

基于区块链和改进型拍卖算法的微电网电能交易方法

秦金磊^{1,2}, 孙文强^{1,2}, 李 整^{1,2}, 朱有产^{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:随着国家对电力市场改革的不断推进和售电市场的开放,以分布式电源为主体的电能产消者进入市场。传统的集中式电能交易不利于提高电能产消者的交易积极性,同时存在交易效率低、目标大易受攻击、数据丢失找回难度大、交易信息不透明等问题。基于上述问题,提出基于区块链技术和改进型拍卖算法的微电网交易方法。首先,提出利用双链结构完成微电网电能安全交易,利用信息链完成交易双方的认证及准入,利用交易链完成交易双方代币及电能的交换,交易双方通过签署智能合约完成无第三方信任机构的交易结算,避免坏账的产生;然后,提出利用改进型拍卖算法完成电能消费订单与产消者之间的匹配,以距离、时间及经济等因素共同影响最终的匹配结果,保障电能合理分配。算例结果表明,基于区块链和改进型拍卖算法的微电网电能交易方法可以完成微电网内部的直接交易,订单与产消者得到了合理的匹配,保障了微电网电能交易的公平性、高效性、安全性。

关键词:分布式电源;区块链;智能合约;拍卖算法;电能交易;微电网

中图分类号:TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006002

0 引言

随着全球能源需求的不断提升,各个国家对电力市场进行了相应的改革。越来越多的国家发布了相关政策,允许公司或个人安装分布式发电装置进入电力市场。随着光伏发电及风力发电技术的革新及应用,用户不仅能充当消费者,也可以安装发电装置作为电能产消者进入电力市场竞争^[1]。大量的电能产消者与电能消费者形成了若干小型的微电网。具有分布式特点的微电网作为研究热点,学者们以此为核心对其开展了多方位的研究^[2-5]。但是现阶段产消者与消费者之间尚未建立一个安全、可靠的电能及代币交易平台,不能完成安全、可靠的点对点交易。因此需要建立一个微电网电能交易平台,保证交易信息对称透明、数据安全可靠,从而保障电能合理配置、交易顺利结算^[6]。

将区块链技术引入微电网的电能交易中是当前最被看好的应用方向^[7-9]。狭义的区块链就是一个分布式的数据账本,全网中的每个节点都会保存一份数据备份,网络中的每个节点都可以进行交易数据的整理和存储^[10]。区块链是一种链式的数据结构,交易信息经网络内节点整理后,产生新的区块并

被链接在最长的主链上。其中最长的链条被称为主链,主链上存储的信息被认为是安全、不可篡改的。而网络中的每个节点都会保存区块链数据库的全部信息,防止数据的丢失^[11]。

区块链技术的去中心化特性完美地契合了微电网中产消者与消费者分散化的特点^[12-13]。将区块链技术应用与微电网电能交易领域有以下优点。①去中心化:区块链技术网络中的每个节点都有着同等的地位,所有节点都可以进行数据整理、储存、校验。即使网络中节点的数据遭到恶意删除,也可以通过复制其他节点的数据进行数据恢复。这种机制保障了微电网电能交易中数据的安全、完整、可信。②安全性:区块链使用非对称加密的方式及迭代哈希的方式保证了交易数据的不可篡改性。如果攻击方想要篡改区块链中一个区块的信息,则需要改变当前区块及后续所有区块的信息,并需篡改全网50%以上节点的信息。这等于攻击方需要以一己之力挑战全网的计算力,几乎是不可能实现的^[14]。这种机制保障了交易数据的不可篡改及不可伪造。③智能化:区块链使用智能合约来完成代币及交易的结算,避免了第三方信任机构的加入,降低了第三方信任机构中的人力成本及维护信任成本。交易双方在交易前签署智能合约,智能合约一旦签署成功则无法人为干预,通过代码强制执行智能合约签署时写入的命令。智能合约可以保障产消者与消费者之间签订的各种条款顺利执行,保障了交易的顺利结算,避免了坏账的产生^[15]。

现阶段,关于区块链技术在微电网电能交易领域的研究已经初有成果。文献^[16]提出了电能代币

收稿日期:2019-11-21;修回日期:2020-04-03

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)

