

# 区块链技术在大用户直购电中的应用初探

欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 姚建刚

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

## Preliminary Applications of Blockchain Technique in Large Consumers Direct Power Trading

OUYANG Xu, ZHU Xiangqian, YE Lun, YAO Jiangang

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** Large consumers direct power trading is a crucial part of electricity market reform, its essence is the decentralization of market decision-making. As an emerging distributed database technology, blockchain has great potential in Energy Internet. Therefore, research into applications of this technology in large consumers direct power trading will not only contribute to the advancement of electricity market reform and the development of power system to Energy Internet, but also promote the practicality of block chain technology. In this paper, some basic concepts of block chain, such as its types, consensus mechanism and incentive mechanism were briefly introduced, on this basis, combined with features of large consumers direct power trading, the framework of large consumers direct power trading based on blockchain technology was established. The technical realization of this framework was analyzed, and the formulation of smart contract was introduced. Afterwards, specific applications of blockchain in market access, transaction, settlement and physical constraints were illuminated. Finally, challenges of blockchain's application in large consumers direct power trading were summarized.

**KEY WORDS:** blockchain; large consumers; direct power trading; decentralized system; electricity market

**摘要:** 大用户直购电是电力市场改革的重要一环,其本质是市场决策的分散化。区块链技术作为新兴的分布式数据库技术,在未来的能源互联网中应用潜力很大。因此,对区块链技术如何应用于大用户直购电进行研究,既有助于电力市场改革的推进和电力系统向能源互联网发展,又能促进区块链技术的实用化。首先对区块链类型、不同的共识机制、激励机制等概念做了简要介绍,在此基础上,结合大用户直购电的特点,构建了基于区块链技术的大用户直购电交易框架,对其中的技术实现进行了分析探讨并介绍了智能合约的

制定;然后,从市场准入、交易、结算和物理约束 4 个方面说明了区块链技术如何实际应用于大用户直购电;最后,总结了区块链技术在在大用户直购电中应用所面临的挑战。

**关键词:** 区块链;大用户;直购电;分布式系统;电力市场

## 0 引言

大用户直购电是指符合准入条件的电力用户与发电企业按照自愿参与、自主协商的原则直接进行的购售电交易<sup>[1]</sup>,是电力工业由管制转向开放,进而建立市场化机制的必经阶段,在美国、英国、日本等国的电力工业市场化改革过程中,都陆续实行了大用户直购电交易并在电力市场中占据了重要份额<sup>[2]</sup>。

我国的大用户直购电始于 2002 年国务院印发的《电力体制改革方案》,其中首次提出了大用户直购电的概念<sup>[3]</sup>。2004 年,国家发改委和国家电监会联合印发了《电力用户直接向发电企业购电试点的暂行办法》,明确了直购电试点工作的指导思想、目的和原则<sup>[4]</sup>。2013 年以来,大用户直购电由于其在转变电力资源配置模式,赋予用户选择权和在售电侧引入竞争等特点,在全国多个省市开始试点实施<sup>[5]</sup>。由于尚处起步阶段,在这一过程中暴露了一些具体问题,如交易规则执行不到位、交易模式不够灵活、价格信号未能充分发挥作用、结算不及时不公平等。这些问题的产生,其根源在于大用户直购电交易本质上是分散决策,与基于管制模式所规划的电网和技术手段格格不入<sup>[5]</sup>。考虑到未来将会有更多的直购电交易出现,以及能源互联网背景下电力的生产和消费将进一步向分布式发展,因此有必要对这些问题进行研究。区块链技术作为新兴的分布式的价值传输协议,是一个重要的研究方向。

区块链技术脱胎于比特币,在中本聪 2008 年

基金项目: 国家自然科学基金项目(51277059)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51277059)

发表的《比特币：一种点对点的电子现金系统》一文中，区块(Block)和链(Chain)作为比特币系统的核心技术被提出<sup>[6]</sup>，但区块链(Blockchain)技术不仅仅局限于比特币。作为点对点(P2P)网络、密码学、分布式数据库和共识机制等技术的精妙组合，区块链所蕴含的价值远远超过了比特币本身，被人们视为“价值互联网”的基础协议。2016年1月19日，由英国政府首席科学顾问马克·沃尔波特牵头编写的白皮书中提出区块链应该被列为英国国家战略，并推广应用于金融、能源等领域<sup>[7]</sup>。目前，在美国纽约和澳大利亚巴瑟尔顿，都已经有了基于区块链技术的电能交易系统投入运行<sup>[8-9]</sup>。同时，学术界对区块链技术具体应用的研究也方兴未艾。文献[10]提出了基于区块链技术的一种传感数据真实性保障方法，能保证采样数据不受到人为干预的影响。文献[11]在阻塞管理中引入了区块链技术作为交易信息的存储形式。文献[12]基于区块链技术构建了分布式的碳排放交易框架模型。

