

能源互联网中基于区块链的 电力交易和阻塞管理方法

邵雪，孙宏斌，郭庆来

(清华大学 电机工程与应用电子技术系，北京市 海淀区 100084)

Electricity Transactions and Congestion Management Based on Blockchain in Energy Internet

TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Energy internet has become a hotspot attracting academia's close attention. Under this circumstance, participation of prosumers will result in a new business mode and electricity will be traded between these prosumers directly. These transactions can be managed either by an established central operator or by market participants autonomously. Establishing a central operator will lead to a lot of problems, including high cost, low information security and personal privacy leakage. However, trust problem is hard to solve in autonomous management of transactions between market participants. Blockchain is a distributed storage technology where data is stored and managed in every node in the network and is difficult to tamper. Therefore, it can deal with trust problem. This paper proposes a method of managing electricity transactions based on blockchain. Transactions are stored on blockchain in form of smart contracts and money is transferred automatically. Electric data collected by smart meters is also stored on blockchain. An independent central operator only deals with congestion management problem. The paper also improves convergence stability in distributed security checking method. A case consisting of six nodes is presented to prove feasibility of the method.

KEY WORDS: bilateral electricity transaction; congestion management; blockchain; energy internet

摘要：能源互联网是当前学术界关注的新热点。在能源互联网的环境下，大量产消者的接入将会产生新的商业模式，形成电力的直接双边交易。对于双边交易的管理，有中心化机构管理和去中心化管理两种解决方案。如果建立一个中心化机构对交易信息进行管理，存在运行成本高、信息安全性差、用户隐私难以保障等问题。而在缺乏中心化机构管理的情境下，电力市场交易主体之间存在信任问题。区块链技术是一个分布式的存储技术，数据保存在网络中的每个节点中，由所有节点共同维护，难以篡改，能够有效地解决交易双方间的信任问题。为此，提出了弱中心化管理电力交易的方法，

即利用区块链技术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，记录智能电表采集的电能数据，中心机构仅对达成的交易进行安全校核和阻塞管理。比较总结了2种阻塞管理方法，改进了现有文献中分布式安全校核的算法，提高了算法收敛的稳定性。最后，利用一个6节点算例验证了所提方法的可行性。

关键词：电力双边交易；阻塞管理；区块链；能源互联网

DOI : 10.13335/j.1000-3673.pst.2016.12.002

0 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，大量消费者将进化为产消者，可再生能源能够实现局部消纳，减少能量传输过程中的损耗，实现“零边际成本社会”^[1-2]。大量产消者的接入将会产生新的商业模式，形成电力的自由双边交易^[3]。市场参与主体的增加使得交易信息的海量化，对电力交易进行管理难度大大增加，因此需要寻求一种有效的方式来管理电力交易。

对交易的管理有中心机构管理和市场成员自发管理2种方案。采用中心机构管理的方法存在以下缺陷：1) 中心机构需要雇佣大量人员对中心数据库进行维护，在交易清算的过程中，要与银行等第三方金融机构进行信息的频繁校对，成本较高。2) 从信息安全角度上来说，一旦中心机构受到攻击，数据可能丢失或被篡改，酿成严重后果。此外，过度中心化导致信息不对称，中心机构掌握市场的所有交易信息，用户隐私难以保障，可能存在利用中心权力损害参与者利益的情况。

鉴于以上问题，本文提出采用区块链技术让市场参与者对交易进行自发管理。区块链技术是分布

式存储的账本，每个区块相当于账本中的一页，记录了一段时间内的交易信息以及上一个区块的哈希值。区块按时间顺序相连，形成区块链。区块链被记录在网络中的所有节点中，由所有节点共同维护。在区块链网络中，每一笔交易都是可追溯且难以篡改的。因此在交易双方进行交易时，可以通过查阅之前的交易记录来验证交易是否能够达成。此外，在区块链的基础上引入智能合约，能够扩展区块链的功能。交易双方能够事先将达成的协议以代码的形式存储在区块链上，当合约执行时间到来时，智能合约将会根据事先的协定自动执行，完成价值的转换，从而解决交易双方之间的信任问题。由于交易被记录在每一个节点中，当某些节点受到攻击时，受到攻击的节点可以通过未收到攻击的节点重建数据，保证数据安全性。

区块链在能源领域比较有代表性的应用是 LO3 Energy 与 Consensus Systems 合作设计运行的纽约微电网区块链售电项目。这 2 家公司在纽约布鲁克林的一个小街区为十户住户建立了一个基于区块链系统的可交互分布式光伏售电平台 TransActive Grid。平台上的光伏发电者和电力消费者可以基于区块链，不依赖于任何电力公司，直接交易光伏电力。此外，文献[4-5]提出用电子货币表示电力，将电力当成普通商品进行买卖。

然而，完全按照市场达成的电力交易可能不符合网络约束条件，因此应该对电力交易进行安全校核。之前关于利用区块链实现电力交易的文献和实验都仅把电力交易当成普通商品交换，没有考虑网络约束，在实际应用中缺乏可行性。本文在之前文献和具体案例的基础上，考虑网络约束，提出了利用区块链和智能合约进行电力交易管理的方案，在保障电网安全的情况下实现了电力市场参与者对交易自行管理，解决了电力市场参与者之间的信任问题，在实际应用中具有更强的可行性。