NRGcoin用于对注入电网的电能进行结算,但没有设计具体的智能合约,缺少合适的市场交易机制。文献[17]设计了在能源交易中的多重签名,从而保障交易双方的利益,但该交易机制的设计以比特币系统为基础,该系统不支持图灵完备的脚本,不能完成复杂的交易细节,需引入管理员节点,但这违背了去中心化的初衷。文献[18]具体设计了基于区块链技术的能源互联网平台,提出了身份链与交易链的双链结构,探索了电能在区块链交易的具体流程,但所设计的交易链并未涉及市场交易机制,没有设计合适的交易匹配算法。文献[19]设计了连续双向拍卖机制用于实现产消者与消费者之间的电能匹配,利用区块链进行电能交易结算,但没有设计智能合约的具体实现细节,没有将物理电能拍卖抽象出来形成虚拟电能拍卖,没有考虑微电网内部交易个体的不稳定性及波动性。文献[20]采用VCG(Vickrey-Clarke-Groves)拍卖机制刺激消费者理性报价,设计了电能点对点交易的智能合约以保障交易顺利进行,但该交易模型没有考虑区块链在微电网场景的实施细节,没有设计适用于微电网的共识算法。

为此,针对微电网电能交易具有订单多、规模小、分散化等特点,基于将区块链应用于微电网电能点对点交易的方法^[21-24],本文提出利用双链结构保障交易安全,使用信息链验证用户准入、保存用户及发电装置信息,使用交易链及智能合约完成交易双方的电能交易及结算。然后,对拍卖算法进行了改进,并完成电能消费订单及产消者的匹配,以经济、距离、时间3种因素共同影响最终的拍卖结果。最后,通过算例分析测试了微电网区块链的可行性,验证了基于图的改进型拍卖算法的有效性,实验结果表明基于区块链的微电网电能交易方法能提高微电网运行的安全性及高效性。

1 基于区块链的微电网电能交易方法

区块链将加密算法、共识机制及智能合约相结合,保障交易安全及用户隐私安全。区块链具有无监管、无国家法律保护的特点,当区块链中消费者的权益被损害时,其权益难以得到迅速维护,在单链的情况下不利于管理,给违法犯罪分子可乘之机。因此,需考虑在合理的监管下,进行微电网电能快速交易并保护用户隐私。为此,本文设计了双链结构,包括信息链与交易链。信息链的主要功能是身份认证、审计认证和储存身份信息,为交易链提供合格的智能合约,验证相应用户的请求,解决交易纠纷等;交易链的主要功能是储存交易数据,使用加密算法保障隐私,使用合格的智能合约保障交易顺利进行,保证交易的效率及安全性。

1.1 信息链

当用户想要使用微电网电能交易平台时,首先要对其身份信息进行必要的登记注册。信息链根据用户的身份信息,产生一对密钥 P_a 和 P_b 。当用户是产消者时,用户需提供分布式发电装置的信息,信息链会生成分布式发电装置的公钥和私钥,当用户作为产消者进行微电网电能交易时,需提供发电装置的私钥加密信息,区块链系统可根据发电装置的公钥证明其产消者身份。公钥可以被其他用户知道,可用来与其他用户匿名发送消息,也可进行数字签名操作;私钥只由用户保管(一般存储在本地)。然后信息链根据用户的公钥与用户信息生成数字证书,网络内的活跃节点将生成的数字证书信息收集打包生成新的区块并广播,该区块经过其他节点验证后被写入区块链中。当该区块被写入信息链主链后,该用户的数字证书不可篡改^[25]。

数字证书的引入是为了更好地管理各用户,当数字证书被记录在区块链数据库中后,用户会与信息链签署一个智能合约,该智能合约的目的就是保障各用户的权益^[26]。当某些用户进行一些恶意交易时,智能合约会启动应对恶意交易的措施,用户的数字证书状态会被扣分。当数字证书扣分过多时,智能合约会根据合约内容,解除用户与信息链之间的合约,同时废除信息链中该用户的数字证书,进而导致该用户无法进行电能交易。

区块链中非对称加密技术的主要应用有匿名信息流、数字签名等。在匿名信息流场景中,消息的发送方A使用接收方B的公钥对信息进行加密,同时向全网广播消息,每个活跃节点都能接收到该消息,同时每个节点使用自身的私钥对加密信息进行解密,最后B使用自身私钥成功解密信息。由于每个节点都接收到了加密消息,因此接收方的身份就保证了匿名。在数字签名场景中,消息的发送方A对信息进行哈希运算得到信息摘要,同时使用自身私钥对信息摘要进行加密,将信息附加摘要密文广播给全网节点,每个节点接收到信息后,拆分信息与摘要密文,然后对信息进行哈希运算得到对照结果,同时使用A的公钥对摘要密文进行解密,将解密后的摘要密文与对照结果进行比较,如果两者相同,则表明发送方的信息没有被篡改。数字签名保证了信息的安全性,同时接收方B可以明确信息是由发送方A发送的。