由于区块链技术与能源互联网理念上天然的相似性，如去中心化、智能化、合约化<sup>[13]</sup>，以及其在金融、医疗、物联网和政府治理等方面广阔的应用前景<sup>[14]</sup>，可以预计，在未来的能源互联网中，区块链技术也将会扮演重要的角色。由于我国的电力工业市场化改革尚在进行中，同时又面临向智能电网和能源互联网的跨越式发展，因此，探讨区块链技术在市场化改革的必由之路——大用户直购电中的应用，既能够解决目前大用户直购电交易中所面临的问题，又能够推动区块链技术的落地，为其在将来能源互联网中的应用奠定实践基础。

本文首先对区块链技术中与本文论述相关的概念进行了简要介绍，并对不同技术的适用性进行了分析。在此基础上，探究适合大用户直购电交易的区块链技术，建立起整体的框架模型，再根据大用户直购电交易过程，从市场准入、交易、结算等几个方面，具体阐述区块链技术在各个流程中的应用。最后，指出了区块链技术应用大用户直购电交易可能面临的挑战。

## 1 区块链技术

目前，对于区块链，业界尚无一个明确的定义。综合来看，区块链可被视为一个去中心化的分布式数据库，该数据库由一串使用密码学方法产生的数据区块有序链接而成，区块中包含有一定时间内产生的无法被篡改的数据记录信息<sup>[14]</sup>。本节将对区块

链技术中涉及大用户直购电应用的相关概念进行介绍，其他关于区块链技术的基本技术原理，如哈希运算、默克尔树、P2P网络传输协议和椭圆加密算法等，文献[14]和[15]中已有详细描述，在此不再赘述。

### 1.1 账户模型

目前，区块链的账户模型主要包括了比特币为代表的账户模型和以太坊为代表的账户模型。其中比特币的账户模型的核心概念是未花费的交易输出(Unspent Transaction Outputs, UTXO)：除了挖矿带来的奖励输入外，比特币区块链中每一笔新交易的输入集合都来自于之前一笔或多笔经过了输出地址私钥签名的尚未被使用的输出。这种机制最大程度的保证了用户的私密性，但其不够直观，也缺乏在更多状态下应用的能力。与此相对应，以太坊账户模型中直接引入了余额(Balance)的概念，在同一个地址空间中，既存在类似比特币的被公钥-私钥对控制的外部账户，也存在被代码控制的合约账户<sup>[16]</sup>，而余额的变化同时取决于外部账户数据的读写和合约状态的变化。这使得以太坊中的账户模型更接近于实际生活中“账户”的概念。

### 1.2 区块链类型

以区块链中各个节点参与的具体形式来分类，区块链可以分为公共链、联盟链和私有链3种类型<sup>[17]</sup>。表1从节点授权、读写权限、匿名性、交易速度和去中心化程度等方面对公共链、联盟链和私有链进行了对比。

表1 不同区块链类型对比

Tab. 1 Comparison of different blockchain types

| 项目     | 公共链   | 联盟链    | 私有链    |
|--------|-------|--------|--------|
| 节点授权   | 不需要   | 需要     | 需要     |
| 读写权限   | 任何人   | 联盟决定   | 私有组织决定 |
| 匿名性    | 高     | 低      | 低      |
| 交易速度   | 慢     | 快      | 极快     |
| 去中心化程度 | 完全分布式 | 部分去中心化 | 部分中心化  |

在目前的应用里，比特币和以太坊等是公共链，区块链联盟 R3 和超级账本(Hyperledger)是联盟链，而专注于为企业提供区块链服务的 Coin Science 和 Eris Industries 则是私有链<sup>[14,16]</sup>。

以区块链之间的关系来分类，区块链具有主链和侧链两类。侧链的概念是相对于比特币主链来说的，指的是所有遵循侧链协议的区块链，由 BlockStream 公司开发的元素链就是侧链的一个参考实现<sup>[14]</sup>。此外，不同区块链之间互联互通的实质

需求,还导致了互联链(Interchain)的产生。作为一个全新的概念,互联链的实际应用还较少,由 Ripple Labs 公司提出的互联账本(Interledger)可视为与之相近的一个实现,其目标是提供各种不同类型账本间转账的通用协议<sup>[18]</sup>。

### 1.3 共识机制

由于区块链技术去中心化的特点,所以不存在一个中心节点来保障各个节点记账的一致性,因此,在去中心化的记账系统里,如何保证整个 P2P 网络都能对交易达成共识就显得至关重要。共识机制即是解决这一问题的方法,它可以确保区块链各个节点存储的区块链信息不分叉,从而保证整个网络的一致性和可靠性。

区块链的共识机制目前主要有 4 类:工作量证明(PoW)、权益证明(PoS)、股份授权证明(DPoS)和分布式一致性算法<sup>[16]</sup>。

其中,PoW 作为比特币区块链的共识机制,即为人们所熟知的“挖矿”,矿工们通过不断的在尚未入链的新区块上加上随机数进行哈希运算以满足预先设定的难度条件来获得区块链的本轮记账权。