在分布式安全校核方面，文献[6]通过迭代的方式计算出每个节点的相角，进而求出线路功率。然而其迭代式不能保证收敛性，且迭代次数过多。本文改进了文献[6]中的分布式计算潮流的算法，提出了基于逐次超松弛(successive over relaxation，SOR)迭代法的分布式潮流计算法，减少了迭代次数，增强了收敛的稳定性。

1 总体架构

本文提出了弱中心化的电力交易和阻塞管理方案。弱中心化指电力交易的博弈过程及交易信息

的管理和记录由电力市场的参与者完成，中心机构对交易的安全性进行管理。目前，安全校核工作可利用分布式算法在没有中心机构的条件下让网络中各个节点自行进行。但在阻塞管理方面，现有文献的阻塞管理方案都需要掌握交易信息以及实际网络的线路参数，在缺乏中心化机构的情况下，难以让各个节点自发进行。因此，本文提出设立一个中心机构对交易进行阻塞管理。

虽然中心机构仍然存在，但与传统的方式相比，其权力得到了限制。传统的管理模式下，交易中心掌握所有交易数据，用户隐私性难以保障。然而，在弱中心化模式下，中心机构仅对阻塞进行管理，在设定阻塞价格的过程中，只需了解线路越限信息，并不需要了解具体的交易信息，用户的隐私得到了更好的保护。

具体的整个交易过程按阻塞管理的方法不同可以用图 1 和图 2 所示。

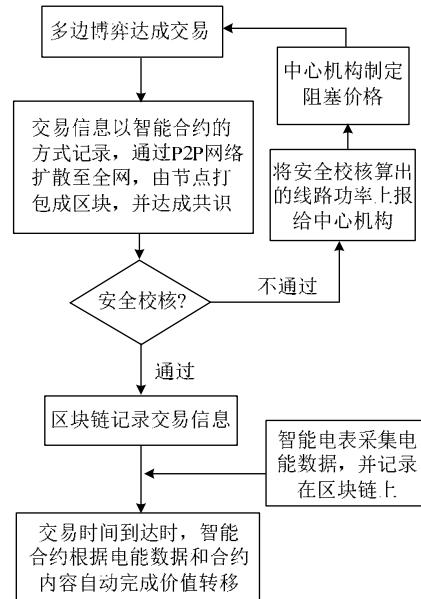


图 1 总体交易流程图(利用阻塞价格进行阻塞管理)

Fig. 1 Flowchart of transaction(using congestion price to manage congestion)

区块链中的每一个用户都安装了统一的区块链客户端，该客户端可以实现信息的记录以及与其他节点的通信。对于直接的发电和用电用户，该客户端还将与其智能电表相关联，自动将其发用电数据记录在区块链上。首先，电力交易者经过博弈达成交易，以智能合约的形式记录，并通过 P2P 网络扩散到全网的各个节点。全网各个节点通过通信，对达成的交易形成共识。接下来，由市场参与者对临时交易进行分布式安全校核或者由中心机构进行安全校核。如果安全校核通过，交易便会被记录在区块链上。如果交易不满足安全校核，中心机构

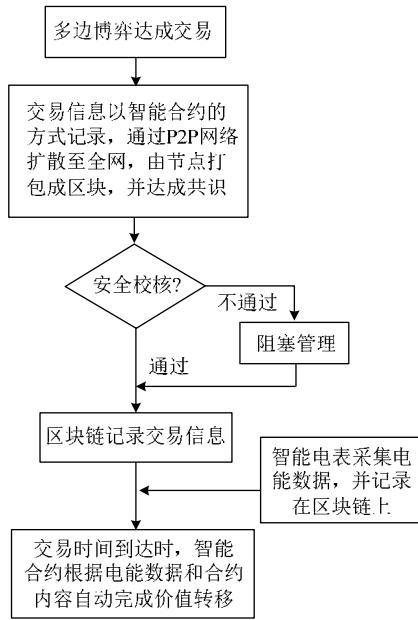


图 2 总体交易流程图(中心机构通过解最优化问题进行阻塞管理)

Fig. 2 Flowchart of transaction(central operator solving an optimal problem to manage congestion)

对交易进行阻塞管理。如果采用制定阻塞价格的方法进行交易的调整(图 1)，市场参与者重新进行博奕达成交易，并重新进行安全校核，经过反复迭代，最后达成满足线路潮流约束的交易，并将交易记录在区块链上。如果由中心机构以交易调整量最小作为目标函数，线路潮流为约束条件，对交易进行调整(图 2)，则在调整后可直接将交易信息记录在区块链上。在整个过程中，智能电表一直记录每个用户的用电数据，并将数据记录在区块链上。当交易清算时间到达时，智能合约将根据用户的实际用电数据以及事先协定自动完成资金的转移。

下文将就安全校核、阻塞管理以及区块链应用于电力交易和安全校核这 3 个方面的具体细节进行详细阐述。

2 安全校核

安全校核有 2 种方案：第 1 种是市场参与者将达成的临时交易上报给中央管理机构，中央管理机构根据交易以及线路参数，运用潮流方程计算出交易达成后每条线路的潮流，并与线路最大潮流进行比较，判断交易是否满足安全校核；第 2 种方案是市场参与者根据自身达成的临时交易以及本地局部的线路参数通过迭代的方式分布式地算出与自身相连的线路的潮流，并与线路最大潮流进行比较，判断交易是否满足安全校核。第 1 种方案较为传统，在这里不加赘述。第 2 种方案的具体做法如下：

