信任机构的情况下相互信任,进而减少了维护信任的成本[8]。区块链中分布式数据库的存储方式降低了中心机构中数据存储以及数据安全的成本,同时解决了第三方信任机构运行效率低和交易数据易被篡改等问题。

目前,在微电网电能交易领域中引入区块链技术的研究正处于初步阶段,许多学者开展了诸多研究,并对系统进行了评估[9-12]。文献[13]根据微电网电能市场中不同市场机制和消费者竞价策略的关系,对零智能和智能竞价策略下的2种市场机制开展了评估。文献[14]以实施微电网能源交易市场所需的7个基本组件为基础,对区块链技术作为微电网能源交易市场的信息系统和纽约布鲁克林区块链微电网案例进行了评估。文献[15]利用一种分布式安全校验算法,使用弱中心化的管理方法进行电能交易,但该方法仍依靠第三方信任机构,没有完成真

收稿日期:2019-08-24;**修回日期**:2020-03-30
基金项目:河北省自然科学基金资助项目(F2014502081);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018MS076,2020MS120);国家留学基金委资助项目(201906735027)
Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province (F2014502081), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2018MS076, 2020MS120) and China Scholarship Council Program (201906735027)

正的去中心化。文献[16]从多种维度对区块链在能源互联网中的运用进行了总结，并对区块链在能源互联网各种运用场景中发挥的作用进行了探讨。文献[17]提出了一种高性能的智能设备的区块链管理平台，该平台使用分布式网络架构、设备节点映射及共识算法等技术实现智能设备的分散自治。文献[18]提出了一种成本最小化算法，该算法在基于区块链的智能电网环境下，利用分布式个体产能、储能与负荷情况，有效地降低了小区微电网的整体能耗。文献[19]在智能电网场景下，对基于区块链的点对点能源交易服务进行研究，并使用中间人攻击、重放攻击与伪装攻击验证了该机制的安全性与可靠性。文献[20]提出了基于区块链和多重签名的电能交易机制，保障了交易双方的权益，但该方法没有设计有效的市场机制，同时缺少合适的用户出价策略。上述研究从不同的方面对区块链技术在能源互联网中的应用进行了探究，但在微电网中仍缺乏一种有效保护能源交易隐私和安全的方法。

因此，为了保障微电网交易的安全、有效运行以及交易信息的对称透明，本文提出了基于区块链技术的微电网电能交易方法。交易双方通过区块链系统进行代币的交易和电能所有权信息的交换，保护了交易双方的隐私，保证了交易信息的安全性、对称透明性，保障了交易双方的利益。基于拍卖机制的微电网电能匹配方法与基于电量估价的消费者出价策略以经济因素对微电网进行调控，实现了微电网电能的高可靠性交易。

1　区块链原理

1.1　区块链的基本原理

区块链是将数据区块依照时间次序链接起来形成的一种链式数据结构，每个区块由区块头和区块体组成。区块头链接到前一区块，链接是通过将前一个区块的哈希值添加到当前区块，将当前区块的哈希值添加到后一个区块。其中，哈希值通过对前一个区块的区块头进行哈希运算得到。区块按照时间顺序依次链接，保证了在不更改当前区块及其后续所有区块数据的前提下，交易数据不能被篡改或更新。区块体会保存所有的交易信息，并将交易信息进行分组哈希运算。将生成的新哈希值存入Merkle树中，递归直到最后，生成根哈希值。其中根哈希值即区块头内Merkle根，区块头和区块体通过Merkle根相连接，Merkle树的作用是快速归纳和验证区块交易信息的正确性。

区块链网络是对等P2P(Peer to Peer)网络，各节点之间能够在没有第三信任方的情况下直接进行交易。网络中没有中心节点，所有节点的位置都是对等的。网络中每个节点都有验证和传播区块数据、发现新节点等责任和功能。同时区块链网络通过非对称加密技术、数字签名、共识机制等技术保证交易数据的有效性、安全性和隐私性。在传统的区块链中，每个节点都需存储区块链中的全部交易数据，所以所有节点都是全部数据的备份节点。交易数据是每一个参与者共同存储、管理和验证的，当出现个别节点数据丢失和篡改时，可以下载其他节点的备份数据，这是其他第三方信任模式所不具备的优势。

区块链的去中心化特点与微电网中电能交易双方分散分布的特点完美契合，同时在微电网跨区域交易时才会进行阻塞管理，因此在微电网的直接电能交易中可以忽略阻塞管理问题。相比于集中式的电能交易模式，区块链系统减少了系统的运行成本，保证了运行效率。区块链数据的可追溯性、透明性和不可篡改性保证了微电网内部电能交易的公平性、安全性和信息的有效性。同时区块链中的智能合约可以为电能交易双方提供保障，保证交易安全顺利进行。