PoS 不同于 PoW,它通过节点对代币的所有权来竞争记账权。并且,为了避免单纯依靠代币余额来分配记账权可能导致的马太效应,不同的 PoS 机制会采取不同的方法来增加记账权竞争中的随机性。

DPoS 共识机制类似于董事会投票,每个持币节点均可参加投票,选出一定数量的代表,这些代表按照既定时间轮流产生区块并获得报酬,如果某个代表在规定的时间内产生区块失败,则区块记账权顺延。

分布一致性算法基于传统的分布式一致性技术,为解决拜占庭将军问题的拜占庭容错算法和解决非拜占庭问题的分布式一致性算法<sup>[16]</sup>。常用的拜占庭容错算法有基于状态机的实用拜占庭容错系统(PBFT),它要求共同维护一个状态,所有节点采取的行动一致。解决非拜占庭问题的算法,目前多采用 Raft 协议<sup>[19]</sup>,它通过节点间的选举使得节点在 leader、follower 和 candidate 之间转换,leader 拥有完全的记账权利,并在生成区块后复制给其他节点。拜占庭容错算法和 Raft 协议是联盟链和私有链上常用的共识算法。

### 1.4 激励机制

无论何种共识机制,在争取记账权和记账的过

程中,都会消耗资源,以比特币中的挖矿为例,其在 2013 年一年所消耗的电能,即相当于爱尔兰全国一年的用电量<sup>[20]</sup>。如果没有与共识机制搭配的激励机制,则节点作为市场环境里的理性的“经济人”便会倾向于不参与记账过程,从而使得系统共识无法达成。因此,必须设计合理的激励机制,使得共识节点最大化自身收益的个体理性行为与保障去中心化区块链系统的安全和有效性的整体目标相吻合<sup>[17]</sup>。

在比特币区块链的 PoW 共识机制中,激励由两个部分组成,分别是新发行的比特币和交易方缴纳的手续费。在 PoS 共识机制中,设定了每被清空 365 币天,就会获得 0.05 个币的利息。在 DPoS 中,代表将收到一个平均水平的区块所含交易费的 1% 作为报酬。

### 1.5 智能合约

智能合约是一个由计算机处理的、可执行合约条款的交易协议,这一概念最初由尼克·萨博于 20 世纪 90 年代提出,但由于缺乏相应能够支持可编程合约的数字系统和技术,相关的应用一直未能开展。

区块链技术诞生后,由于其可编程、去中心化、透明度高特点,被视为智能合约天然的支撑技术,区块链技术的去中心化交易账本功能可以被用来注册、确认和转移各种不同类型的资产<sup>[21]</sup>。

图 1 是一个基本的电能交易智能合约模型示意图。交易主要分为 3 步:

1) 各交易节点商定一份电子化的承诺,其中包含了双方的签名、交易动用的资源(此处为电量和货币)、交易的规则和一个完备的状态机;

2) 该交易经过 P2P 网络扩散,并通过共识验证,被写入区块链中;

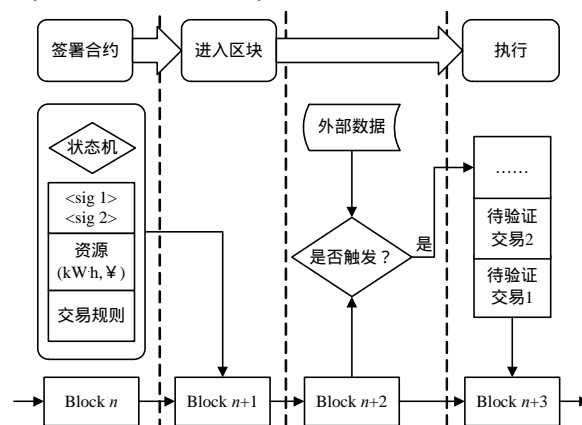


图 1 智能合约模型

Fig. 1 Model of smart contract

3) 定期检查状态机以及外部数据, 如果某个交易满足了触发条件, 则将其从区块链中取出, 推送到待验证队列, 当通过验证并被大多数节点共识后, 该交易视为完成并从最新的区块中移除。

## 2 框架设计及技术实现

从上述介绍可知, 目前区块链技术尚处于蓬勃发展的阶段, 各种不同的技术交织并存, 为了更好的将区块链技术应用大用户直购电, 相关的技术实现必须立足于大用户直购电自身特点。本节从对大用户直购电的分析入手, 建立了基于区块链的大用户直购电交易框架, 对其中可能存在的技术实现进行了讨论, 并介绍了其中最为关键的智能合约的制定。

### 2.1 整体框架

目前的大用户直购电以中长期合约为主, 发电商和大用户之间在获准进入交易后, 在交易中心申报交易, 形成的交易结果经调度中心安全校核通过后实施。实际上, 基于月度甚至年度进行的交易, 具有相当大的不确定性, 需要大用户直购电交易的二级市场的配合, 并且, 随着直购电量比例的逐渐提高, 日前市场、实时平衡市场和辅助服务市场等现货市场体系也必须同步建设, 以避免大用户直购电与电网实际运行产生矛盾<sup>[5]</sup>。因此, 在框架设计中, 应该将包括发电权交易在内的上述交易纳入考虑。同时, 由于电能的传输受到物理系统的约束, 因此安全校核和阻塞管理也应该在框架设计中得到体现。