首先，网络中选取一个参考节点，其相角设定

为 0。其他节点的相角初始值也设为 0。设与节点 i 相连的节点的集合为 Ω_i 。当交易达成后，节点 i 可计算出其向电网注入的功率为 P_{io} 。在迭代过程中，与节点 i 物理上相连的节点会给节点 i 发送相角信息，节点 i 根据如下公式更新其相角。

$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) - \gamma(-P_i + \sum_{j \in \Omega_i} \frac{\theta_i(k) - \theta_j(k)}{X_{ij}}) \quad (1)$$

式中： θ_i 表示节点 i 的相角； k 表示迭代次数； X_{ij} 表示节点 i 和节点 j 之间的阻抗； $\gamma = \omega / \sum_{j \in \Omega_i} \frac{1}{X_{ij}}$ ， ω 为松弛因子。

该方法和文献[6]的主要不同在于迭代式中 γ 的选取。文献[6]中 γ 始终为一定值，而现在 $\gamma = \omega / \sum_{j \in \Omega_i} \frac{1}{X_{ij}}$ ，且满足 $0 < \omega < 2$ 。

从数学上来说，式(1)实质上是用 SOR 迭代法解方程 $B\theta = P^{[7]}$ (B 为节点导纳矩阵的虚部； θ 为一列向量，表示各节点的相角； P 为一列向量，表示各节点的注入功率)。

根据定理：对于 $Ax=b$ ，如果矩阵 A 是对称正定的，则 SOR 迭代法对于 $0 < \omega < 2$ 是收敛的。因为 B 对称正定，所以该方法对于 $0 < \omega < 2$ 都收敛。

当对于所有的节点，都有 $|-P_i + \sum_{j \in \Omega_i} \frac{\theta_i(k) - \theta_j(k)}{X_{ij}}| < \varepsilon$ 时，其中， ε 为一很小的正数，整个迭代过程终止，得到最终解。

要注意的是，分布式安全校核是在多边博奕达成交易矩阵之后完成的，因此其迭代效率与博奕方的多少没有直接联系，主要与电力网络的节点数量有关。

3 阻塞管理方法

大多数文献^[8-14]将双边及多边交易下的安全校核及交易方案调整问题转化成了线性或非线性约束条件下的最优化问题，采用直流或交流算法计算线路潮流，以计及权重后的交易调整量变化(即计及权重后的矩阵各个元素该变量的平方和)最小为目标函数，求取了当交易不满足安全校核时的最优交易调整方案。此外还有文献尝试利用价格来影响双边交易的博奕结果，文献[15-17]提出在双边交易不满足安全校核时，提高交易的阻塞价格，利用价格对供求关系的影响来削减交易量。

3.1 阻塞价格调整法

阻塞价格的制定应该反映线路阻塞的严重程度以及每笔交易对阻塞的影响程度的大小。综合以

上 2 点考虑，可以按照以下规则制定阻塞价格：

初始阻塞价格为 0。当线路发生阻塞时，对于对阻塞有贡献的交易，按照如下公式更新阻塞价格^[17]

$$\pi_{ij} = \pi_{ij} + \alpha \sum_{l \in L} |P_l - P_{l\max}| \|P_{l\max}\| \quad (2)$$

式中： π_{ij} 表示阻塞价格； L 为交易 t_{ij} 对线路造成阻塞有贡献的线路的集合； P_l 为线路 l 的实际功率； $P_{l\max}$ 为线路 l 可承受的最大功率； α 定义为阻塞价格系数，其具体数值需要根据实际市场的阻塞调整情况确定。

3.2 中心机构优化

根据文献[8]，所有的满足安全交易的矩阵 T 构成一个安全域 S 。对交易矩阵进行修改，实质上是在安全域内找到与原来的交易矩阵距离最近的矩阵 T 。设市场提出的交易矩阵为 T_p ，调整后的交易矩阵为 T 。 T_p 中第 i 行第 j 列的元素为 $t_{p_{ij}}$ ， T 中第 i 行第 j 列的元素为 t_{ij} 。则要找到与原来交易矩阵距离最近的矩阵 T ，实质上是解如下的最优化问题：

$$\min \sum_{i,j=1, i \neq j}^n (t_{ij} - t_{p_{ij}})^2 \quad (3)$$

设线路的最大传输功率向量为 $P_{l\max}$ ，则约束条件为

$$-P_{l\max} \leq P_{branch} = Y_{branch} A (A^T Y_{branch} A)^{-1} M T u \leq P_{l\max} \quad (4)$$

式中： $T = \begin{bmatrix} 0 & t_{12} & \cdots & t_{1n} \\ t_{21} & 0 & \cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & t_{n2} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$ ， t_{ij} 表示 i 给 j 提供的电

