

基于区块链的分布式能源交易方案设计综述

李彬¹, 覃秋悦¹, 祁兵¹, 孙毅¹, 李德智², 石坤², 杨斌³, 奚培锋⁴

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206;

2. 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司),
北京市 海淀区 100192;

3. 国网江苏省电力有限公司, 江苏省 南京市 210024;

4. 上海市智能电网需求响应重点实验室(上海电器科学研究所(集团)有限公司),
上海市 普陀区 200063)

Design of Distributed Energy Trading Scheme Based on Blockchain

LI Bin¹, QIN Qiuyue¹, QI Bing¹, SUN Yi¹, LI Dezhi², SHI Kun², YANG Bin³, XI Peifeng⁴

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Changping District, Beijing 102206, China;

2. Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-energy Carriers Optimization and Interaction Technique
(China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, Jiangsu Province, China;

4. Shanghai Key Laboratory of Smart Grid Demand Response (Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group)
Co., Ltd.), Putuo District, Shanghai 200063, China)

ABSTRACT: Distributed new energy (DNE) has become an important part of energy trading market. In order to increase energy efficiency and expand local consumption through multiple channels, DNE is legally qualified to sell electricity nearby. Its production and consumption structure are centerless and multi-nodal. Due to the centralized features of existing energy operation models, it is difficult to apply them to manage DNE directly. Blockchain technology has the advantages of traceability, transaction disclosure and data transparency, and its decentralized features coincide with DNE. This paper proposes a blockchain-based distributed energy (BBDE) trading scheme, analyzes existing methods and disadvantages of DNE trading, and studies applicability of blockchain technology in DNE transactions. Based on continuous double auction (CDA), competitive equilibrium price (CEP) and node reputation value (NRV), a BBDE settlement mechanism supporting P2P transactions is established. This paper formulates a BBDE payment model complying with China's policies, proposes a trading solution including system architecture and transaction flow, compares the performance of traditional power trading systems and blockchain-based trading systems, considers how to improve current blockchain

deficiencies, and looks forward how to realize extended development of traditional power trading market to DNE trading. Finally, aiming at the challenge of blockchain technology in process of entity application, this paper analyzes the conflicts and problems existing in current combination of electricity market and blockchain technology, and puts forward corresponding suggestions.

KEY WORDS: blockchain; distributed energy trading; energy P2P transaction; settlement mechanism; electricity market

摘要:以绿色新能源为主体的分布式能源成为能源交易市场中的重要组成部分,为了提高能源利用率、多渠道扩展分布式能源本地消纳,分布式能源获得合法就近售电资质,其能源生产和消费结构呈无中心、多节点状。现有能源运营模式由于具有集中式管理的特点,难以简单套用于分布式能源。区块链技术具有可追溯性、交易公开、数据透明的优势,其分散化特性与分布式能源无中心特点相符合,故提出一种基于区块链的分布式能源交易方案。分析现有分布式能源交易的方式及其弊端,研究区块链技术对于分布式能源 P2P 交易的适用性,在连续双边拍卖(continuous double auction, CDA)、竞争均衡价格(competitive equilibrium price, CEP)、节点信誉值等基础上确立支撑分布式能源 P2P 交易的分布式能源结算机制,制定符合中国政策的分布式能源区块链支付模式,提出包括系统架构、交易流程在内的基于区块链技术的分布式能源交易方案,对比传统电力交易系统和基于区块链的分布式能源交易系统的性能,思考如何改进目前区块

基金项目:国家电网公司科技项目“开放市场环境下智能用电新业务运营服务关键技术研究及验证”(SGZJ0000KXJS1800310)。

Project Supported by Science and Technology Foundation of SGCC (SGZJ0000KXJS1800310).

链的不足之处并展望能源市场未来,实现传统电力交易市场向分布式能源交易的延伸性发展。最后,针对区块链技术在实体应用过程中的挑战分析目前电力市场与区块链技术结合所存在的冲突及问题,并提出相应的建议方案。

关键词:区块链;分布式能源交易;能源 P2P 交易;结算机制;电力交易市场

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1158

0 引言

2017 年是区块链行业的“问道”之年,2018 年将成为区块链应用落地之年,区块链技术逐渐获得人们正视和认可,“区块链+”将成为热潮。截止到 2017 年 5 月,国外 IT 巨头如 IBM、谷歌、微软、亚马逊等都明确提供区块链即时服务功能。2017 年 12 月 23 日,中国支付清算协会在北京举办的“区块链发展应用业务研讨会”提出,区块链构建了一种新型的经济互信机制,传统市场的基础架构可通过重构以大幅提高交易及清算效率。