1.2　微电网电能交易区块链的账户模型

在微电网电能交易区块链中，存在2种不同的账户模型，分别为节点账户(给交易节点分配的账户)和合约账户(给智能合约分配的账户)。信用应当作为一项重要指标对用户进行评估，所以本文认为节点账户的基本属性可以更改为如式(1)所示的结构。

$$E_i=<a_i,b_i,c_i> \tag{1}$$

其中，E_i为微电网电能交易区块链中用户i的基本属性集合；a_i为用户i的地址；b_i为用户i的代币余额；c_i为用户i的信用值。

微电网电能交易区块链中的合约账户由智能合约创建后自动生成，可以触发执行智能合约代码，合约账户的基本属性为式(2)所示结构。

$$S_l=<a_l,b_l,r_l,g_l> \tag{2}$$

其中，S_l为微电网电能交易区块链中智能合约l的基本属性集合；a_l为智能合约l创建的地址；b_l为智能合约l的代币余额；r_l为智能合约l状态树的根哈希值；g_l为智能合约l账户绑定的以太坊虚拟机EVM(Ethereum Virtual Machine)的哈希值，g_l生成后不能被更改，这样可确保合约代码不可篡改。

2　基于区块链技术的电能交易方法

2.1　基于区块链技术的电能交易流程

假设E_A为消费者A购买的电量，E_B为产消者B出售的电量。在基于区块链技术的电能交易方法中，消费者与产消者使用区块链信息系统进行匿名通信以及电能的售出和竞拍，利用智能合约进行电能所有权密钥与代币的交换。基于区块链技术的电

能交易方法可分为能源预测、交易匹配、智能合约签订、交易结算4个阶段，具体的交易流程如附录中图A1所示。

(1)能源预测阶段。

在每次的能源交易中，为了保护交易双方的隐私，保证交易的匿名性，消费者A和产消者B都会使用相应的公钥和私钥创建一对新地址：d_{TAddr}和d_{MAddr}。其中，d_{TAddr}为交易地址，用于执行交易；d_{MAddr}为匿名通信地址，通过匿名信息流的方式实现匿名通信。新的一轮拍卖开始时，产消者B预测可售电量为E，其中产消者B的可售电量等于预测产电量减去预测用电量。同时区块链系统生成产消者B所产生能量E的2个唯一密钥b_α和b_β，并将其记录在区块链系统的数据库中，其中b_α和b_β的生成公式分别如式(3)和式(4)所示。

$$b_\alpha=\mathrm{SHA256}\left(\mathrm{pubKeyB}\|E\|\mathrm{pubKeyPPB}\|\mathrm{Timestamp}\right) \tag{3}$$

$$b_\beta=\mathrm{SHA256}\left(b_\alpha\|\mathrm{RandomNumber}\right) \tag{4}$$

其中，SHA256(·)为哈希函数；pubKeyB为产消者B的公钥信息；Timestamp为时间戳；pubKeyPPB为产消者B对应的光伏电源设备的公钥；RandomNumber为随机数。b_α是静态密钥，用于验证产消者B对可售电量E的所有权；b_β是临时密钥，用于锁定以防止双重支付能量E。如果在与消费者交易时未锁定E，则产消者可能向其他消费者出售相同数量的能量，b_β的作用就是防止这种情况的发生。区块链系统向产消者B的地址d_{MAddrB}发送消息b_α和b_β，然后产消者B使用d_{MAddrB}向全网广播拍卖信息。产消者B的广播函数为$\gamma_{\mathrm{BROADCAST}}(E,P,d_{\mathrm{TAddrB}},d_{\mathrm{MAddrB}})$，包含可售电量$E$、保留价格$P$、交易地址$d_{\mathrm{TAddrB}}$以及匿名消息流地址$d_{\mathrm{MAddrB}}$。

(2)交易匹配阶段。

产消者B使用d_{MAddrB}向全网广播拍卖信息后，每个节点都会收到产消者B的广播信息。如果消费者A根据自身需求想要参与产消者B的电能竞拍，则消费者A使用匿名地址d_{MAddrA}向区块链系统发送消息，要求验证产消者B对能量E的所有权证明，区块链系统验证数据库记录并回复真假。验证成功后，消费者A会向产消者B所售电量进行竞拍，消费者A使用匿名地址d_{MAddrA}向区块链系统中广播匿名竞价信息，其竞价函数为$\eta_{\mathrm{MATCH}}(d_{\mathrm{MAddrA}},d_{\mathrm{MAddrB}},E',P')$，其中$E'$为消费者A想要竞拍的电量，$P'$为消费者A竞拍该电量的出价。然后，区块链系统根据收到的出售信息和竞价信息进行电能匹配，具体的电能拍卖算法见第3节。