力； $u = [1 \ 1 \ \cdots \ 1]^T$ ，为 n 行 1 列的元素全为 1 的向量； M 为交易网络关联矩阵，设交易中有 n 个市场主体，实际电网中有 m 个节点，则 M 为 m 行 n 列的矩阵，设第 i 行第 j 列的元素为 M_{ij} ，则有

$$M_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{市场主体 } j \text{ 不在节点 } i \text{ 上} \\ 1, & \text{市场主体 } j \text{ 在节点 } i \text{ 上} \end{cases} \quad (5)$$

A 为网络的节点支路关联矩阵； Y_{branch} 为支路原始导纳矩阵； P_{branch} 表示线路的实际传输功率。

4 区块链在交易中的应用

4.1 智能合约

区块链从本质上来说是分布式数据库，与传统数据库相比，具有数据难以篡改、信息安全性高等优势。然而如果仅仅作为数据存储的技术，其功能有限。因此人们提出将智能合约与之相结合，实现更为复杂的功能。

智能合约是一套以数字形式定义的承诺，承诺控制着数字资产并包含了合约参与者约定的权利和义务，由计算机系统自动执行^[18]。将智能合约以

数字化的形式写入区块链中，由区块链技术的特性保障存储、读取、执行整个过程透明、不可篡改。同时，由区块链自带的共识算法构建出一套状态机系统，使智能合约能够高效地运行。

4.2 交易的达成及信息的记录

考虑到电力交易的安全校核需要掌握一段时间内所有的交易信息，因此本文给交易设定了一个周期：每 15 min 达成一组交易。

市场参与者经过博弈达成双边或多边交易后，将达成的交易以智能合约的形式暂时储存在各个节点的内存中。每一笔智能合约具有如下属性：电量、价格、交易时间、违约金额。其中，交易时间指交易双方实际进行电力交换的时间，同时也是完成货币清算即价值转移的时间，同一个周期内的一组交易的交易时间相同。违约金额指发电方如果没有发出相应电量应该赔偿的金额。交易双方分别用各自的私钥进行签名，以确保合约的有效性。

智能合约缔结完成后，通过 P2P 网络广播到每一个节点。区块链中的节点将收到的合约保存在内存中，等待新一轮的共识时间，触发对合约的共识和处理。在共识时间到达时，节点会把最近一段时间内保存的所有合约打包成一个合约集合，以 merkle tree 的形式保存在区块中。Merkle tree 是一种二叉树，所有的交易信息都被记录在二叉树的叶节点上。叶节点同时记录了交易信息的哈希值。Merkle tree 的所有内部节点都记录了其子节点的哈希值之和的哈希值。当某个叶节点的信息发生修改时，其哈希值以及其所有父节点的哈希值都会被改变，最终导致根节点的哈希值被改变。当有人想恶意篡改交易信息并将其广播到网络中其他节点时，其他节点只需校验 merkle tree 的根节点，就能够得知交易信息被篡改，从而不接受被篡改的信息。节点将打包好的区块结构发送给网络中的其他节点，其他验证节点受到这个区块结构后，把里面包含的合约集合的哈希值取出来，与自己保存的合约集合进行比较，同时发送一份自己认可的合约集合给其他的验证节点；通过这种多轮的发送和比较，所有的验证节点最终在规定的时间内对最新的合约集合达成一致^[17]。

4.3 安全校核及阻塞管理的执行

所有节点在对最新的合约集合达成一致后，对交易进行安全校核。若安全校核通过，合约集合将会被记录在区块链中。若安全校核不通过，中心机构将会对交易进行阻塞管理，直到生成新的满足安全校核的交易集合。该交易合约集合将会被记录在

区块链上。

4.4 价值转移的实现

在系统实际运行中，智能电表会记录用户在一定时间内发出和使用的电能，并将其记录在区块链上。每当交易时间到达时，智能合约将会根据智能电表发送到区块链上的电能数据来自动完成资金的转移。如果发电者在规定的时间内发出了相应的电能，电费将自动从用电者账户转移到发电者账户。如果发电者未能发出相应的电能，发电者账户将会自动被扣除相应的违约金。这个过程由事先以合约编好的程序自动执行。合约在事先就以程序的形式记录在区块链上，电能数据也保存在区块链上，两者都不可篡改，保证了交易双方事先达成的协定能够执行，解决了交易双方之间的信任问题；且不需要第三方机构参与到清算过程中，降低了交易成本。

4.5 区块链的分类

按节点的记录权限来划分，区块链可以分为公有链和私有链。

公有链中的每个节点都有对区块链数据读写的权限，实现了完全去中心化。然而，它存在以下几点问题：首先，网络中的节点数量太大，交易达成共识需要将交易信息传播给网络中绝大多数节点，通讯时间长，交易速度慢。其次，由于公有链上的信息对每个节点都是公开的，用户的隐私性不能得到很好的保证。再次，对于每一笔交易合约，虽然需要记录的信息并不算多，但随着时间的推移，区块链的数据量将会越来越庞大。让所有的节点都保存历史以来所有的交易记录对节点的存储容量提出的要求较高，并不经济。一种解决方式是把网络中的节点划分为2类：全节点和轻节点。全节点记录所有的交易信息，而轻节点只记录所有的区块头(即Merkle tree的根节点)以及与自己有关的交易信息即可。用这种方式可以大大减小轻节点的数据存储量，而且能够有效地避免数据被篡改。但这样又会带来一些缺点：轻节点不能够完全依照自身存储的信息验证每一笔交易是否有效，如果其想验证交易是否有效，需要向全节点发出请求，获取额外的交易信息。同时，全节点和轻节点的区别使得整个交易网络的节点并不是完全平等的，并不能够实现完全的去中心化。