2017 年 10 月 31 日,国家发改委、能源局正式下发关于《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》,分布式能源在被动接受调度指令管理多年之后,可以主动参与市场交易,在满足相关技术条件下,在 110 kV 电压等级之内可以选择就近销售电量,并获得合法的售电资质,集发电售电于一体。在我国电力市场逐步开放的政策条件下,电网企业、分布式售电商、服务公司、第三方机构等电力交易实体在购销电力流程中发挥着重要作用,未来的能源交易方式将发生巨大变化^[1]。

2018 年 5 月工信部发布的《2018 中国区块链产业白皮书》表明目前我国区块链产业链条已经形成,区块链有望成为实现能源互联网基础设施的重要手段。区块链 3.0 作为应用落地时代,其理念已超越了数字货币、智能合约领域,可作为复杂能源交易合同的重要支撑技术。文献[2]中研究了在能源互联网的大环境中,区块链节点作为第三方机构的能源交易;文献[3]研究了以智能合约的形式存储电力交易信息且自动执行资金转移的电力交易方案;文献[4]构建了基于区块链的能源互联网安全共享网络体系;文献[5]研究了能源互联网中基于区块链的电力交易和阻塞管理方法。目前来说,能源在中国是特殊商品,电力交易并不是普通商品交易。故本文在已有的研究基础上,设想了将分布式能源接入与区块链技术记账加以结合,致力于实现每个用户都可以投资购买能源、实时管理已购能源、自行直接出售多余已购能源,进而实现从能源消费者到能源供应者的转变。

1 区块链技术在分布式能源 P2P 交易领域的应用

1.1 区块链技术在分布式能源 P2P 交易领域的适用性分析

区块链作为一种去中心化的分布式共享账本,通过邻区块首尾哈希值单向连接实现链式存储^[6]。区块链各节点都拥有完整账本的副本,任何节点均可实时查看和校对交易数据,分布式存储的优势不仅在于交易公开化以有效维护数据安全^[7],而且也降低了用于购买服务器的成本。所有分布式能源交易数据都将存储在区块体上,哈希算法自动生成存储交易数据哈希值的默尔克树(Merkle tree)^[8]。包含默尔克树的区块链结构如图 1 所示,由图可知若交易数据被恶意篡改,相应默尔克树根哈希值将改变^[9]。分布式能源交易信息利用区块链的默尔克树存储,使每一笔交易都可被追溯,防止交易过程出现“赖账”、“假账”等问题^[10]。

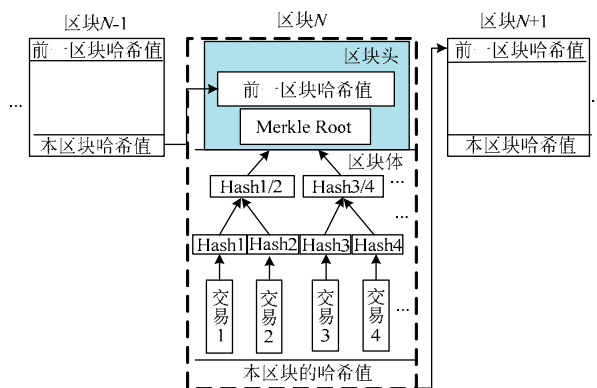


图 1 默尔克树的区块链结构

Fig. 1 Blockchain structure of Merkle tree

运用区块链技术,对分布式能源交易过程中各节点进行身份脱敏处理,匿名交易和数据无缓存特征为 P2P 交易和双向互动提供重要保障。非中心化的验证交易过程脱离如政府机构、银行组织等的中央权利系统^[11],因此基于区块链的分布式能源交易系统能实现利益即时结算、补贴即时发放,同时 P2P 直接交易也大大减少了所需的中间手续费^[12]。

1.2 目前分布式能源交易方式规则分析

分布式能源作为一种综合能源利用系统,将以天然气为主的一次能源与以冷热电联产为主的二次能源相结合,并得到公用能源供应系统的支持和补充,实现能源梯形利用^[13]。分布式能源的资源、环境效益最高,我国电力系统需要利用分布式能源,逐步逐地进行能源替换^[14]。

目前分布式能源交易过程中由于信息不透明、规则不公开、补贴不及时造成的信任问题愈加得到

重视^[15]。例如,部分能源服务商或负荷聚合商在预先掌握国家补贴发放政策信息之后,伪造信息骗取补贴;用户伪造自身的交易和用电数据骗取高额补贴;电力市场交易中由于电力损耗造成的成交量与实际接收量不符等^[16]。具有分权化、可追溯、交易透明、不可篡改等特性的区块链技术可解决上述信任问题^[17],故本文研究基于区块链的分布式能源交易方案,为优化分布式能源交易系统提供新的思路。