(3)智能合约签订阶段。

电能拍卖完成后，区块链系统会将拍卖结果广播全网，广播函数为$\mu_{\mathrm{RESULT}}(d_{\mathrm{MAddrA}},d_{\mathrm{MAddrB}},E',P')$。为了防止双重支付电量$E'$，系统会对电量$E'$进行上锁，锁定请求消息由产消者B发送到区块链系统中，其中包含证明产消者B所有权的密钥b_β。锁定请求直到电量交易成功，当更换能量的所有权时取消锁定。

锁定电量E'后，产消者B和消费者A将同时确认交易细节并写入智能合约中，同时双方共同支付一定的手续费。将产消者B需向智能合约写入函数定义为$\chi_{\mathrm{PUTB}}(d_{\mathrm{TAddrB}},b_\beta,\mathrm{pubKeyPPB})$，消费者A写入函数定义为$\chi_{\mathrm{PUTA}}(d_{\mathrm{TAddrA}},P')$。当交易双方中的任何一方没有向智能合约发送相应的信息时，智能合约生成失败，交易停止。

智能合约生成后，智能合约会将电能所有权证明密钥b_α、pubKeyPPB发送给消费者A的匿名消息地址d_{MAddrA}。消费者A用匿名消息地址d_{MAddrA}向区块链系统发送更换所有权密钥的请求$H(b_\alpha,\mathrm{pubKeyPPB},\mathrm{unlock},\mathrm{update})$，区块链系统接收到信息并验证$b_\alpha$，解锁电能并生成一对新的密钥$a_\alpha$和$a_\beta$分别替换$b_\alpha$和$b_\beta$，$a_\alpha$和$a_\beta$分别如式(5)和式(6)所示。

$$a_\alpha=\mathrm{SHA256}\left(\mathrm{pubKeyA}\|E'\|\mathrm{pubKeyPPB}\|\mathrm{Timestamp}\right) \tag{5}$$

$$a_\beta=\mathrm{SHA256}\left(a_\alpha\|\mathrm{RandomNumber}\right) \tag{6}$$

此时，产消者B的电能所有权属于消费者A，消费者A可以使用a_α和a_β来消耗能量E'。

其中可能会出现特殊的情况，产消者B所售电能可以同时满足2个或多个消费者。假设经过拍卖算法匹配后，产消者B所售电能E可以同时满足消费者A和消费者D的需求，锁定产消者B的可售电能E并将其分成E_1和E_2两部分，区块链系统创建2个b_α唯一密钥，按照式(7)所示等式生成每一个新密钥。

$$b_{\alpha+1}=\mathrm{SHA256}\left(b_\alpha\|E'/E\right) \tag{7}$$

生成新的密钥后按照智能合约签订阶段(3)继续进行交易。

(4)交易结算阶段。

新密钥生成后，进入电能物理传输阶段，在该阶段内消费者A使用新密钥a_α和a_β来消耗产消者B所产生的电能。智能合约规定的电能传输时间截止后，智能合约向双方的智能电表申请发送电能传输信息，智能合约根据智能电表所发送的电能传输信息进行微电网电能交易结算。当产消者B所产生的电能小于智能合约约定的电能时，智能合约会将未能履行电量所对应的代币退还给消费者A，将剩余代币发送给产消者B，同时向区块链系统申请对产消者B的信用值进行更新；当消费者A使用产消者B

所产生的电量大于智能合约约定的电量时，智能合约会将合约内代币发送给产消者B，并计算超出电量价格向消费者A催收相应的代币，同时向区块链系统申请对消费者A的信用值进行更新。

微电网内的售电方按照体量大小可分为民营电能企业与个体产消者。民营电能企业的体量大，其每次决策可能会对微电网的内部电价造成较大的影响，进而威胁个体产消者的生存，造成微电网内部垄断，反而影响微电网内部的公平性与可靠性。因此，针对该情况，国家需要制定相应的法律法规，保障微电网内部竞争的合理性。本文所提微电网电能交易机制的目的是为了整合节点分散的分布式电能产消者，提高微电网内部的自我消费水平，因此假设售电方均为分布式电能产消者。

2.2　基于信用的共识机制

2.2.1　信用值评估机制

在微电网电能交易过程中，交易双方可能出现以下2种违约情况：

（1）当消费者与产消者达成交易意向，签订智能合约后，产消者在约定时隙内的实际发电量没有达到约定的交易电量，此时消费者会向电网购电，而电网的电价高于微电网内部的交易电价，则消费者会有一定的经济损失；

（2）当消费者的实际用电量超过了约定的交易电量时，由于智能合约中的代币数量固定，产消者会有一定的经济损失。

因此，本文以智能合约完成情况作为信用指标，产消者的信用值评估如式（8）所示。

$$C_j^{\mathrm{con}}=\begin{cases}C_{j-1}^{\mathrm{con}}-1 & Q_{ij}>Q_{ij}^{\mathrm{sell}}\\ C_{j-1}^{\mathrm{con}} & Q_{ij}\leqslant Q_{ij}^{\mathrm{sell}}\end{cases}\tag{8}$$