私有链中，只有少数节点对区块链数据有完整的读写权限，其他节点对区块链中的数据只有有限的读取权限。在现有的电力市场架构中，可选取交易中心、大型的发售电公司以及园区的综合能源服

务商等。由于记录节点减少，交易达成共识的时间将大大缩短，交易速度比公有链快。而且由于网络中绝大多数节点对于数据只有有限的读取权限，用户的隐私能得到更好的保护。其缺点在于网络中的节点地位并不平等，有悖于去中心化的初衷。但综合考虑通信和存储效率，总体说来，私有链比公有链更加适合市场环境。

5 算例分析

5.1 算例设置

该算例包含3个发电机和3个购电者，它们之间的网络连接关系如图3所示，其中节点4为产消者，在这个算例中为购电者。

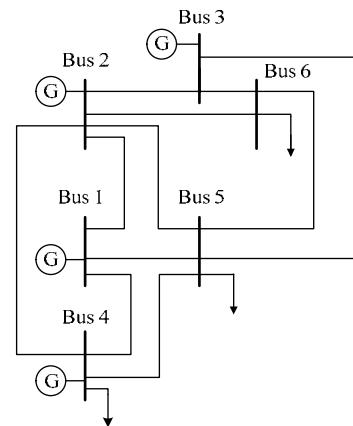


图3 6节点系统网络连接图

Fig. 3 6-node power system diagram

发电机和购电者的博弈采用斯坦伯格主从博弈模型。在实际市场中，发电者和购电者除了追求经济利益最大化外，可能还会有其他外部性因素的考虑。简单起见，本文约定发电者和购电者的目标函数都为自身的经济利益最大化。发电机首先制定价格和发电量策略，用户根据发电机的价格和自身的收益函数制定其用电策略。

发电机的收益函数为

$$U_i = p_i s_i - [a_i (\sum_{j=1}^m (t_{ij} + L_{ij})^2 + b_i \sum_{j=1}^m (t_{ij} + L_{ij}) + c_i] - 0.5 \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} t_{ij} \quad (6)$$

式中： p_i 为发电机制定的电价； t_{ij} 为发电机 i 和用户 j 之间的交易量，与前文 3.2 中的定义一致； L_{ij} 为交易 t_{ij} 所需分摊的网损； λ_{ij} 为交易 t_{ij} 所需支付的输电费用； a_i 、 b_i 、 c_i 为和发电成本有关的系数； s_i 为发电机的实际售电量。

发电机的价格调整策略^[19]如下

$$p_j(k+1) = p_j(k) + \sigma_j(r_j(k) - 1) \quad (7)$$

式中： $r_j = D_j / l_j$ ， D_j 为实际需求电量， l_j 为发电机

计划发电量； σ_i 为一正的系数，由每台发电机根据自身的发电策略确定。

发电机的发电量的调整策略为

$$l_i(k+1) = \frac{p_i(k+1) - b_i(1 + \beta_i(k)) - 0.5\lambda_i(k)}{2a_i(1 + \beta_i(k))^2} \quad (8)$$

式中： $\beta_i(k) = \frac{dP_{\text{loss}}}{dl_i}(k)$ ，为增加单位发电量所带来的网损增量， P_{loss} 表示网损； λ_i 表示发电机 i 的所有交易所需支付的输电费用。

购电者的购电策略为解使自身收益最大化的最优化问题，目标函数为

$$\max U_j = b_j \sum_{i=1}^n t_{ij} - \sum_{i=1}^n p_i t_{ij} - a_j (\sum_{i=1}^n t_{ij})^2 \quad (9)$$

式中 b_j 、 a_j 为和购电者收益有关的系数。

发电者和购电者按如上策略进行反复迭代，最终达成如下交易矩阵：

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 2.87 & 0 & 37.51 \\ 0 & 0 & 0 & 34.86 & 3.87 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 33.68 & 0 \\ -2.87 & -34.86 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.87 & -33.68 & 0 & 0 & 0 \\ -37.51 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

5.2 2种分布式算法的比较

采用分布式算法计算各条线路的功率，得到各条线路的功率如表 1 所示。

表 1 线路初始功率
Tab. 1 Initial line flow

线路		实际功率/MW	最大功率/MW
起始编号	终点编号		
1	2	7.42	20
1	4	18.19	20
1	5	14.77	20
2	3	1.12	20
2	4	21.53	20
2	5	9.82	20
2	6	13.67	20
3	5	10.26	20
3	6	24.54	20
4	5	1.99	20
5	6	-0.71	20

如果采用文献[6]中的算法，当 $\gamma = 0.07$ 时，迭代次数最小为 39 次。如果采用改进后的分布式算法，当 $\omega = 1.4$ 时，迭代次数减小为 28 次。

改变线路参数，将线路 12 和线路 56 的电抗值都改为 0.1。用文献[6]中的分布式算法，当 $\gamma = 0.06$ 时，迭代次数最小为 33 次。如果采用改进后的分布式算法，当 $\omega = 1.4$ 时，迭代次数最小为 29 次。