1.3 对国内外能源区块链项目的分析

Yuso 和 Priogen Trading 公司借助第三方通讯软件 Enerchain 作为交易工具,支持买卖双方匿名发送和查看订单信息,交易过程无第三方介入^[18]。该项目通过集中所有交易数据,使任意参与方均可获得统一的信息并使用记录中的价格数据。但若考虑引入中国能源区块链市场,该项目由于没有解决批发能源交易中的扩容性问题,故可能无法支撑现有市场的交易量。

美国能源公司 LO3 和比特币开发公司 Consensus Systems 合作建立的分布式光伏售电区块链平台 Transactive Grid 开发了全球第一个能源区块链市场^[19],通过将区块链技术与微网结合,使用户有权将过剩光伏发电回馈至电网。Energo 项目通过打造分布式能源自主社区(decentralized autonomous energy community, DAE)的去中心化系统、建立基于 Qtum 量子链的自动能源交易平台、借助数字货币 TSL 实现微网的清洁能源计量、登记、管理、交易与结算^[20]。Energo 项目虽然由中国本土企业 Energolabs 创办,但是由于现在中国的能源行业基本上被巨头垄断,而且整个能源市场非常饱和,因此该企业的布局重心在东南亚市场。

2017 年国内分布式能源的代表性应用是远景能源项目。远景能源的阿波罗光伏云平台主要提供气象资源评估、设备采购、在线运行监测、光伏运维以及大数据分析等服务,但整体看,平台产品的功能较为单一、智能化水平不高、产业链协同性不强,同时存在 4 点发展痛点,即融资难、选型难、结算难、运维难。分布式能源交易系统应针对以上项目缺陷 4 个难点,充分利用区块链平台透明管理和数据的可溯源优势提出解决方案。

2 基于区块链的分布式能源交易方案技术机制设计

2.1 互联共识机制

互联共识是区块链技术在去中心化的环境下

最核心的问题。在目前的研究内容中,共识算法主要有工作量证明(proof of work, PoW)、股权证明(proof of stake, PoS)、委任权益证明(delegated proof of stake, DPoS)、实用拜占庭算法(practical byzantine fault tolerance, PBFT)、授权拜占庭容错算法(delegated byzantine fault tolerance, DBFT)和高性能共识算法(robust byzantine fault tolerance, RBFT^[21])。表 1 是对 5 种常见共识算法的性能对比。

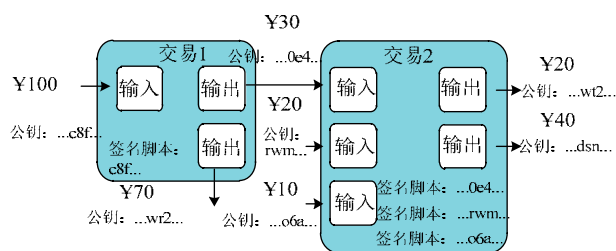
表 1 5 种常见共识算法的性能对比
Tab. 1 Performance comparison of five common consensus algorithms

特性	PoW	PoS	DPoS	PBFT	RBFT
节点管理	公开	公开	公开	准入机制	准入机制
交易延时	高(分钟)	低(秒级)	低(秒级)	低(毫秒级)	低(毫秒级)
数据吞吐量	低	高	高	高	高
考虑节能	否	是	是	是	是
安全性	<50% 算力	<50% 股权	<50% 验证	≤33.3% 恶意节点	≤33.3% 恶意节点
扩展性	好	好	好	差	差

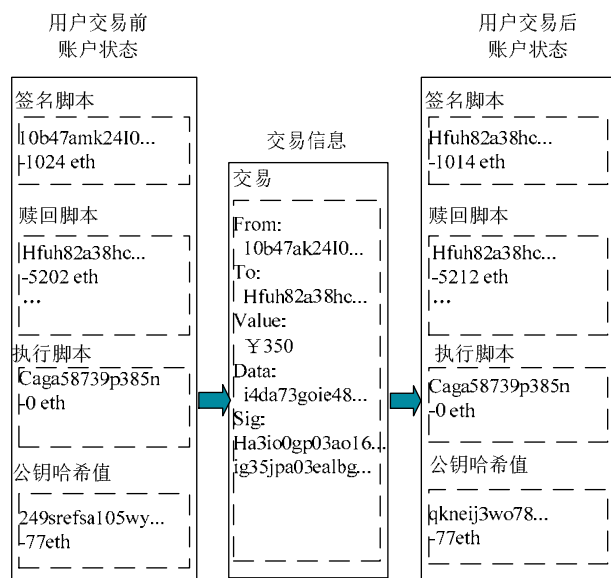
目前的电力区块链交易市场设想大多数是搭建公有链和运用 PoW 工作量证明共识机制的运营模式。在基于 PoW 的公有链中,区块链已被证明了算力不足 50%时,其上的交易信息不可伪造和修改。鉴于电力市场在我国为垄断市场,系统保密性高,51%非法算力出现的可能性小,故此方案在应用中的实施在现有文献中被考虑和运用的次数较多^[22]。但区块链技术系统设计中存在着“不可能三角”悖论,即系统无法兼顾去中心化、高效、安全这 3 个性能^[23]。文献[24]研究并改进了共识机制,提出了及时剔除 DPoS 共识机制中异常节点的解决办法,即对匿名节点进行公开投票,将节点状态进行标识。由此,本文设计运用 DPoS 机制,将分布式能源交易系统中的股权定义为碳排放量证明或者绿证,并标识节点状态。系统设定本季度的区块打包记账权由碳排放量最少的节点获得,那么为了争夺记账权 and 对应奖励,绝大多数节点都将减少自身的碳排放量,这种股权设定的目的是激励清洁能源的使用和节能减排。当然在不同的形势条件下,系统可以根据国家政策改变股权的形式。