1.2 交易链

交易链的大致功能为接收消费者的需求订单和产消者的竞拍信息,进行电能消费订单与产消者之间的匹配,然后发送匹配成功的电能消费订单及产消者信息,利用智能合约完成交易的结算。智能合约生成后保存在区块中,全网中每个节点都会存储

智能合约的执行状态及记录。只有通过数字证明验证的用户才能使用交易链完成电能交易。

1.3 交易流程

产消者与消费者为了满足自身的利益需求,会在基于区块链技术的微电网电能交易平台进行电能交易。如果消费者A与产消者B完成了在信息链上的登记,并且需要在交易链上完成交易,交易流程如图1所示。

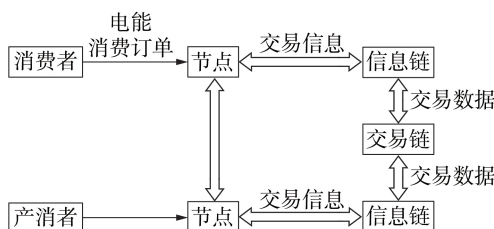


图1 交易流程图

Fig.1 Transaction process

(1) 交易发起。

消费者A依据需求电量生成电能消费订单并发送给交易平台,同时发送数字证书。信息链需要对消费者A的数字证书进行验证,首先判断消费者A是否为合法用户及其数字证书是否有效,然后向交易链提交消费者A的电能消费订单。

(2) 交易匹配。

交易链接收到电能消费订单后,将其广播到每个节点,有意向的产消者会对电能消费订单进行竞拍,交易链使用改进型的拍卖算法进行电能消费订单与产消者的匹配(具体的拍卖算法见第2节)。假设电能消费订单与产消者B完成匹配,交易链查询区块链数据库中产消者B的地址信息及其分布式发电装置的相关信息。

(3) 智能合约签署。

消费者A与产消者B根据系统匹配结果自愿签订智能合约,智能合约的内容大致包括合约电价、合约电量、传输时间及具体的责任划分。双方需支付区块链处理交易手续费及电网企业的过网费。然后,消费者A向智能合约转入相应的代币,产消者B收到相关交易信息后,对交易进行确认。当到达智能合约规定的电能传输时间时,产消者B将电能传输给消费者A。智能合约生成后存储在区块链中不可篡改,执行时不受第三方因素影响。

(4) 智能合约结算。

电能传输阶段截止后,智能合约向双方的智能电表申请电量传输信息,然后智能合约根据双方对合约的执行情况对交易进行结算,将智能合约中存储的代币发送给产消者B或者退还给消费者A。

智能合约执行结束后,交易数据需要由活跃节点整理,然后产生新的区块并向全网广播新区块信

息,区块经过其他节点验证后被写入区块链中,这种方法保证了交易内容的不可篡改性及公开透明性,交易双方因匿名通信,隐私安全也得到了保障。

2 基于图的改进型拍卖算法

在基于图的带约束的改进拍卖算法中,消费者充当拍卖者的身份,发布电能消费订单;产消者则充当竞拍者的身份,对电能消费订单进行竞拍。拍卖算法的流程为:首先,将产消者的地址信息按照不同的区域分成不同的图储存在区块链数据库中,当有消费者需要使用电能时,消费者需向系统提交电能消费订单,后台会对电能消费订单集进行赋值运算,得到电能消费订单的匹配值集合;然后,查找每个电能消费订单的最优匹配产消者进行电能匹配。

2.1 拍卖算法流程

基于图的带约束的拍卖算法的流程分为以下4个阶段。

(1) 电能消费订单集预处理阶段。

区块链系统将此次竞拍的电能消费订单收集完成后,根据地址的不同,将电能消费订单集分成 m 个集合,各订单集合为 $O_k (k=1, 2, \dots, m)$ 。同时调取区块链数据库内的图 G_k ,将分好的电能消费订单集合与图 G_k 进行对应。同时根据图 G_k ,遍历电能消费订单集合中的顶点,生成与这些顶点最近的产消者集合 $S_j = \{v_{j,i} | i \in V_k\}$,其中 $v_{j,i}$ 为距离电能消费订单最近的顶点, V_k 为电能消费订单集合中所有的顶点。