在 2 种不同的线路参数下，迭代次数与 γ 和 ω

的关系可以分别用如图 4、5 所示。

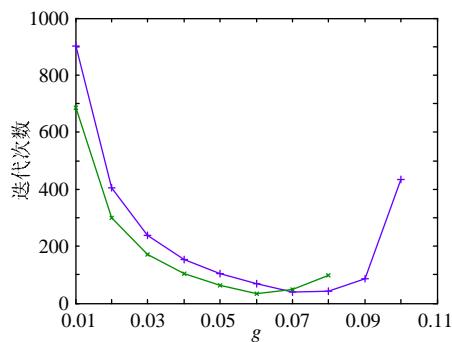


图 4 迭代次数与 γ 的关系

Fig. 4 Relation between number of iterations and γ

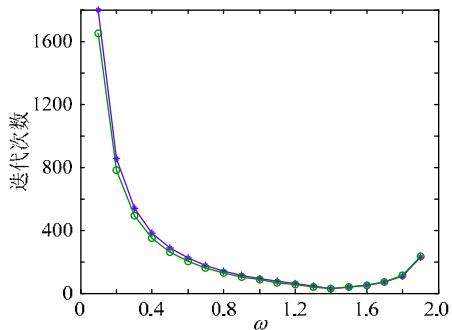


图 5 迭代次数与 ω 的关系

Fig. 5 Relation between number of iterations and ω

改变线路参数后，改进后的分布式算法在最小迭代次数方面仍然优于文献[6]的分布式算法。此外，通过仿真可以得出，在改变线路参数后，当 γ 大于 0.08 时，文献[6]的算法将不收敛。利用改进后的算法，只要当 ω 在 0 到 2 之间，算法都是收敛的，可见改进后的算法具有更强的稳定性。

5.3 2种阻塞管理方法的比较

用制定阻塞价格的方法进行调整，结合上文所述的博弈模型，经仿真得到的交易矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 31.34 & 12.29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.70 & 0 & 34.51 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 23.74 & 0 \\ -31.34 & -3.70 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -12.29 & 0 & -23.74 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -34.51 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

中心机构以交易调整量的平方和最小为目标函数，对交易进行调整，达成的交易矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1.63 & 0.61 & 31.64 \\ 0 & 0 & 0 & 32.79 & 3.64 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 26.53 & 0 \\ -1.63 & -32.79 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.61 & -3.64 & -26.53 & 0 & 0 & 0 \\ -31.64 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

用 2 种方法调整所得的各条线路的功率如表 2 所示。

表 2 阻塞管理后的线路功率

Tab. 2 Line flow after congestion management

线路	实际功率 (阻塞价格法)/ MW	实际功率 (中心机构解 最优化问题)/MW	最大 功率/MW
起始 编号	终点 编号		
1	2	9.11	20
1	4	18.63	20
1	5	15.90	20
2	3	3.80	20
2	4	19.03	20
2	5	9.82	20
2	6	14.68	20
3	5	7.68	20
3	6	19.86	20
4	5	2.61	20
5	6	-0.03	20

比较 2 种方法的调整结果，可以看出 2 种方法都能够很好地解决线路阻塞问题。从交易矩阵的变化来说，采用制定阻塞价格的方法，交易的匹配关系可能会发生改变。而如果是中心机构解最优化问题，交易的匹配关系通常不会发生改变，交易量会减小。

从用户隐私性的角度来说，如果中心机构采用解最优化问题，需要了解所有的用户交易信息。而采用发布阻塞价格的方法，中心机构只需要了解线路潮流越限程度的信息，不需要掌握用户的具体交易信息。而且，发布阻塞价格的方法基于市场，用户拥有更多的选择权，能够提高用户的市场参与程度。从这 2 个角度来说，阻塞价格调整法更优。

5.4 区块链的应用实例

经过博弈后，3 台发电机的售电费用如表 3 所示。

表 3 发电机售电费用
Tab. 3 Electric prices of generators

发电机序号	价格/(USD/MW·h)
1	19.71
2	20.03
3	20.15

中心机构以交易调整量的平方和最小为目标函数，对交易进行调整，达成交易矩阵。

以交易 t_{24} 为例，发电机 2 卖给购电者 1 的电量为 32.79，单价为 20.03，总价为 656.78。此外，在交易中买卖双方还要支付输电公司输电费用，设输电费用单价为 2，应该付给输电公司 65.58 元。为防止发电商违约，双方事先会商定违约金额。不妨设它们商定的违约金额单价为 30。在合约中还会规定具体的交易清算时间，在这个案例中设为 12:00。简单起见，设发电机 2 的地址为 0x02，购电者 1 的地址为 0x04，输电公司的地址为 0x07。该笔交易需要记录的信息如表 4 所示。

表 4 t_{24} 的交易信息Tab. 4 Transaction information of t_{24}

售电者 地址	购电者 地址	输电 公司 地址	交易 电量/ 地址	输电 费用(单 价)/USD	购电 费用(单 价)/USD	违约 金额/ USD	交易清 算时间
0x02	0x04	0x07	32.79	2	20.03	30	12:00