其中，C_j^{con}为产消者j的历史信用值；Q_{ij}为签订的智能合约中的约定电量；Q_{ij}^{sell}为产消者j所产生的实际电量。

消费者的信用值评估机制如式（9）所示。

$$C_i^{\mathrm{pro}}=\begin{cases}C_{i-1}^{\mathrm{pro}}-1 & Q_{ij}<Q_{ij}^{\mathrm{buy}}\\ C_{i-1}^{\mathrm{pro}} & Q_{ij}\geqslant Q_{ij}^{\mathrm{buy}}\end{cases}\tag{9}$$

其中，C_i^{pro}为消费者i的历史信用值；Q_{ij}^{buy}为消费者i的实际用电量。

2.2.2　基于信用的记账权竞争算法

为了实现以信用值影响经济收益，以经济因素激励交易双方诚实守信，本文提出一种基于信用的记账权竞争算法，如式（10）所示。

$$H(D_i,k_i)\leqslant N_{\mathrm{diff}}(2/3)^{C_i}\tag{10}$$

其中，$H(\cdot,\cdot)$为哈希函数；D_i为节点i打包的交易数据的根哈希值；k_i为节点i计算搜寻到的随机数；C_i为节点i的信用值；N_{diff}为难度系数。

在上述算法下，节点竞争记账权的规则如下：节点i收集打包这段时隙内所有的交易数据，并将交易数据递归哈希得到根哈希值D_i；然后，节点i需要进行大量的穷举，用于找到能够符合式（10）的k_i。当找到正确的k_i时，将k_i打包进区块中，同时向网络中的其他节点广播。其他节点接收到相应的区块后，需根据式（10）中对应的C_i对区块进行验证。如果验证成功，则将对应区块添加到微电网电能区块链上，节点i将得到记账奖励；如果验证不成功，则将该区块删除。

3　电能拍卖算法

基于区块链技术的电能拍卖算法可以完成微电网的电能匹配。将微电网交易时段划分为多个时隙，每个时隙为15 min，每个时隙结束前的一段时间，由区块链系统将收集的微电网内未交易成功的消费者消费订单信息，使用拍卖算法完成电能消费订单的匹配。此时，各节点不会因为通信方式和通信水平的问题影响最终微电网内部的自我消费水平。由区块链信息系统收集各产消者的拍卖信息以及消费者的竞拍信息，计算拍卖结果。电能拍卖算法拍卖结果的计算包括计算每个产消者赢得拍卖的消费者集合和广播竞拍成功的消费者用电价格。在案例中，电能拍卖实质上是同质多物品密封价格拍卖，即拍卖对象是大量的电能，使用密封拍卖的方式保证拍卖的有效性，竞拍者只根据拍卖品对自身的价值决定出价。

3.1　拍卖算法概述

拍卖算法是解决微电网电能分配问题的重要方法，在某个时隙电能拍卖结束后，区块链信息系统根据收到的消费者竞拍信息，使用拍卖算法计算赢得竞拍的消费者集合。拍卖算法的思路为：将收集到的竞拍信息按照出价单调递减的顺序排序，出价相等的依照提交竞拍信息的时间次序排序，优先满足出价高的消费者的电量需求。如果消费者所有竞价中的其中一个竞拍成功，则在竞价信息集合中删除该用户其余的出价。如果轮到某消费者竞价时出现产消者没有多余待拍卖电量的情况，则跳过该竞价信息。

拍卖算法的具体过程阐述如下。记产消者的集合为N，消费者的集合为M。假设一天时间被均匀地分为T个时隙，则一天内的时隙集合记为$\{1,2,\cdots,t,\cdots,T\}$。其中，能量预测系统提前预测产消者$n(n\in N)$在时隙$t$的光伏发电量$E'_{n,t}$。同时产消者预测下个时隙自身所消耗的电量$E''_{n,t}$，即该时隙产消者$n$待拍卖的电量$E_{n,t}=E'_{n,t}-E''_{n,t}$。当$E_{n,t}<0$时，表明产消者也需要参与竞拍，购买缺少的电量。然后产消者向区块链提交出售的电量$E_{n,t}$及保留电价

P_b,保留电价即产消者规定的最低成交价格。

若消费者需要在时隙$t+1$中使用电量,则需在时隙t拍卖结束时间前向区块链发起竞拍请求,然后区块链将收集到的各产消者在时隙t的拍卖信息广播全网,包括产消者的加密地址、待拍卖电量$E_{n,t}$、各产消者的保留电价P_b。

消费者$m(m\in M)$根据区块链发送的信息选择若干希望竞拍的电量,将对每个产消者的竞价信息按照(m,n,E_m^n,P_m^n)的格式发送到区块链信息系统中。其中,n为产消者加密地址信息;m为消费者加密地址信息;E_m^n为消费者m向产消者n的投标电量;P_m^n为消费者m购买产消者n的电量愿意付出的最高单价。