(2) 计算匹配值阶段。

电能消费订单预处理完成后,需遍历订单集合 O_k 中的电能消费订单,对电能消费订单进行赋值。在赋值的同时,删除与电能消费订单所对应的时间匹配值和距离匹配值不匹配的产消者。其中电能消费订单集合中的所有订单都会生成一个相应的赋值集合。然后根据集合 S_j ,计算图 G_k 中可以与电能消费者订单相匹配的产消者匹配值。具体的赋值及匹配值计算流程见2.2节。

(3) 电能消费订单匹配阶段。

完成电能消费订单相对应的所有产消者匹配值的计算之后,系统会根据集合 S_j 的赋值情况与该电能消费订单相对应产消者匹配值的情况,完成产消者与电能消费订单的匹配阶段。匹配值最高的产消者会成功地竞拍得到该电能消费订单。由于在这个阶段,一个产消者最多完成一个电能消费订单的竞拍,所以可能会出现以下情况:当对同一个电能消费订单竞拍的2个产消者的匹配值相等时,规定按照集合 S_j 中产消者保存的顺序优先的原则进行匹配;当同时出现2个或者多个电能消费订单的最优匹配是相同的产消者时,则优先匹配匹配值高的产消者。

(4)新电能消费订单集合产生阶段。

电能消费订单匹配阶段完成后,需将集合 O_k 中完成匹配的电能消费订单移除,同时生成新的电能消费订单集合 O_k 。因为新的电能消费订单集合中存在还未分配产消者的电能消费订单,需对电能消费订单进行新一轮的迭代匹配,重复执行阶段(2)和阶段(3),直到全部的电能消费订单完成匹配。

2.2 拍卖算法中匹配值的计算方法

区块链数据库中储存着微电网内所有产消者信息,包括产消者的地址信息。根据产消者区域的不同,可以将不同区域的产消者构成多张图。图 $G(V, E)$ 中, V 为产消者集合, E 为相邻产消者之间边的集合,产消者 $v_i \in V$ 。若其中2个产消者 v_q 和 v_p 相邻,则用 $\{v_q, v_p\} \in E$ 表示一条边。

考虑到电能传输过程中的损耗,需要将电力传输距离考虑在拍卖算法中。当消费者需要用电时,可根据自身的需求生成电能消费订单 j 。对于消费者提交的电能消费订单 j ,系统需计算距离消费者最近的产消者的距离匹配值 d_{DMV_i} ,计算流程如下:获取消费者的地址信息,调取消费者附近的产消者所构成的图 G_k ,计算每个产消者 v_i 与发布电能消费订单 j 的消费者之间的距离,得到距离消费者最近的产消者 v_i ;得到顶点 v_i 后,需开始查找与其相邻的顶点并将其储存在集合 H_1 中,然后对 H_1 进行遍历;遍历 H_1 中顶点相邻的顶点并将其存储在集合 H_2 中,循环直到生成集合 H_n (n 为遍历次数,是一个手动设置的数值);计算 $H_1, H_2, \dots, H_n$ 中所有产消者 $v_{1,i}, v_{2,i}, \dots, v_{n,i}$ 与发布电能消费订单 j 的消费者的距离匹配值 $d_{DMV(1,i,j)}, d_{DMV(2,i,j)}, \dots, d_{DMV(n,i,j)}$,其中 $v_{n,i}$ 为第 n 次遍历时电能消费订单集合中的产消者节点。假设 $d_{DMV(n,i,j)}$ 如式(1)所示。

$$d_{DMV(n,i,j)} = (1/\eta)^\varepsilon \quad (1)$$

其中, η 为距离因子,具体数值由系统设置; ε 为消费者与产消者之间的距离系数。集合 H_n 中的 ε 值越大,表明产消者距离消费者越远。 ε 值的设定首先需考虑消费者能容忍的最大距离。当 ε 值过大时,表明产消者与消费者之间的距离过远,此时将取消该产消者的竞拍资格。

在赋值的过程中,电能消费订单与产消者之间的匹配值包括距离匹配值 $d_{DMV(n,i,j)}$ 和时间匹配值 $t_{TMV(i,j)} \circ t_{TMV(i,j)}$ 表示电能消费订单 j 从提交到完成需要等待时间的匹配值。假设时间匹配值的计算式为:

$$t_{TMV(i,j)} = (t_{QT(i,j)} + t_{UT_j})/t_{LT_j} \quad (2)$$

其中, t_{UT_j} 为当前电能消费订单 j 所需要的时间; t_{LT_j} 为电能消费订单 j 的最迟限制时间,即最大容忍时间; $t_{QT(i,j)}$ 为产消者完成当前电能消费订单任务队列所