图2所示的是基于区块链技术构建的大用户直购电交易框架。其中区块链 BC1 记录各交易最终形成的智能合约。区块链 BC2 为中长期交易链, 各区块中记录的是中长期直购电和二级市场发电权交

易。区块链 BC3 为阻塞管理交易链, 各区块中记录的是出于阻塞管理需要而进行的相关交易。区块链 BC4 为日前市场等现货市场交易链。BC2~BC4 之间在有需要的情况下可采用互联链互相连接, BC1 则不应互联以确保系统能在物理约束内运行。

### 2.2 技术实现分析

由于大用户直购电交易不仅仅是单纯的“转账”, 而且交易包含多种类型, 交易情况复杂, 因此 UTXO 式的账户模型将不能达到要求。类似于以太坊的 Balance 账户由于在设计之初即是为商用智能合约开发, 因此能够符合大用户直购电交易对账户模型的需求。

对于所采取的区块链类型, 从大用户直购电交易出发, 其参与方并不局限于某一单个企业, 因此过于封闭的私有链不适合。同时, 各能源企业需要符合一定资质才能参与交易, 对匿名性要求较低, 并且由于交易结果受到物理约束, 随着电网结构和能源形式的演变, 区块链协议的变化、区块链的回滚和分叉都是大概率事件, 目前公共链对于这类变化几乎没有好的解决办法, 因此, 联盟链是最适合的区块链类型, 即框架中各个区块链应采取联盟链形式, 联盟成员为取得准入的发电商和大用户。

在应用初期, 由于交易主体的数量尚不多, 各联盟链记账人预选节点的数量可直接设为各链联盟成员的总数, 以避免记账权的过度集中。此时, 区块链的共识机制应当优先考虑采用分布式一致性算法, 各个区块的记账者可以按照预定的顺序依次选择。在大用户直购电中, 各个节点的可信度较高, 除了黑客攻击外一般不会产生拜占庭故障, 所以采用分布式一致性算法作为共识机制能够使整个系统在短时间内达成共识。

随着电力市场的发展, 部分用户和发电商将通过专业的购售电公司参与交易, 此时联盟链记账人预选节点的数量可以视情况设置一个固定值, 并且采取 DPoS 共识机制, 由所有联盟成员从直接参与交易的用户、发电商和购售电公司中选举产生记账节点, 并顺序执行对每个区块的记账。

上述两种共识算法中, 分布一致性算法由于来源于传统的技术, 并没有包含激励机制, 因此, 有必要对此进行设计。基于大用户直购电和电力系统的特殊性, 其激励机制可以有如下两种设计: 其一, 参考 PoW 和 DPoS 共识机制, 直接收取交易各方的手续费, 作为争取到记账权的节点的收益; 其二, 可以在每次记账中发行固定数量的代币作为系统

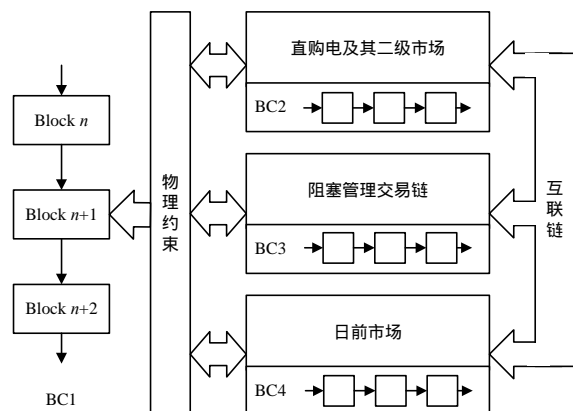


图2 基于区块链的大用户直购电框架

Fig. 2 Framework of large consumers direct power trading based on blockchain technique

奖励，与 PoW 不同之处在于，该代币不能流通，而是被视为一种权利，在持币节点的交易进行安全校核或阻塞管理等操作时，持币节点可选择消耗代币以换取交易的优先权。

### 2.3 智能合约的制定

智能合约是区块链技术应用于大数据直购电的关键一环。其原因在于，相比于诸如房屋产权等实体资产，电能交易能够在瞬时完成，而且易于量测，因而智能合约与现实世界相结合的难度更低；另一方面，随着电力市场改革的推进，除了大数据直购电之外，日前市场、辅助服务市场等其他电力交易领域越来越脱离集中管制的运行模式，转而向市场化方向运行，而合约正是市场化运行的关键。因此，基于区块链技术的智能合约，在这些电力交易领域，同样有着广阔的应用前景，这又使得大数据直购电能够获得更多的支持和促进。