2.2 能源交易账户

目前区块链的交易模式分为两类,一类是基于比特币系统的未花费输出(unspent transaction out, UTXO)模型,另一类是以太坊的账户交易。比特币的交易模式区别于依赖第三方机构的传统交易,只依靠 UTXO 模型完成交易^[25]。图 2(a)是 UTXO 模型,由图可知在 UTXO 模型中只关注输入值和输出值,即节点对于分布式能源交易的买入量、卖出量



(a) UTXO模型



(b) 以太坊系统的账户模型

图2 交易模型对比

Fig. 2 Comparison of trading models

和余额。以太坊则摒弃比特币 UTXO 模型，转而设计账户模型，如图 2(b)所示，用户可直接看到交易前后账户的状态变化。两者各有利弊，如 UTXO 具有匿名性，任何用户的未花费交易信息均为保密状态，实现隐私保护，而账户模型无法实现匿名；UTXO 可并行运行，而以太坊难以扩展；UTXO 模型只能实现账户状态简单转换、缺少循环语句，而以太坊通过智能合约的几行代码实现复杂状态转换；UTXO 脚本语言缺少图灵完备性、无法与智能合约相结合，而以太坊可与智能合约结合^[26]。

参照以太坊的账户模型概念，本文设计的分布式能源交易账户分为外部账户和合约账户两个部分。分布式能源交易系统的任何状态变动都由外部账户的交易触发，图 3 为交易过程中外部账户与合约账户的信息传输，其中外部账户之间传输的“交易信息”只是实现了简单的价值转移，外部账户与合约账户传输的“交易信息”可调动合约账户中的程序代码执行，合约账户与外部账户传输的“状态信息”触发外部账户的状态改变，从而完成分布式能源交易过程中的节点账户付款、收款等交易操作。

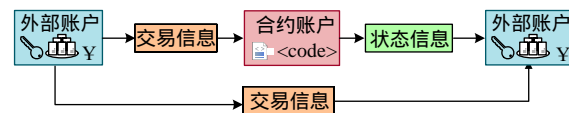


图3 交易过程中外部账户与合约账户的信息传输

Fig. 3 Transaction of external account and contract account during the transaction

1) 外部账户。

外部账户用于存放用户的余额、发送接收交易信息、检测当前交易是否只被处理过一次、通过私钥控制是否进行交易、存储所有的账户信息和交易记录。外部账户可独立发起和响应交易，交易信息为经私钥签名后的数据包。

2) 合约账户。

合约账户存放不同的智能合约代码，通过交易触发代码执行，交易信息参数将作为代码的参数输入值。合约账户无法单独发起交易，只能响应外部账户的交易信息，或者由此响应触发生成状态信息并发送给外部账户。

智能合约作为分布式能源交易区块链上的一个小程序，包含交易时间、金额、买卖双方、能源种类等一系列分布式能源交易信息^[27]，智能合约的生成过程如图 4 所示。节点可以根据交易业务需求自行制定智能合约内容，也可以选择系统自适应于不同服务业务的智能合约^[28]。此处的智能合约自适应机制是指，智能合约能根据分布式能源交易市场的各种因素及时更新内容，如根据分布式能源发电商所在地选择能源种类，西北地区首选风力发电，而南方沿海地区首选水力发电等^[29]。