需的时间,如式(3)所示。

$$t_{QT(i,j)} = \sum_{j=1}^{t_{QT_i}} (t_{LT_j} + t_{ST_j} t_{QT_i}) \quad (3)$$

其中, t_{ST_j} 为在产消者的任务栈中相邻2个电能消费订单间切换所需的时间; t_{QT_i} 为产消者节点 v_i 的电能消费订单数量, i_n 可具体确定某个节点的某个电能消费订单。

综上所述,电能消费订单与产消者的匹配值 $m_{MV(i,j)}$ 可表示为:

$$m_{MV(i,j)} = t_{TMV(i,j)} + d_{DMV(n,i,j)} \gamma \quad (4)$$

其中, γ 为一个根据经验设定的值,用来控制时间匹配值与距离匹配值所占电能消费订单与产消者之间匹配值的比重。

在基于图的带约束的改进拍卖算法中,拍卖算法会对多个电能消费订单和多个产消者进行匹配。产消者会对每个订单进行出价 $m_{PMV(i,j)}$,根据不同的出价,电能消费订单与产消者之间的匹配值也会有一定的改变。假设本轮迭代中产消者出价后的匹配值为:

$$f_{FMV(i,j)} = m_{MV(i,j)} - m_{PMV(i,j)} \quad (5)$$

以上描述完成了拍卖算法的第1轮赋值计算,此时如果电能消费订单集合 O_k 内还有未分配的电能消费订单,则需要进行下一轮赋值计算,直至电能消费订单集合 O_k 内无电能消费订单。第2轮赋值计算过程如下所述:需检查产消者完成任务队列的时间是否超过订单的最大容忍时间,如果超过了最大容忍时间,则需删除该消费者订单。因为在第1轮赋值计算中,产消者竞拍获得了电能消费订单,所以在第2轮赋值中,电能消费订单的等待时间会加长,等待期间消费者可从电网购买电量。由于等待时间加长,需对产消者的匹配值进行衰减计算,即:

$$f_{FMV(i,j)}^\theta = f_{FMV(i,j)}^{\theta-1} \lambda \quad (6)$$

$$\lambda = (t_{LT_j} - t_{UT_j} \theta) / t_{LT_j} \quad (7)$$

其中, θ 为赋值轮数。

3 算例分析

为了验证本文所提基于区块链的微电网电能交易方法及拍卖算法的可行性,利用 solidity 语言编写智能合约,使用 JavaScript、metamask 插件、atom、以太坊平台及其 web3 接口开发微电网交易平台。智能合约 Order 见附录 A。

3.1 微电网电能交易智能合约测试

为了验证本文所提基于智能合约的微电网电能交易方法,本节使用以太坊为智能合约开发及发布平台部署并测试合约。设置包括1个产消者、1个消费者及电网企业的微电网电能交易情景,根据可能

发生的特殊情况进行了6次测试(6种场景)。其中,电网企业的电网电价为0.6元/(kW·h),电网企业对产消者的购电价格为0.4元/(kW·h),电网企业过网费为0.02元/(kW·h),每次测试的合约电量均为100 kW·h。测试结果如表1所示。

场景1中,产消者与消费者分别按照合约规定发电、用电;场景2中,消费者按照合约规定用电,而产消者的实际发电量小于合约电量,消费者需从电网企业购买需求电量;场景3中,产消者按照合约规定发电,消费者的实际用电量超过了合约电量,因此需向电网企业以电网电价购电;场景4中,消费者的实际用电量小于合约规定电量,产消者遵守合约规定发电,产消者多产的电量以保留电价向电网销售;场景5中,产消者的实际发电量、消费者的实际用电量均小于合约规定的发用电量,但是双方的发用电量相等,此时,电网企业不介入购电或售电;场景6中,产消者的实际发电量、消费者的实际用电量均大于合约规定的发用电量,但是双方的发用电量相等,此时电网企业不介入购电或售电。

由表1可知,6种场景的测试结果均与预想一致,智能合约可以顺利完成微电网电能交易的结算。因此,本文所设计的基于智能合约的微电网电能交易方法可以顺利运行,智能合约的执行不受第三方因素的影响,能够完成不可篡改、自动、透明的去中心化电能交易。