目前在智能合约领域最为著名的当属以太坊。以太坊基于区块链技术，但相比比特币脚本所提供的智能合约，以太坊因为其图灵完备性、价值意识、区块链意识和记录多状态所增加的功能而强大得多<sup>[22]</sup>。表 2 所列出的，是以以太坊的专用语言之一 Solidity 为例，在大数据直购电中制定一份买方合约所需要的最基本的要素。

表 2 买方合约基本要素

Tab. 2 Basic elements of a buyer contract

| 项目   | 变量类型    | 说明                                  |
|------|---------|-------------------------------------|
| 买方地址 | address | 买方的钱包地址                             |
| 卖方地址 | mapping | 卖方的钱包地址(可能存在多个卖方，因此使用 mapping，类似数组) |
| 交易电量 | uint256 | 买方交易总电量                             |
| 交易价格 | uint256 | 买方报价                                |
| 交割时间 | string  | 合同期限                                |

除了上述基本要素，合约中还应该有如下的函数：

- 1) 合同的构造函数，其函数名与合约名相同，用来实现智能合约的基本构造；
- 2) 售电函数，提供给卖方以销售所需的电量；
- 3) 合约执行情况查询函数，在合同交割时间到期后，通过发送消息给独立系统运营商维护的“数据提供”合约以获得卖方是否执行完毕交易电量的回复，从而执行付款或者违约追责。

图 3 是在以太坊钱包私链中编写的一个简单的智能合约示例，执行部署，启动私链挖矿并等待 12 个区块的确认，即可将合约账户的地址和接口提供

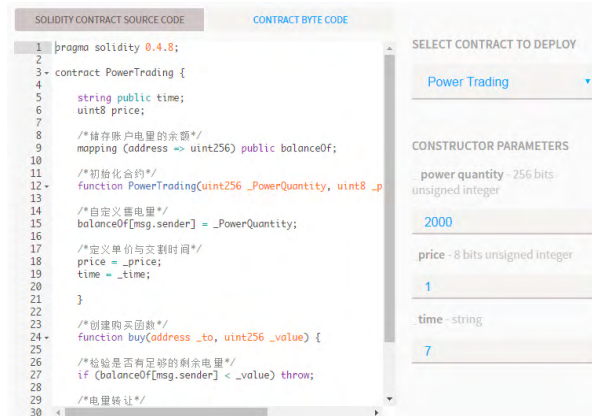


图 3 以太坊智能合约示例

Fig. 3 Example of smart contract based on Ethereum

给需要操作合约的其他账户。

### 3 基于区块链技术的用户直购电

本节将介绍区块链技术在用户直购电中的应用模式。在第 2 节讨论的基础上，通过市场准入、交易、结算等用户直购电的关键环节，描述了区块链技术在其中的具体应用。

#### 3.1 市场准入

用户直购电对于发电商和用户都有一定的要求，发电商一侧的要求主要从环保节能的角度出发，对机组的煤耗和排放设定有具体的指标；用户一侧，一是要求其年用电量达到一定规模或受电电压达到一定等级，二是不能为限制类和禁止(淘汰)类企业<sup>[23]</sup>。实际运行中，由于相关数据的获取途径少，数据真实性程度不高，加之规则执行不严，这些要求并没有完全实施<sup>[2]</sup>。

区块链技术在市场准入方面主要有以下 3 个方面的应用：

1) 当区块链技术应用进入 3.0 时代后，政府部门的公证和数据将会更加可靠、公开和透明<sup>[21]</sup>，用户直购电交易的联盟链可以在发电商或者用户申请加入时快速的查询其相关指标，以确定其是否符合准入条件；

2) 由于区块链的易追溯的性质，对于新加入的成员，区块链上既往的所有数据都是非常容易获取的——只需要联入 P2P 网络，等待数据同步完成即可，因此，对于新加入的成员，可以利用这些历史数据快速的确定自己的报价模式；

3) 对于所有新加入的成员，可以利用区块链技术签署一份共同声明，在其中可以对联盟链中成员的基本权利义务做出规定，从而保证整个联盟的正常运行。

### 3.2 直购电交易

目前常用的大用户直购电交易模式主要有直接协商交易和集中撮合交易<sup>[24]</sup>,前者价格信号不透明,后者强制按价差撮合,赋予交易双方自主选择的机会少,达成交易的概率低<sup>[25]</sup>,图4是基于区块链的交易模型。