假设竞拍集合为$B=\left\{(m,n,E_m^n,P_m^n)\,|\,n\in N,m\in M\right\}$,各产消者竞拍成功的消费者集合为$W_n$。记$b_{dx}=(m,n,E_m^n,P_m^n)$,其中$x$为竞拍信息的总数。按照出价单调递减的顺序排序后得到$B_d=\{b_{d1},b_{d2},\cdots,b_{dx}\}$,然后顺序遍历集合$B_d$,当被竞拍的电量$E_{n,t}$充足时,竞拍成功,$b_{dx}$被计入$W_n$中,同时删除集合$B_d$中该用户的其他报价;当被竞拍的电量$E_{n,t}$不足时,则删除集合$B_d$中当前的$b_{dx}$,并跳过此竞价信息。最后,集合$W_n$就是各产消者所对应竞拍成功的消费者集合。拍卖时间截止后,区块链将根据收集到的消费者竞拍信息计算得到最终的拍卖结果,包括各产消者所对应赢得拍卖的消费者和消费者拍卖到的电量以及支付单价P_m^n,然后将其发送至相对应的产消者和消费者。

如果消费者没有竞拍成功,则可以选择向电网购电,记电网价格为P_g。当光伏发电充足,能满足微电网内所有消费者时,可以将多余电量以保留电价P_b出售给上级电网。一般情况下,有$P_b<P_m^n<P_g$。因此,产消者为了得到更多的收益,消费者为了减少更多的电能开支,都希望在微电网内部进行电量交易,这样可促进微电网的内部消费。

3.2 代理出价策略

消费者参与微电网内部电能交易时有2种模式可选择,分别为空闲模式和忙碌模式。当消费者空闲时,可以按照自身需求自由出价;当消费处于忙碌状态下想要继续进行微电网内部电能交易时,可以选择忙碌模式。

在忙碌模式下,区块链系统需对消费者所需电量进行估算,消费因子l'为系统根据消费者平常的消费习惯预测下一时段的消费兴趣,l'的取值范围为0~1。当$l'=0$时,表示消费者的购买欲望不强烈,可能不会购买过多的电量(例如出差在外等情况),此时电量对于该消费者的价值就相对较低;当$l'=1$时,表示消费者的购买欲望强烈,需求量可能达到自身消费的最高电量,此时电量对该消费者就有相对较高的价值。由此可见,电量对消费者的价值与l'密切相关,估价v与消费因子l'之间的关系式如式(11)所示。

$$v=l'(P_g-P_b)+P_b \tag{11}$$

由式(11)可知,当$l'=0$时,消费者对电量的估价为P_b;当$l'=1$时,消费者对电量的估价为P_g。

由上述假设的出价规律可知,l'越高,则出价越高。消费者的估价越高,表明消费者需要更高的出价来赢得竞拍,从而赢得更多的电量。消费者在该时隙的需求量Q与估价v之间具有如下关系:

$$Q=(Q_g-Q_b)(v-P_b)/(P_g-P_b)+Q_b \tag{12}$$

其中,Q_g为消费者消费的最高电量;Q_b为消费者消费的最低电量。由式(12)可知,当用户估价为P_b时,$Q=Q_b$,用户的购电兴趣不大,此时为最低电量消费;当用户估价为P_g时,$Q=Q_g$,用户购电兴趣较大,此时会达到最高电量消费。

3.3 不同时间尺度的滚动和协调

由于分布式发电的不稳定性及发电设备需定期检修的情况,需考虑在微电网内进行不同时间尺度的滚动和协调。在微电网电能交易区块链中,根据时间尺度大致可分为年计划、周计划、日计划和实时计划。年计划依照分布式电能设备电量以及长期负荷的预测结果,设计分布式电能设备的检修及发电计划;周计划依照年计划规定的周发电及检修计划,设计分布式电能设备的发电计划;日计划依照周计划规定的日发电及检修计划,设计分布式电能设备的发电计划;实时计划依照分布式电能设备的短期预测值以及日发电计划,计划下一个拍卖间隙的发电计划。

年计划、周计划、日计划及实时计划相互影响、相互调整,上级时间尺度安排下级时间尺度的检修及发电计划,上级时间尺度可根据具体的完成情况重新调整下级时间尺度的任务情况,这样保证了能最大限度地消纳分布式电能,合理安排设备检修。各产消者可以根据整体的任务安排,调整自身的短期发电量,分析各个时隙的销售电价情况,在平均价格较高的情况下增加开启发电设备的数量。消费者可以根据短期内发电以及负荷的预测值进行竞拍电价的调整,当下一时隙电量的预测值较高时,合理降低竞价,在保证自己竞拍成功的情况下,尽可能减少支出。