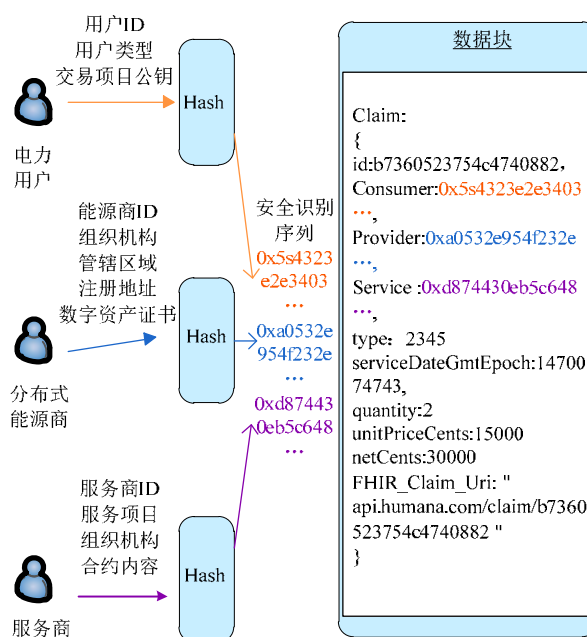


图4 智能合约的生成过程

Fig. 4 Smart contract generation process

2.3 支付问题

2017年9月4日中国人民银行等七部委发布的《关于防范代币发行融资风险的公告》指出,代币发行融资活动应立即停止。传统法律认为ICO可能会助长非法众筹、募集资本的发展,故中国境内全面禁止ICO,防范不法分子利用庞氏骗局损害民众权益。ICO的风险大于价值,权威监管部门更注重于运用区块链技术推动实体经济发展^[30]。为了避免金融监管的限制、响应国家严禁使用ICO的政策法规,本文设想在基于区块链的分布式能源交易平台中运用电力积分代替法定货币或者代币进行资金流的传输。系统根据以下情况向节点发放积分:

1) 新节点首次注册登入系统。一定量的初始积分可鼓励用户尝试使用该系统,有利于系统建立诚信发展环境。

2) 在交易完成时,节点出售、购买并使用了清洁能源。系统给每1kW·h清洁电力打上标签,节点在购买得到清洁电力时也会得到绿证,凭证上注明了所购买的特定1000kW·h电量的来源,方便溯源追查。

3) 节点为系统贡献计算量。例如,节点帮助系统计算默克尔树根、验证交易信息等。

4) 节点获得区块的记账权,打包并管理区块。节点通过股权证明加上投票的DPoS机制获得记账权,系统可将碳排放证明或者绿证设置为股权。

在本文设想的区块链交易系统中,节点间只能用钱包账户中的电力积分进行交易,用户使用积分可兑换电费、支付结算,同时这种电力积分可识别和追踪、有效防止恶意篡改、保证只能支付一次。用户可以使用、转让、兑换电力积分,若节点账户内无足够可购买能源的积分,可向其他节点购买。即基于区块链的分布式能源交易平台将电力积分视为一种价值载体以支撑资产流通、一种权利证明以支持用户消费、一种社会共识以发展市场互信。这种做法的好处有两个:一是打破了区块链应用无法离开代币流通的固定思维,使区块链应用在中国尽早落地;二是增强节点对区块链管理的责任感,鼓励实现区块链的分权管理。

为了保证市场交易正常进行,基于区块链的分布式能源交易系统平台将会对每个节点都设置活跃值账户。平台在一个交易周期结束后立即统计节点活跃值,根据活跃值判断节点对交易持积极、中立或者消极的态度。系统根据节点的总信誉值排名立即发放激励或补贴,保证操作结束后补贴即刻入账,这样做的目的是增强互信、明晰奖惩、提升

效率^[31]。

3 基于区块链的分布式能源交易结算机制设计

3.1 CDA 拍卖机制

连续双边拍卖(continuous double auction, CDA)作为一种拍卖机制,通过买卖双方报价匹配达成交易,适用于本文的分布式能源P2P交易^[32]。

本文采用此机制时,需要考虑利益最大化问题。由于电网、用户、分布式能源服务商作为独立的市场主体,其在分布式能源交易市场中的利益具有不对等性,需建立一个非合作静态博弈模型^[33]。交易过程中选取电网为博弈主体,两个博弈从体分别为用户和分布式能源服务商。为了体现区块链去共同对手方、降低交易成本的优势,所建立的博弈模型将考虑分布式能源服务商出售电能的利益最大化和用户购买电能的成本最小化^[34]。基于区块链的分布式能源交易方案一主二从博弈模型如图5所示。

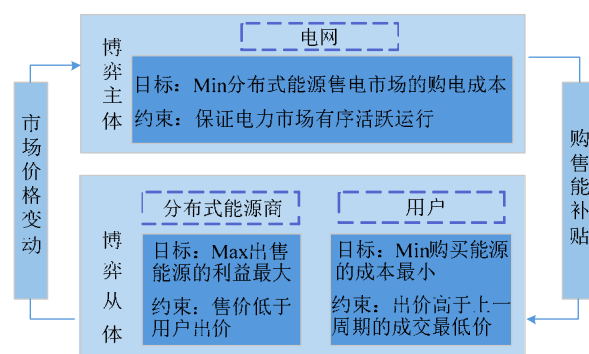


图5 基于区块链的分布式能源交易方案的一主二从博弈模型

Fig. 5 A master two slave game model based on blockchain-based distributed energy trading scheme