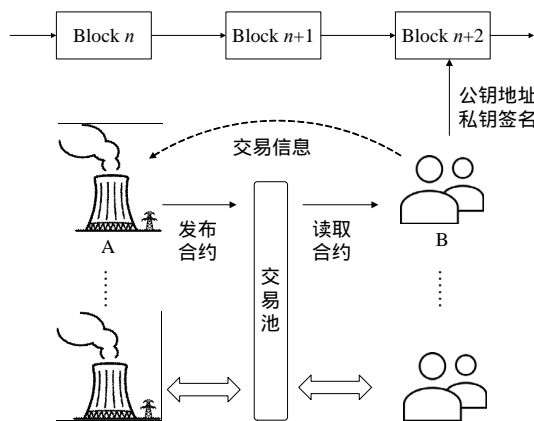


图4 基于区块链的交易模型

Fig. 4 Transaction model based on blockchain

以发电商A向大用户B售电为例,单线实线箭头表示合约的流向,单向虚线箭头表示交易信息的流向。发电商A按照3.2节所述,编好带有交易电量、价格、交割时间等信息的合约并将合约地址和接口发布到交易池中;大用户B通过查看交易池中的合约,选择能够满足自己需求的合约,将自己的公钥地址作为电量的流向账户,用私钥进行签名并将签署好的合约同步至区块链中,一旦确认完毕,发电商A和大用户B之间便达成了直购电协议。

图4中双向箭头表示发电商和大用户均可以主动发起交易,从而既实现双向报价,又实现价格撮合的自由选择,并且,发电商与发电商之间,大用户与大用户之间,在必要的时刻也可以通过同样的流程进行直购电的发电权交易。

### 3.3 交易结算

合同实际交割后,即需要进行结算。目前的大用户直购电结算过程存在着电费结算不公平不及时、电费结算比例不均衡、承兑汇票结算不公平等问题,而且交易信息的披露也不完善<sup>[26]</sup>。这些问题的产生,既有交易方自身造成的,如结算时效和信息披露等问题,也有受限于目前的金融体系造成的,如大量使用承兑汇票结算带来的问题。

在基于区块链技术的大用户直购电框架中,上述问题将会得到有力的解决:

1) 采用智能合约,保证了交易的过程均由计算机自动执行,由于能量交割的瞬时性,在交易生

效的短时间内,即可保证结算过程的完成,同时,对于具体采用何种支付手段,也将一开始就在合同中进行约束,从而确保各方利益不会受到损害;

2) 目前,基于区块链技术的智能数字票据系统的概念原型已经得到研发<sup>[27]</sup>,一旦投入实际应用,承兑汇票的安全性将大大增加,并且其背书转让、贴现和兑付所耗费的人财物力也将减小;

3) 区块链技术由于其设计天然的具有透明性,因此交易的所有信息都会实时的在所有节点可见,信息披露将前所未有的便捷。

### 3.4 物理约束

对于大用户直购电来说,线路潮流限值是主要的物理约束,为了满足这一约束,需要在实际成交前对交易进行安全校核和阻塞管理,其中的关键是阻塞管理。目前已经可以通过分布式算法让各个节点自行进行安全校核<sup>[11]</sup>,而阻塞管理则不然,究其原因,是因为阻塞管理的算法与区块链技术具有一定的冲突。以目前主流的集中撮合交易为例,其阻塞管理多为直接削减乃至舍弃引发线路阻塞的交易电量,其他的阻塞管理算法,也基本都涉及到对交易内容的修改,而在区块链中对于已经达成共识的交易进行修改,涉及到区块链的回滚或分叉,是既难以达成共识,又违背区块链设计理念的行为。虽然联盟链相较于公开链在这一问题上已经具有更大的灵活性,但当交易主体增多时,区块链的回滚或分叉仍然是一个难以解决的问题。因此,需要对基于区块链的阻塞管理进行特别的设计:

1) 导致阻塞的交易各方通过发电权交易消除阻塞时,发电权交易是通过互联链在另一条区块链上进行,并不涉及对已经达成共识的交易进行修改;同理,如果需要对原有交易电量进行削减,也应该是由需要削减电量的发电商和大用户重新在阻塞管理的区块链中生成一个新的交易,将电量重新卖回给发电商,以保证区块链的不断向前;其他的阻塞管理算法,也采用同样的处理方法;

2) 应该充分利用分布式系统各个节点间的配合来消除阻塞,例如,文献[28]和[29]中就提出了基于多主体技术的各节点配合的线路功率控制方法和线路消除功率越限的方法,而基于区块链技术,易于在导致阻塞和消除阻塞的节点间形成多方合约,实现对参与消除阻塞的节点的奖励;

3) 如果系统发生严重阻塞,以致无法利用上述任何方法恢复正常运行,则应该通过联盟各成员投票,对区块链进行强制回滚和分叉,以确保电网



的安全。由于大规模直购电的交易周期较长,交易数据不多,因此最为直观的方法是对出现的每一个分叉都进行临时的保存,直到某一条分叉胜出再清除保存的临时数据。

#### 4 面临的挑战

由上文所述可知,区块链技术可以应用于大规模直购电并解决其中现存的一些问题,但同时,要完全将区块链技术与大规模直购电结合并发挥其全部功效,仍然面临着一系列挑战。

1) 作为一项新兴技术,除了比特币区块链已经拥有较长时间的实际运行外,其他区块链应用都还只是仅仅起步,甚至其中部分应用的规范和标准都尚未建立完全,运行时间短,运行经验少,技术上的风险尚未暴露,甚至出现过 The DAO Attack 这样的严重事件<sup>[30]</sup>。电力系统事关国计民生,对安全的要求极高,因此,如何防范区块链应用过程中的风险,值得重视。