4 算例验证

4.1 节点信用值与获得记账权概率的关系

假设微电网中存在16个活跃节点,其信用值分别为85、86、…、100分。在MATLAB中对节点竞争

记账权进行仿真模拟。假设每个节点的计算力相同，在平台测试微电网电能交易区块链中150个区块的记账权获得者，得到节点信用值与其获得记账权概率的关系，如图1所示。

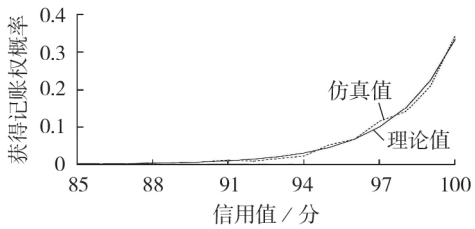


图1　节点信用值与获得记账权概率的关系

Fig.1　Relationship between node credit value and probability of obtaining accounting right

4.2　微电网电能交易仿真

假设某个微电网由产消者1—3和消费者A—E组成。产消者根据系统预测每个时隙内的可售电能均为200 kW·h，规定产消者的保留电价为0.5元/(kW·h)，电网电价为1元/(kW·h)。由于微电网内消费者所需的电能均可以从电网获取，则默认在拍卖算法中未赢得拍卖的消费者从电网中购买电量，价格为电网电价。假设消费者对产消者的收益值如表1所示，表中的收益值越高，表明消费者优先对此产消者进行竞拍。

表1　消费者对产消者的收益值

Table 1　Income values of consumers to proconsumers

消费者	收益值		
	产消者1	产消者2	产消者3
A	1	0	0
B	1	0	0
C	0	1	0
D	0	1	0
E	0	0	1

设消费者A—E的最高消费电量均为200 kW·h，最低消费电量均为20 kW·h，在10个时隙内，消费者A—E的消费因子l'如图2(a)所示。根据式(11)和式(12)可分别计算得到消费者在该时隙内的报价及电量需求，分别如图2(b)和图2(c)所示。消费者根据上述需求及电价进行竞拍，假设消费者为了满足自身需求向所有产消者竞拍电价，根据本文所提电能交易方法求得最终的成交电价，如图2(d)所示。

算例结果表明，本文所提方法可以满足微电网小规模交易，实现同一个产消者同时满足多个消费者的电能需求，有效地利用了微电网内碎片化的电能，避免了电能的浪费。同时以经济因素激励消费者合理出价，当消费者出价过低时，则可能出现在微电网内部竞拍失败而向电网购电的情况，反而得到更高的购电价格。基于区块链的微电网交易方法与基于估价的消费者出价策略可以促进微电网的内部消费，图2(d)所示的微电网内部成交电价均在电网

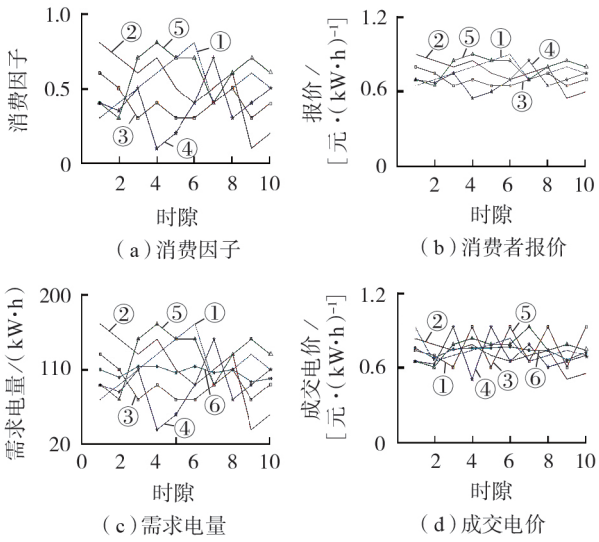


图2　微电网电能交易的仿真结果

Fig.2　Simulative results of microgrid energy trading

电价与保留电价之间。产消者与消费者在微电网内进行交易，产消者可得到比保留电价更高的电价，从而获得更高的利润，消费者可以获得比电网电价更低的电价，从而减少自身的电能支出，交易双方为了追求更高的利益，会更加积极地在微电网内部消费，形成微电网内部交易的良性循环。

微电网内部的电能利用率如图3所示。从图2、3中可看出，本文所提微电网电能交易方法可以有效地提高微电网内部的自我消费水平以及微电网内部电能的利用率。

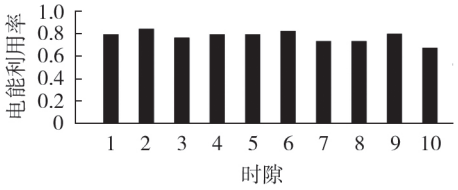


图3　微电网内部的电能利用率

Fig.3　Power utilization rate within microgrid

5　结论

本文所提基于区块链的微电网电能交易方法以及用户报价策略可以用于实现电能匿名拍卖与点对点交易。使用区块链技术、智能合约和匿名消息流，保证了交易的隐私性和安全性。通过典型的微电网电能交易案例对本文所提方法进行验证，所得主要结论如下。