3.2 微电网电能交易拍卖算法测试

假设存在一个微电网如图2所示,其由产消者A、B与消费者1—6组成。假设消费者的电能消费订单产出时间都为20 min/单,消费者1—4的最大容忍时间为60 min,消费者5、6的最大容忍时间为40 min,产消者在进行电能消费订单竞拍时,竞拍电价都为0.3元/(kW·h), η 值取为2。当电能消费订单因超过最大容忍时间没有完成竞拍时,既可以选择以电网电价从电网购买电量,也可以参与其他微电网的电能拍卖。

根据改进型拍卖算法可计算得到距离匹配值、时间匹配值,结果如表2所示。表中(A,1)表示产消者A对消费者1的电能消费订单进行竞拍,其他类似。基于改进型拍卖算法的具体迭代结果见附录B

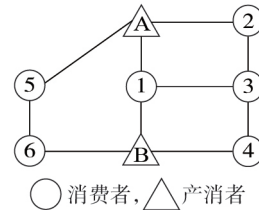


图2 微电网案例

Fig.2 Microgrid case

表2 订单匹配值

Table 2 Matching values of orders

匹配情况	距离匹配值	时间匹配值	匹配情况	距离匹配值	时间匹配值
(A,1)	0.500	0.333	(A,4)	0.125	0.333
(B,1)	0.500	0.333	(B,4)	0.500	0.333
(A,2)	0.500	0.333	(A,5)	0.500	0.500
(B,2)	0.125	0.333	(B,5)	0.250	0.500
(A,3)	0.250	0.333	(A,6)	0.250	0.500
(B,3)	0.250	0.333	(B,6)	0.500	0.500

中表B1。

由表可知,在第1轮匹配中,产消者A赢得了消费者1的电能消费订单,产消者B赢得了消费者4的电能消费订单;在第2轮匹配中,产消者A赢得了消费者2的电能消费订单,产消者B赢得了消费者6的电能消费订单;在第3轮匹配中,消费者5因超过了最大容忍时间而放弃了这次拍卖,产消者A赢得了消费者3的电能消费订单。此时产消者A的任务队列为消费者1—3的电能消费订单,产消者B的任务队列为消费者4、6的电能消费订单。

交易结果如图3所示。可见,本文所提基于区块链和改进型拍卖算法的微电网电能交易方法可以

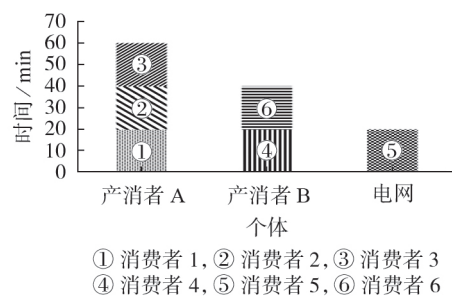


图3 交易结果

Fig.3 Transaction results

表1 微电网电能交易智能合约测试结果

Table 1 Test results of smart contract for microgrid energy transaction

场景	合约单价/[元·(kW·h) ⁻¹]	消费者实际用电量/(kW·h)	产消者实际发电量/(kW·h)	消费者支出/元	产消者收入/元	电网收入/元
1	0.58	100	100	60.0	58.0	2.0
2	0.57	100	80	59.2	45.6	13.6
3	0.56	150	100	88.0	56.0	32.0
4	0.54	50	100	28.0	48.0	-20.0
5	0.55	50	50	28.5	27.5	1.0
6	0.57	150	150	88.5	85.5	3.0

进行微电网电能的点对点交易。

电能匹配完成后,微电网电能交易平台生成智能合约,消费者需向智能合约支付代币,代币支付结果见附录B中图B1,交易详情见附录B中图B2。

本文所提方法将距离、时间及经济因素考虑在内,将距离较远、最大容忍时间较短的消费者及时剔除消费者电能消费订单集合,提高了交易效率。产消者所产生的电能得到了合理的分配,完成了产消者任务队列的扩充,实现了微电网电能的内部交易,减少了电能的浪费及电能在线路中的损耗。

4 结论

基于区块链和改进型拍卖算法的微电网电能点对点交易方法,可以用于实现电能的点对点交易及安全可靠的交易结算。使用区块链分布式数据库和非对称加密技术保障了交易数据的安全性及隐私性,智能合约保障了在没有第三方信任机构的情况下交易能够顺利进行及结算,改进型拍卖算法完成了电能消费订单与产消者之间的合理匹配。算例结果表明:本文所提方法可实现微电网电能的点对点交易,以拍卖机制调整市场行为,产消者任务队列得到了一定程度的扩展;该方法能够进行规模小、任务量大、低成本的电能点对点交易,保障了交易的高效性及经济收益。