当交易达成后，购电者、售电者、输电公司将会对该合约用私钥进行签名，并进行加密，通过 P2P 网络发布给网络中的所有其他节点。其他节点在收到合约后，把所收到的合约打包成合约集，以 merkle tree 的形式记录。因为这些交易经过中心机构调整，已经通过了安全校核，所以节点会在之前的区块链末端创建新的区块，将 merkle tree 存储在新的区块中，这棵树就具有了不可篡改的特性。由交易矩阵可知，一共达成了 6 笔交易，这 6 笔交易以下面的 merkle tree 的形式被记录(图 6 黑字部分)。

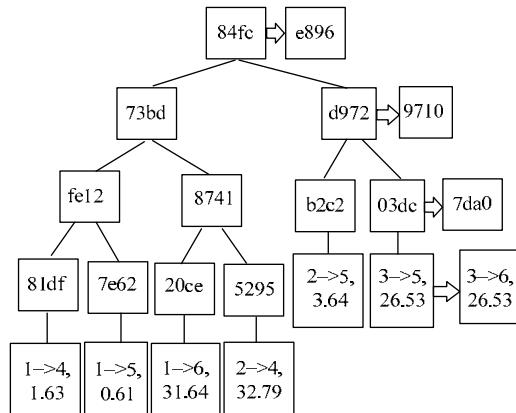


图 6 Merkle tree

Fig. 6 Merkle tree

倘若有人尝试对交易信息进行修改，如把发电者 3 和购电者 5 之间的交易改为发电者 3 和购电者 6 之间的交易，则 merkle tree 会被修改(图 6 红字)。当交易信息发生改变时，其所有祖先节点的哈希值都会发生改变，最后导致 merkle tree 的根节点发生改变。只需校验根节点的数据，就能知道交易信息是否被篡改。同样，从根节点一直往下比较修改过的 merkle tree 和原 merkle tree，可以迅速找到被篡改的交易信息。

如果采用公有链，网络中的轻节点为了减少存储容量，可以只记录根节点和与自身有关的交易信息。假设购电者 3 是一个轻节点，它可以只记录交易 t_{16} ，简化后的 merkle tree 如图 7 所示。

对于购电者 3 来说，虽然网络中还存在其他交易，但它只需存储自身的交易信息和交易信息的祖先节点的哈希值即可。同时，因为存储了根节点的哈希值，当区块链上的交易信息被篡改时，该节点能通过校验根节点的哈希值发现信息被篡改。

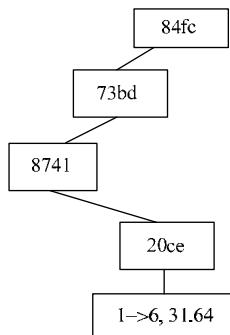


图 7 简化后的 merkle tree

Fig. 7 Simplified merkle tree

当交易时间 12:00 到达时，智能合约会根据智能电表采集并记录在区块链上的数据自动进行清算，完成价值的转移。如果每个发电者都完成了发电任务，不存在违约情况，则资金将按照智能合约事先规定的价格发生转移。如果存在违约情况，例如发电者 3 违约，只发出了 20 单位的电量，则发电者 3 应向购电者支付违约金。假设之前商定的违约金为每单位电量 30，则智能合约会自动计算违约金并完成资金转移。在本例中，智能合约执行后每个用户的账户余额变化情况如表 5 所示。

表 5 账户余额变化情况

Tab. 5 Balance changes of each account

用户	账户余额增减(无违约)/USD	账户余额增减(有违约)/USD
发电者 1	+633.89	+633.89
发电者 2	+693.26	+693.26
发电者 3	+508.05	+187.10
购电者 1	-723.33	-723.33
购电者 2	-650.29	-316.28
购电者 3	-655.26	-655.26
输电公司	+193.68	+180.62

作为储存在区块链上的程序，智能合约难以篡改，到规定时间能够根据条件自动触发，保证了资金按照事先达成的合约条款自动转移，解决了交易双方之间的信任问题，自动化程度高，不需要第三方机构参与，交易成本低，具有很强的优越性。

6 结论

在能源互联网的环境下，大量能源产消者的接入将产生新的商业模式，出现能源的点对点双边交易。本文提出了一种利用区块链对电力交易进行管理的方法。采用弱中心化的架构，利用区块链和智能合约技术让全网节点自主对交易信息进行维护和管理以及资金的自动转移。在原有文献的基础上考虑了电网交易的安全问题，在实际应用中具有更强的可行性。

在安全校核和阻塞管理方面，本文比较了分布式和集中式的 2 种安全校核方案，考虑到今后电力

交易去中心化的发展趋势，倾向于采用分布式安全校核的方案。此外，本文改进了原有的分布式安全校核方法，减少了迭代次数，加强了算法的收敛性。阻塞管理无论是采用阻塞价格调整，还是解最优化问题，都需要一个中心机构进行统筹。对于阻塞管理，今后应该进一步研究分布式阻塞管理的方法，并将其与区块链智能合约相结合，实现去中心化电力交易管理，降低交易管理成本。

在区块链记录节点的选取问题上，本文对公有链和私有链进行了定性的简单比较。区块链中记录节点的数量对存储和通信的效率都有较大影响，未来将对此进行更加深入的研究，设计更加具体的节点分级架构，对不同节点的读写权限给出明确规定。