2) 随着电力市场改革的不断推进,以及未来能源互联网中新能源、电动汽车、分布式储能等以虚拟电厂的形式接入电网,发电商及大用户的形态将不仅仅限于目前的水火电厂和工业负荷,交易双方的形态有可能随着外部条件发生变化,两者之间交易的复杂性和随机性将会大大增加,如此,成员相对固定的联盟链将不再适用于这种情况下的大规模直购电交易。

3) 目前的区块链技术以价值传输为主,而电力系统除了价值传输外,还有能量传输,并且价值传输是围绕能量传输展开,能量传输又受到物理系统的约束,如何更好的应用区块链技术将电力系统中的价值流动和能量流动统一起来乃至开发适用于能量传输的区块链技术,是区块链技术应用于大规模直购电和电力系统的关键问题。

4) 区块链技术作为基础的价值协议,其应用潜力的完全发挥要求它不能仅仅只在某一个领域里应用,无论是大规模直购电市场准入的认证,还是智能合约违约责任的追究,抑或是相关法律和监管措施的建立,都需要政府和业界的不断推动。

#### 5 结论

大规模直购电作为电力市场改革过程中重要的一环,目前正在我国推广试点,其分散决策的特点对电力系统运行机制提出了新的要求。随着电力市场改革的推进和各种新能源的接入,这一影响将

更加迫切,需要未雨绸缪地对此进行研究。区块链技术作为新兴技术,在金融、审计、物联网等领域已经开始进入小规模实用,其各项特点也决定了它在未来的能源互联网中具有广阔的应用前景。通过探讨区块链技术在大规模直购电中的应用,既能够呼应交易模式转变带来的影响,又能够推动区块链技术的落地,为其在将来能源互联网中的应用奠定实践基础。

本文首先介绍了区块链技术中与大规模直购电相关的概念,然后基于大规模直购电自身的特点,搭建了基于区块链的大规模直购电交易系统框架,在这个框架下,对其中具体的技术实现进行了分析和讨论,并重点介绍了其中最为关键的智能合约的制定。在此基础上,介绍了区块链技术在市场准入、交易、结算等环节中的具体应用和设计。最后,对区块链技术应用大规模直购电中可能遇到的问题进行了归纳。通过文中的分析可以看到,区块链技术应用大规模直购电中,可以实现更为有效的市场准入认证,确保交易规则得到自动而严格的执行,且相关信息的披露将会更加透明,有助于价格信号引导作用的发挥,同时,可以提高结算的及时性和公平性。

由于篇幅和作者水平所限,本文对区块链技术在大规模直购电交易中应用的探讨暂时处于较为宏观的层面,其中的部分细节尚有缺失。同时,区块链技术真正走进电力系统也仍然需要等待技术的不断完善和电力市场改革的不断推进。希望本文能够对这一过程有所裨益。

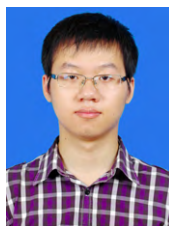
#### 参考文献

- [1] 王鹏,吴素华,戴俊良,等.基于激励相容原理的大用户直购电模型与机制研究[J].中国电机工程学报,2009,29(10):91-96.  
Wang Peng, Wu Suhua, Dai Junliang, et al. Research on model and mechanism of large consumers Direct-purchasing based on incentive compatibility principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 91-96(in Chinese).
- [2] 刘福斌,彭涛,张显,等.电力用户与发电企业直接交易的试点及推广建议[J].华东电力,2013,41(9):1941-1944.  
Liu Fubin, Peng Tao, Zhang Xian, et al. Pilot and promotion recommendations for direct trading between power users and plants[J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1941-1944(in Chinese).
- [3] 国务院.电力体制改革方案(国发[2002]5号)[Z].北京:

- 国务院, 2002.
- [4] 国家电力监管委员会, 国家发展和改革委员会. 电力用户向发电企业直接购电试点暂行办法(电监输电[2004]17号)[Z]. 北京: 国家电力监管委员会, 国家发展和改革委员会, 2004.
- [5] 夏清, 白杨, 钟海旺, 等. 中国推广大用户直购电交易的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 1-7.
- Xia Qing, Bai Yang, Zhong Haiwang, et al. Institutional design and suggestions for promotion of direct electricity purchase by large consumers in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 1-7(in Chinese).
- [6] Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[EB/OL]. [2017-01-05]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [7] Government Office for Science. Distributed ledger technology: beyond block chain[EB/OL]. [2017-02-24]. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/492972/gs-16-1-distributed-ledger-technology.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/492972/gs-16-1-distributed-ledger-technology.pdf).
- [8] Rutkin A. People-powered grid[J]. NewScientist, 2016, 229(3064): 22.
- [9] Rutkin A. Blockchain aids solar sales[J]. NewScientist, 2016, 231(3088): 22.
- [10] 赵赫, 李晓风, 占礼葵, 等. 基于区块链技术的采样机器人数据保护方法[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(10): 216-219.
- Zhao He, Li Xiaofeng, Zhan Likui, et al. Data integrity protection method for microorganism sampling robots based on blockchain technology[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2015, 43(10): 216-219(in Chinese).
- [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(in Chinese).
- [12] Al Kawasmi E, Arnautovic E, Svetinovic D. Bitcoin-based decentralized Carbon emissions trading infrastructure model[J]. Systems Engineering, 2015, 18(2): 115-130.
- [13] 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): 4011-4022.
- 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): 4011-4022(in Chinese).
- [14] 长铗, 韩锋. 区块链: 从数字货币到信用社会[M]. 北京: 中信出版社, 2016.
- [15] 张健. 区块链: 定义未来金融与经济新格局[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [16] 邹均, 张海宁, 唐屹, 等. 区块链技术指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [17] 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(in Chinese).
- [18] Thomas S, Schwartz E. A protocol for interledger payments[EB/OL]. [2017-02-26]. <https://interledger.org/interledger.pdf>.
- [19] Ongaro D, Ousterhout J K. In search of an understandable consensus algorithm[C]//USENIX Annual Technical Conference. Philadelphia: USENIX, 2014: 305-319.
- [20] O'dwyer K J, Malone D. Bitcoin mining and its energy footprint[C]//Proceedings of the 25th IET Irish Signals & Systems Conference 2014 and 2014 China-Ireland International Conference on Information and Communications Technologies. Limerick: IEEE, 2014: 280-285.
- [21] 梅兰妮·斯万. 区块链: 新经济蓝图及导读[M]. 北京: 新星出版社, 2016.
- [22] Buterin V. A next generation smart contract & decentralized application platform[EB/OL]. [2017-05-01]. [https://www.weusecoins.com/assets/pdf/library/Ethereum\\_white\\_paper-a\\_next\\_generation\\_smart\\_contract\\_and\\_decentralized\\_application\\_platform-vitalik-buterin.pdf](https://www.weusecoins.com/assets/pdf/library/Ethereum_white_paper-a_next_generation_smart_contract_and_decentralized_application_platform-vitalik-buterin.pdf).
- [23] 张显, 刘福斌, 彭涛, 等. 电力用户与发电企业直接交易相关问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 33-37.
- Zhang Xian, Liu Fubin, Peng Tao, et al. A discussion on key issues for direct trading between power users and plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 33-37(in Chinese).
- [24] 陈皓勇, 张森林, 张尧. 电力市场中大用户直购电交易模式及算法研究[J]. 电网技术, 2008, 32(21): 85-90.
- Chen Haoyong, Zhang Senlin, Zhang Yao. Research on transaction mode of direct power purchase by large consumers in electricity market[J]. Power System Technology, 2008, 32(21): 85-90(in Chinese).
- [25] 陈西颖, 胡江溢. 大用户与发电企业直接交易算法探讨[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 100-103.



- Chen Xiying , Hu Jiangyi . Preliminary discussion on the straight power transactions between large power users and Generation enterprises[J] . Automation of Electric Power Systems , 2008 , 32(24) : 100-103(in Chinese) .
- [26] 国家能源局 . 2015 年全国电力调度交易与市场秩序监管报告[EB/OL] . [2017-02-23] . [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto92/201606/t20160614\\_2265.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto92/201606/t20160614_2265.htm) .
- [27] 聂舒, 张一锋 . 从 SDDS 看区块链技术的应用[J] . 中国金融 , 2016(17) : 35-36 .
- Nie Shu , Zhang Yifeng . A view of the application of blockchain based on SDDS[J] . China Finance , 2016(17) : 35-36(in Chinese) .
- [28] Müller S C , Häger U , Rehtanz C . A multiagent system for adaptive power flow control in electrical transmission systems[J] . IEEE Transactions on Industrial Informatics , 2014 , 10(4) : 2290-2299 .
- [29] Robitzky L , Muller S C , Dalhues S , et al . Agent-based redispatch for real-time overload relief in electrical transmission systems[C]//Proceedings of 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting . Denver , CO , USA : IEEE , 2015 : 1-5 .
- [30] Siegel D . Understanding the DAO attack[EB/OL] . [2017-02-26] . <http://www.coindesk.com/understanding-dao-hack-journalists/> .



欧阳旭

收稿日期：2017-02-28。

作者简介：

欧阳旭(1988)，男，博士研究生，主要从事多主体、电力市场、新能源的研究工作，meetouyang@hnu.edu.com；

朱向前(1982)，男，博士研究生，主要从事电力系统规划及运行的研究工作，58556631@qq.com；

叶伦(1992)，男，博士研究生，主要从事电力市场、发电辅助服务的研究工作，yelun86@126.com；

姚建刚(1952)，男，教授，研究方向为电力市场及其技术支持系统、电力系统规划与运行等，yaojiangang@126.com。

(编辑 乔宝榆)