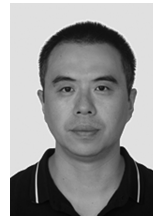
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李振坤,何凯,路群,等. 售电市场环境下载网型微电网的电源配置及优化运行[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 41-49.
LI Zhenkun, HE Kai, LU Qun, et al. Power configuration and optimal operation of grid-connected microgrid in electricity selling market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 41-49.
- [4] 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.
- [5] 杨挺,赵俊杰,张卫欣,等. 电力信息物理融合系统数据区块链生成算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 74-80.
YANG Ting, ZHAO Junjie, ZHANG Weixin, et al. Data block-chain generation algorithm of cyber physical power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 74-80.
- [6] MENGELKAMP E, NOTHEISEN B, BEER C, et al. A block-chain-based smart grid: towards sustainable local energy markets[J]. Computer Science-Research and Development, 2018, 33(1/2): 207-214.
- [7] ALAM M T, LI H, PATIDAR A. Bitcoin for smart trading in smart grid[C]//IEEE International Workshop on Local & Metropolitan Area Networks. Beijing, China: IEEE, 2015: 1-5.
- [8] 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.
- [9] MENGELKAMP E, GAERTTNER J, ROCK K, et al. Designing microgrid energy markets: a case study: the Brooklyn microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 210: 870-880.
- [10] WELISCH M. Multi-unit renewables auctions for small markets: designing the Danish multi-technology auction scheme[J]. Renewable Energy, 2019, 131: 372-380.
- [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 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.
- [12] 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.
- [13] 鲁静,宋斌,向万红,等. 基于区块链的电力市场交易结算智能合约[J]. 计算机系统应用, 2017, 26(12): 43-50.
LU Jing, SONG Bin, XIANG Wanhong, et al. Smart contract for electricity transaction and charge settlement based on blockchain[J]. Computer Systems & Applications, 2017, 26(12): 43-50.
- [14] CHEN S J, LIU C C. From demand response to transactive energy: state of the art[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(1): 10-19.
- [15] 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.
- [16] 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). Krakow, Poland: IEEE, 2014: 1-6.
- [17] 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.
- [18] 田秀霞,陈希,田福粮. 基于区块链的社区分布式电能安全交易平台方案[J]. 信息安全学报, 2019(1): 51-58.
TIAN Xiuxia, CHEN Xi, TIAN Fuliang. Community distributed power security transaction scheme based on blockchain[J]. Netinfo Security, 2019(1): 51-58.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 安庆文. 基于区块链的去中心化交易关键技术研究及应用[D]. 上海: 东华大学, 2017.
AN Qingwen. Research and applications on the key techniques of decentralized transaction based on blockchain[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [22] 张栋珀. 基于区块链的电能交易平台设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
ZHANG Dongpo. Design and implementation of electric energy trading platform based on blockchain technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [23] 薛磊. 基于区块链技术的分布式微电网交易体系研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
XUE Lei. Research on photovoltaic microgrid trading system based on blockchain technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [24] 田苗状. 拍卖算法研究及其应用[D]. 青岛: 青岛大学, 2015.
TIAN Miao Zhuang. Research and application of auction algorithms[D]. Qingdao: Qingdao University, 2015.
- [25] 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.
- [26] 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.

作者简介:



秦金磊

秦金磊(1979—),男,河南武陟人,讲师,博士,主要研究方向为区块链技术、系统可靠性、能源互联网等(E-mail: jqlqin717@163.com);

孙文强(1995—),男,河南武陟人,硕士研究生,主要研究方向为区块链技术、能源互联网等(E-mail: 494511651@qq.com);

李整(1981—),女,河北蠡县人,讲师,博士,主要研究方向为智能群体算法、机组组合优化等(E-mail: yeziperfect@163.com);

朱有产(1963—),男,浙江浦江人,教授,主要研究方向为云环境技术、网络安全等(E-mail: hd_zyc@sina.com)。

(编辑 陆丹)

Energy transaction method of microgrid based on blockchain and improved auction algorithm