(1)本文所提基于信用的共识算法达到了预期的效果，实现以节点信用值影响其获得挖矿奖励的概率，以经济因素约束微电网节点诚实守信，自觉履行智能合约的内容。

(2)该交易方法可实现微电网电能的内部交易,通过拍卖算法规则的制定,调度结果的最优性得到了一定程度上的满足。

(3)在区块链信息系统中,产消者与消费者可以完成无中心机构的交易清算,在智能合约的保护下,交易双方的利益均得到了保障。该方法可以满足微电网小规模、高效率、分布式和低成本的交易需要,有效地保证了微电网内部的自我消费,保障了微电网交易中的安全性和经济效益。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 国家发展改革委,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]. (2017-10-31)[2019-08-24]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.

[2] MENGELKAMP E,STAUDT P,GARTTNER J,et al. Trading on local energy markets:a comparison of market designs and bidding strategies[C]//2017 14th International Conference on the European Energy Market(EEM). Dresden,Germany:IEEE,2017:1-6.

[3] 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.
MA Tiannan,PENG Lilin,DU Ying,et al. Competition game model for local multi-microgrid market based on block chain technology and its solution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(5):191-203.

[4] 杨明通,周步祥,董申,等. 区块链支持下的微网电力市场设计及调度优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):155-161.
YANG Mingtong,ZHOU Buxiang,DONG Shen,et al. Design and dispatch optimization of microgrid electricity market supported by blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):155-161.

[5] 刘路宁,彭春华,温泽之,等. 基于配电网动态重构的分布式光伏消纳策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):56-62.
LIU Luning,PENG Chunhua,WEN Zezhi,et al. Distributed photovoltaic consumption strategy based on dynamic reconfiguration of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):56-62.

[6] 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.

[7] 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.

[8] MENGELKAMP E,NOTHEISEN B,BEER C,et al. A blockchain-based smart grid:towards sustainable local energy markets[J]. Computer Science-Research and Development,2018,33(1):207-214.

[9] LI Z,QIN J L. A modified particle swarm optimization with elite archive for typical multi-objective problems[J]. Iranian Journal of Science and Technology,Transactions A:Science,2019,43(5):2351-2361.

[10] QIN J L,NIU Y G,LI Z. A combined method for reliability analysis of multi-state system of minor-repairable components[J]. Ekspolatacja i Niezawodnosc-Maintenance and Reliability,2016,18(1):80-88.

[11] QIN J L,LI Z. Reliability and sensitivity analysis method for a multistate system with common cause failure[J]. Complexity,2019(4):1-8.

[12] QIN J L,LI Z,NIU Y G,et al. Simulated method for reliability evaluation of multi-state coherent system[J]. Iranian Journal of Science and Technology,Transactions A:Science,2018,42(3):1363-1371.

[13] MENGELKAMP E,GÄRTTNER J,WEINHARDT C. Intelligent agent strategies for residential customers in local electricity markets[C]//Proceedings of the Ninth International Conference on Future Energy Systems. Karlsruhe,Germany:ACM Press,2018:97-107.

[14] MENGELKAMP E,GÄRTTNER J,ROCK K,et al. Designing microgrid energy markets[J]. Applied Energy,2018,210:870-880.

[15] 郜雪,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.

[16] 张宁,王毅,康重庆,等. 能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J]. 中国电机工程学报,2016,36(15):4011-4023.
ZHANG Ning,WANG Yi,KANG Chongqing,et al. Blockchain technique in the energy internet:preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(15):4011-4023.

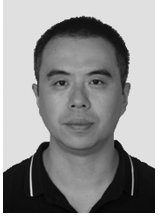
[17] YU S T,LÜ K,SHAO Z,et al. A high performance blockchain platform for intelligent devices[C]//2018 1st IEEE International Conference on Hot Information-Centric Networking(HotICN). Shenzhen,China:IEEE,2018:1-6.

[18] GUO Y X,PAN M,FANG Y G,et al. Decentralized coordination of energy utilization for residential households in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(3):1341-1350.

[19] 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.

[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:



秦金磊

秦金磊(1979—),男,河南武陟人,讲师,博士,从事区块链技术、能源互联网及系统可靠性等方面的研究工作(**E-mail**:jlqin717@163.com);

孙文强(1995—),男,河南武陟人,硕士研究生,从事区块链技术、能源互联网等方面的研究工作(**E-mail**:494511651@qq.com);

朱有产(1963—),男,浙江浦江人,教授,从事云环境技术、网络安全等方面的研究工作(**E-mail**:hd_zyc@sina.com);

李 整(1981—),女,河北保定人,讲师,博士,主要从事机组组合优化以及智能群体算法等方面的研究工作(**E-mail**:yeziperfect@163.com)。

(编辑 陆丹)