博弈策略:电网企业决定补贴发放的最大化以激励市场交易,每个分布式能源服务商决定自己的出售向量以最大化收益,每个用户决定自身的购买向量以最小化成本^[34]。

约束条件:电网需保证电力市场有序活跃运行,用户出价需高于上一周期成交最低价,分布式能源服务商的售价需低于用户的出价。

根据以上博弈策略的定义,博弈主体将会选择最有益于市场的补贴发放策略,博弈从体将会选择最有利于自身的方式进行交易,即用户选择报价较低的分布式能源服务商,而服务商则选择报价较高的用户。但这种双边拍卖报价的约束条件是,若售价大于出价,则平台判断这笔交易无法进行,关闭该条交易路径。基于利益最大化的纳什均衡使每一

个博弈参与者都能接受该双边拍卖博弈策略^[36]。

为了使市场交易效率最大化, 方案设计的拍卖方式为第一价格密封拍卖(the first price sealed auction, FPSA)^[37], 在这种方式下, 用户和分布式能源服务商的报价在交易周期开始前同时封存在信封中, 呈保密状态提交给区块链平台。当报价信息被公开后, 用户出价高者与能源商售价低者将有很大几率被选择, 第一价格密封拍卖报价值与成交值的关系如下:

$$\delta_k^n = b_k^n \quad (1)$$

其中 δ_k^n 与 b_k^n 分别表示节点 k 对本交易周期内第 n 次的报价值与成交值。基于第一价格密封拍卖规则中的报价即交易价格的方式, 提出适用于公平拍卖的竞价方式, 具体实现步骤为:

1) 定义用户和分布式能源服务商估值向量。为每个用户定义估值向量 $U_k = [U_k^1, U_k^2, \dots, U_k^r]$, 为每个分布式能源服务商定义估值向量 $D_V = [D_V^1, D_V^2, \dots, D_V^r]$, 其中 $U_k^n (n=1, 2, \dots, r)$ 代表用户 k 在本交易周期内第 n 次的报价, $D_V^n (n=1, 2, \dots, r)$ 代表分布式能源服务商 V 在本交易周期内的第 n 次报价。若共有 N 个分布式能源服务商向电网售电, 则这些能源商根据能源类型、发电能力、蓄电状况对出售的能源进行估值, 能源商的报价有如以下约束:

$$D_V^1 \geq D_V^2 \geq \dots \geq D_V^r, V=1, 2, \dots, K \quad (2)$$

同理用户参考电网制定的电价及历史交易价格记录对购买的能源进行估值, 用户 k 报价约束为

$$U_k^1 \leq U_k^2 \leq \dots \leq U_k^r, k=1, 2, \dots, K \quad (3)$$

在交易周期开始时, 用户和分布式能源服务商迫切希望自己的利益得到最大化, 因此第一次报价时, 分布式能源服务商会提出最高的售价, 用户会提出最低的出价, 经双方撮合达成最终的交易。

2) 计算节点信誉值 R_k^n 与可匹配范围 λ_k^n 。本文设想建立节点信誉值 R_k^n 降序排列列表, 节点根据可匹配范围 λ_k^n 可选择交易合作方。若节点在本交易周期截止日期前还未能完成匹配, 则平台可判定该节点在本周期内不活跃, 扣除适当的信誉值作为惩罚。系统通过信誉值列表, 既可奖励信誉良好节点以激励市场诚信交易, 又可取消不积极节点或恶意节点的记账权竞争名额以保证分布式能源交易系统正常运转^[38]。为每一个节点定义信誉值向量 $R_k^n = [R_k^1, R_k^2, \dots, R_k^{N_1}] (n=1, 2, \dots, r)$, 为每一个节点定义可匹配范围向量 $\lambda_k^n = [\lambda_k^1, \lambda_k^2, \dots, \lambda_k^{N_2}] (n=1, 2, \dots, r)$, 简单起见, 将其中信誉值向量集中的元素取值均设为从 0 到 1 的数。信誉值 R_k^n 计算过程为

$$R_k^n = \frac{1}{2} \times \left(\sum_{i=1}^N \frac{\delta_k^n}{\theta_k^n} + \sum_{i=1}^N \frac{\theta_k^n}{t_k^n} \right) \quad (4)$$