QIN Jinlei^{1,2}, SUN Wenqiang^{1,2}, LI Zheng^{1,2}, ZHU Youchan^{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 continuous advancement of the electricity market reform and the opening of the electricity sale market, the proconsumers with distributed generation as the main bodies enter the market. The traditional centralized energy transaction is not conducive to improving the transaction enthusiasm of proconsumers and has some problems, such as low transaction efficiency, vulnerable large target, difficulty in data loss recovery, opaque transaction information and so on. Based on the above problems, an energy transaction method of microgrid based on blockchain technology and improved auction algorithm is proposed. Firstly, the double-chain structure is used to complete the safe energy transaction of the microgrid. The information chain is used to complete the certification and access of both parties to the transaction, and the transaction chain is used to complete the exchange of tokens and energy between the two parties. The two parties of the transaction complete the transaction settlement by signing the smart contract to avoid the generation of bad debts without the third-party trust institution. Then, the improved auction algorithm is proposed to complete the match between the energy consumption order and the proconsumers. The final matching results are affected by the factors such as distance, time and economy to ensure the reasonable energy distribution. The example results show that the proposed energy transaction method of microgrid based on blockchain and improved auction algorithm can complete the direct energy transaction within the microgrid. The orders and the proconsumers get a reasonable match, ensuring the fairness, high efficiency and security of the microgrid energy transaction.

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

附录 A

智能合约 Order 具体介绍如下。

```
contract Order {
    address public owner;
    string public name;
    string public content;
    uint public amount;
    uint public price;
    mapping(address=>uint)public users;
    function createOrder( );
    function buy( );
    function getOrder( );
    function getDetail( );
}
```

智能合约 Order 中,owner 为合约的创建者;name 为电能订单标题;content 为电能订单详细描述;amount 为销售电量;price 为电价;users 为购买者的信息。主要的方法有订单合约创建方法 createOrder、订单购买方法 buy、订单详情方法 getDetail、获取当前测试链中所有电能订单方法 getOrder。

附录 B

表 B1 算法迭代过程
Table B1 Iterative process of algorithm

匹配情况	迭代结果		
	第 1 次迭代	第 2 次迭代	第 3 次迭代
(A,1)	0.533	—	—
(B,1)	0.533	—	—
(A,2)	0.533	0.356	—
(B,2)	0.158	0.105	—
(A,3)	0.283	0.189	0.126
(B,3)	0.283	0.189	0.126
(A,4)	0.158	—	—
(B,4)	0.533	—	—
(A,5)	0.533	0.267	—
(B,5)	0.283	0.226	—
(A,6)	0.283	0.226	—
(B,6)	0.533	0.267	—

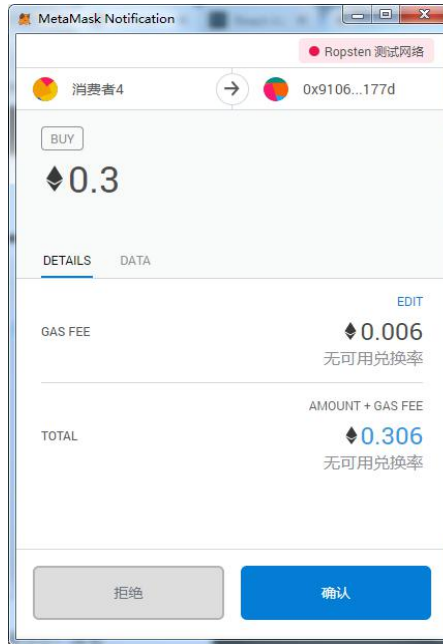


图 B1 代币支付图
Fig.B1 Token payment

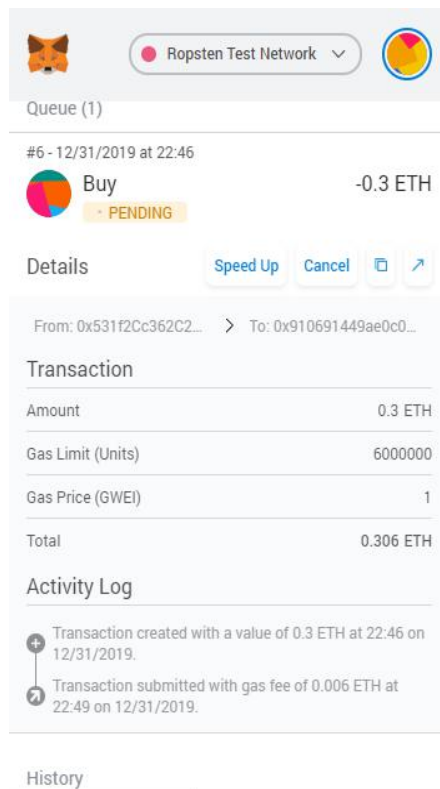


图 B2 交易详情图
Fig.B2 Transaction detail