Energy transaction method of microgrid based on blockchain

QIN Jinlei[1,2],SUN Wenqiang[1,2],ZHU Youchan[1,2],LI Zheng[1,2]
(1. Department of Computer,North China Electric Power University,Baoding 071003,China;
2. Engineering Research Center of Intelligent Computing for Complex Energy Systems,
Ministry of Education,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract:With the increasing penetration rate of distributed generation in microgrid and the growing maturity of its technology,the participation of a large number of proconsumers brings new opportunities and challenges to the energy transaction in microgrid. In the new form,the traditional centralized energy transaction method has the problems of low transaction efficiency,high maintenance cost,low privacy,low information security coefficient,low information transparency and so on. Therefore,an energy transaction method of microgrid based on blockchain technology is proposed. Firstly,the exchange method of microgrid energy ownership and tokens based on blockchain system is used to guarantee the information privacy and transaction data security of both parties. In the blockchain information system,the proconsumers and consumers trade energy ownership and tokens,and their rights and interests are protected by smart contracts. Then,a consensus mechanism based on credit is proposed,which takes the credit value as the basic attribute of microgrid nodes and takes the mining reward probability of the credit value impact nodes to restrict the behavior of nodes in microgrid. Finally,the auction mechanism-based energy matching method and consumer's bidding strategy are put forward. Proconsumers within the microgrid sell surplus electricity and consumers initiate bidding for proconsumers' electricity according to their own needs. The auction mechanism and valuation strategy are used to stimulate rational bidding of consumers,so as to improve the internal consumption of microgrid and maintain the balance between supply and demand within the microgrid. The example results show that the proposed energy transaction method can be used to conduct multilateral bidding transactions,improve the self-consumption within the microgrid effectively,ensure the economic benefits of the microgrid,and guarantee the safe operation of transactions.

Key words:blockchain;microgrid;auction algorithm;energy transaction;smart contracts

(上接第 121 页 continued from page 121)

Scheduling strategy of electric vehicle load in residential community considering preheating demands in winter

ZHANG Xincheng[1],LIU Zhizhen[1],HOU Yanjin[2],FAN Shujing[1]
(1. School of Electrical Engineering,Shandong University,Jinan 250061,China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Biomass Gasification Technology,Energy Institute of Shandong Academy of Sciences,Qilu University of Technology(Shandong Academy of Sciences),Jinan 250014,China)

Abstract:Aiming at the preheating demands of EVs(Electric Vehicles) in low temperature environment,a scheduling strategy of EV load considering preheating demands is proposed by studying the preheating technologies of various vehicles and combining the V2G(Vehicle-to-Grid) technology. Firstly,the temperature factor is introduced into the traditional EV load model to reflect the EV load demand at low temperature more accurately. Then,according to users' charging and preheating demands in winter,specific charging and discharging arrangements are made for EVs under different SOC(State Of Charge) in different time periods,and the scheduling model is solved by using the improved fuzzy adaptive particle swarm optimization algorithm. Taking the distribution network of a residential area in Beijing as an example,the simulation verifies that the proposed strategy can give full play to EVs' energy storage characteristics while meeting the electricity demand,and provide auxiliary function of peak load shifting for the power grid. Finally,the thermal model of EV battery packs is established to monitor the SOC and temperature change of specific EVs,and results show that the proposed strategy can effectively improve the travel temperature of vehicle-mounted battery packs while adjusting the peak and valley properties of power grid.

Key words:electric vehicles;preheating demands;V2G;fuzzy adaptive particle swarm optimization algorithm;peak load shifting;travel temperature;scheduling strategy

附　录

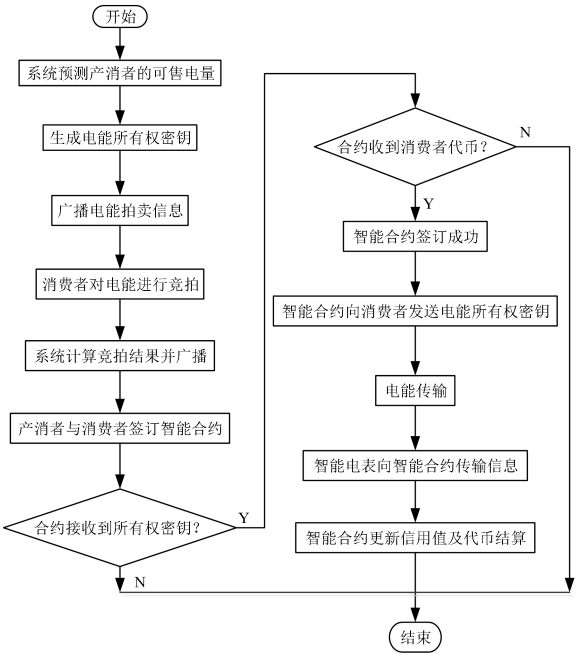


图 A1　交易流程图

Fig.A1 Flowchart of transaction