本文虽然着重探讨的是区块链在电力交易中的应用方式，但该方式也可类似推广到其他能源如天然气、热能等交易。每一个区块链中的账户下可管理多种能源，不同能源的交易信息同时记录在区块链中，以实现能源交易的互联。

最后，本文介绍的是区块链的具体技术实施问题，然而，其能否真正落地还需政府出台相关政策扶持，承认区块链数据以及智能合约的合法性，并对前文提出的相关交易规则进行详细规定。

参考文献

- [1] 孙宏斌，郭庆来，潘昭光，等. 能源互联网：驱动力、评述与展望[J]. 电网技术，2015，39(11)：3005-3013.
Sun Hongbin , Guo Qinglai , Pan Zhaoguang , et al . Energy internet: driving force, review and outlook[J] .Power System Technology ,2015 , 39(11) : 3005-3013(in Chinese) .
- [2] 马钊，周孝信，尚宇炜，等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术，2015，39(11)：3014-3022.
Ma Zhao , Zhou Xiaoxin , Shang Yuwei , et al .Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J] .Power System Technology , 2015 , 39(11) : 3014-3022(in Chinese) .
- [3] 孙宏斌，郭庆来，潘昭光. 能源互联网：理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化，2015，39(19)：1-8.
Sun Hongbin ,Guo Qinglai ,Pan Zhaoguang .Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J] . Automation of Electric Power Systems , 2015 , 39(19) : 1-8(in Chinese) .
- [4] 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 . Beijing : IEEE , 2015 : 1-2 .
- [5] 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 : 11th International Conference on the European Energy Market , 2014 : 1-6 .
- [6] Kar S ,Hug G ,Mohammadi J ,et al .Distributed state estimation and energy management in smart grids: a consensus innovations approach [J] IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing ,2014 ,8(6) : 1022-1038 .
- [7] 张伯明，陈寿孙. 高等电力网络分析[M]. 北京：清华大学出版社，2007：187-188.

- [8] Galiana F D , Ilic M . A mathematical framework for the analysis and management of power transactions under open access[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1998 , 13(2) : 681-687 .
- [9] Kumar A , Chanana S . Security constrained economic dispatch with secure bilateral transactions in hybrid electricity markets[C]/Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference . New Delhi : IEEE , 2008 : 1-6 .
- [10] Kumar A , Chanana S . New secure bilateral transaction matrix using AC distribution factors with slack bus contribution and impact of TCPAR on its pattern[C]/Power Engineering Society General Meeting . Tampa , Florida : IEEE , 2007 : 1-8 .
- [11] Cheng J W M , McGillis D T , Galiana F D . Probabilistic security analysis of bilateral transactions in a deregulated environment[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1999 , 14(3) : 1153-1159 .
- [12] Fang R S , David A K . Optimal dispatch under transmission contracts[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 1999 , 14(2) : 732-737 .
- [13] Mittapalli R K , Kumar A , Pal Y , et al . Optimal load curtailment in hybrid electricity market and impact of FACTS[C]/2012 2nd International Conference on in Power, Control and Embedded Systems (ICPCES) . 2012 2nd International Conference on in Power, Control and Embedded Systems (ICPCES) , 2012 : 1-7 .
- [14] David A K , Fang R S . Security-based rescheduling of transactions in a deregulated power system[J] . IEE Proceedings in Generation, Transmission and Distribution , 1999 , 146(1) : 13-18 .
- [15] 张永平, 焦连伟, 倪以信, 等. 区域电力市场双边交易阻塞管理实用计算方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14) : 18-22 .
Zhang Yongping ,Jiao Lianwei ,Ni Yixin ,et al . A practical approach for inter-regional bilateral contracts congestionmanagement[J] . Automation of Electric Power Systems , 2003 , 27(14) : 18-22(in Chinese) .
- [16] 李嘉龙, 姚常青. 电力市场双边交易的阻塞管理[J]. 广东电力 , 2006(11) : 6-9 .
- [17] Li Jialong ,Yao Changqing . Congestion management of bilateral trade in powermarket[J] . Guangdong Electric Power , 2006(11) : 6-9(in Chinese) .
- [18] 焦连伟, 魏萍, 方军, 等. 一种阻塞管理分散优化算法的研究[J]. 电力系统自动化, 2002 , 26(4) : 5-9 .
Jiao Lianwei ,Wei Ping ,Fang Jun ,et al . A decentralized optimiazation for congestion management[J] . Automation of Electric Power Systems , 2002 , 26(4) : 5-9(in Chinese) .
- [19] Chai B , Chen J , Yang Z , et al . Demand response management with multiple utility companies: a two-level game approach[J] . IEEE Transactions on Smart Grid , 2014 , 5(2) : 722-731 .



收稿日期：2016-09-08。

作者简介：

邹雪(1994), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分布式存储、计算, E-mail : taixue1994@126.com ;

孙宏斌(1969), 男, 教授, 博士生导师, IET Fellow, 教育部长江学者, 国家级教学名师, 国家杰出青年科学基金获得者, 研究方向为智能电网、可再生能源和电动汽车接入电网、电力系统运行与控制, E-mail : shb@tsinghua.edu.cn ;

郭庆来(1979), 男, 副教授, 研究方向为 EMS 高级应用、无功电压控制和电动汽车入网技术, E-mail : guoqinglai@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)