其中: δ_k^n 表示交易完成后节点 k 获得的好评数; θ_k^n 表示节点 k 实际成交的交易笔数; t_k^n 表示节点 k 参与竞价的交易笔数; 信誉值 R_k^n 取决于节点的交易好评率与参与活跃率。

节点的可匹配范围 λ_k^n 的算法如下:

$$\lambda_k^n = N_k^n \times (1 - R_k^n) \quad (5)$$

其中: N_k^n 表示完成该交易周期内买卖关系方的节点数量; R_k^n 表示本节点的信誉值。

为了说明上述拍卖机制, 此处对 6 个节点的交易拍卖过程进行举例说明。设用户节点为买方, 标号分别为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 , 分布式能源服务商节点为卖方, 标号分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 、 S_1 、 S_2 、 S_3 。买方根据出价降次排序, 卖方根据售价升次排序。表 2 为买卖双方报价及排序。本文通过式(5)计算可选择范围, 小数部分遵循四舍五入原则, 如表 3 所示。

表 2 买卖双方报价及排序

Tab. 2 Buyer and seller bid and order

买方	出价	买方降序	卖方	售价	卖方升序
U_1	97	U_2	D_1	100	D_2
U_2	100	U_1	D_2	90	D_3
U_3	95	U_3	D_3	97	D_1

表 3 基于节点信誉值给出的可选择范围

Tab. 3 Selectable range given based on node reputation value

买方	信誉值排名	可选卖方	卖方	信誉值排名	可选买方
U_2	前 10%	D_2, D_3, D_1	D_2	前 60%	U_2, U_1, U_3
U_1	前 60%	D_2 或 D_3	D_3	前 30%	U_1, U_3
U_3	前 30%	D_2	D_1	前 10%	U_2

3.2 竞争均衡价格估计

竞争均衡价格(competitive equilibrium price, CEP)是经济学中衡量市场竞争程度的指数, 数值接近估算范围内的高频率成交价格。分布式能源交易市场竞争均衡意为维持市场供需平衡, 保证市场主体维持良性竞争。分布式能源交易市场中有许多节点参与竞争交易, 基于区块链的分布式能源交易网络中每个节点处于平等地位, 即任何节点都不能成为市场的支配者、控制者。当市场价格剧烈波动时, 有关监管部门可通过相同或不同交易周期内的 CEP 数据变化, 制定相关宏观调控政策, 保证市场良性竞争。

CEP 对同一交易期间最近 n 笔交易的交易价格进行加权平均数估算, 实际上 CEP 数值约等于估算范围内出现频率最高的成交价格, 也即该交易周期

的成交价格逐渐接近 CEP 值。由此,未交易节点可根据 CEP 值调整估价,重新进行匹配;所有节点也可根据上一交易周期的 CEP 值确定本周期的估价,缩短交易所需时间。本文中关于竞争均衡价格(E_p)的计算方法如下:

$$E_p = \frac{\sum_{i=N, N+1, \dots, M}^{M-N} (p_i \times w_i)}{\sum_{i=N, N+1, \dots, M}^{M-N} w_i} = 1$$

$$w_{i+1} = \beta w_i$$

其中: N 是估算起始交易编号; M 是估算结束交易编号; i 是从 N 递增到 M 的一个整数值; p_i 是第 i 笔交易的成交价格; w_i 是该成交价格的权重。 w_i 在估算范围内的总和为 1,目的是保证区域估算的特殊性。决定价格权重的因素有 3 点,分别为分布式能源交易的市场活跃度、节点的最高报价和上一周期成交价格,这些因素共同决定了权重系数 β 的数值。

3.3 阻塞管理问题

电网企业作为一个独立的市场参与者,为电能交易的各个主体提供传输服务,在考虑电力市场 P2P 交易时,必须对阻塞管理问题进行讨论。而且把区块链技术引入到分布式能源交易系统中,将对配电系统产生较大的影响,如配电网中的参与主体将变成分布式能源服务商、居民用户、商业企业、负荷集成商等^[39]。区块链技术便于各参与节点进行实时 P2P 交互,但随着系统参与节点的增多,交易高峰期时系统中大量的交互性操作有可能会造成潮流越限^[40],产生阻塞问题。文献[5]还专门分析了不同阻塞管理方法,并提出了分布式安全校核的改进算法。

根据电改 9 号文配套文件《关于推进电力市场建设的实施意见》,目前我国电力市场主要成交方法为签订中长期合同交易电量,电力调度机构进行阻塞管理并将阻塞费用及盈余按责任分担^[41]。而本文设定的基于区块链的双边拍卖方式由于是短期交易方式,故可参考国外日前市场交易电力的方法和节点电价机制^[42],通过考虑线路安全约束的最优潮流,采用调整成交价格的方式缓解阻塞,使阻塞管理成本最小化。设定将阻塞费用计入节点成交价中,将可能会出现阻塞的线路进行标记。阻塞管理的环节如下:

1) 买卖双方分别对所要成交的电力进行估价并将报价提交到区块链平台。通过报价排序、节点信誉值 R_k^n 、可匹配范围 λ_k^n ,系统计算输电线路的

最大输电容量、判断可能出现的阻塞线路、自动制定阻塞费用。阻塞费用的计算源于产生阻塞时所需的再调度成本。阻塞线路和阻塞费用在区块链平台上对所有节点均可见。

2) 在接收到阻塞价格后,参与双边交易的节点选择可匹配范围 λ_k^n 内的最佳线路或调整参与交易的电量,使所要支付的阻塞费用最小化,减轻对联络线的压力。

3) 系统对已匹配线路进行安全校核。若校核通过,则最终成交价格 P_F 为买卖双方成交时的报价平均值与输电费用 P_T 之和;若校核未通过,则该匹配判定为无效,节点需进行下一轮的报价和匹配。

4) 处于阻塞线路中的节点必定会受到负荷削减。但若节点支付了最高额的阻塞费用,则系统应该保证该节点在阻塞线路中的负荷削减量比其余节点少。

在双边交易的电力市场中,电网企业无需制定电价,只负责电力输送并收取相关的输电费用。因此,输电费用的合理制定关系到电网能否正常运行。输电费用 P_T 等于电网的运营成本 C_1 、对交易市场和阻塞的管理成本 C_2 和辅助服务成本 C_3 之和^[43],即 $P_T = C_1 + C_2 + C_3$ 。最终成交价格 $P_F = P_T + \frac{1}{2}(P_U + P_S)$ 。

交易合同经买卖双方及电网企业三方签名后被视为生效,买方所支付的费用将被存在区块链平台上。当买方确定收货后,区块链平台将货款和输电费用分别发放到卖方和电网企业的账户。

4 基于区块链的分布式能源交易方案架构

4.1 基于区块链的分布式能源 P2P 架构以及交易流程

区块链是支撑能源 P2P 交易的技术,将政府、电网企业、监管部门、金融机构、新能源发电商、负荷集成商、绿色能源服务商、电力用户作为节点接入区块链网络实现点对点交易,通过数字签名、共识机制、智能合约、非对称加密算法等关键技术保证交易的安全性、公开透明性和数据可靠性^[44]。图 6 是基于区块链的分布式能源交易总体架构,区块链技术保证任何节点都可以实现互联和 P2P 交易^[45]。

区块链交易平台根据之前的交易时间估算本次的交易周期,交易周期开始。区块链平台确认各节点的信誉值并降序排列,划分信誉值等级。平台收集买方报价信息并降序排列、收集卖方售价信息

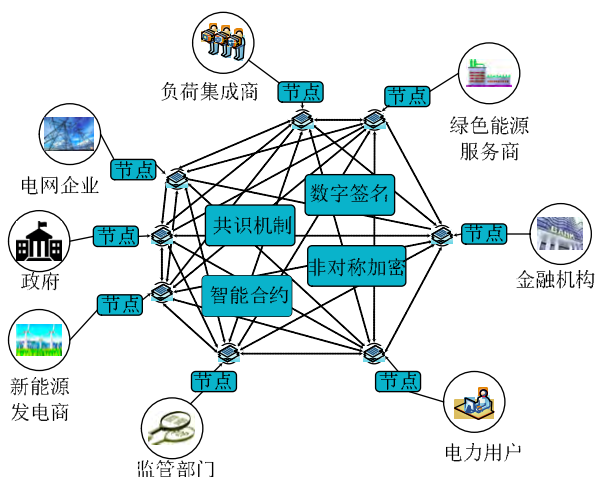


图6 基于区块链的分布式能源交易总体架构
Fig. 6 Blockchain-based distributed energy trading architecture

并升序排列，根据信誉值等级划分各节点的可匹配范围。电网企业在区块链平台后根据以上数据，推测可能产生阻塞的线路，并制定阻塞费用。之后平台广播排序名单、各节点可匹配范围及对应阻塞费用。节点选择是否进行交易：1) 节点确认进行交易，系统对该输电线路进行安全校核。若校核通过，则生成合适的智能合约，买卖双方通过多重签名最终确认合约执行，交易完成后钱款立即入账。若校核不通过，则判定此匹配不成功，节点进入下一轮报价。2) 节点不同意交易，系统再次提示节点是否调整报价或交易量。若节点调整报价或交易量，则重复之前的交易步骤直到交易完成；若节点不调整报价或交易量，则直接结束交易。基于区块链的分布式能源 P2P 交易流程如图 7 所示。

4.2 信息通信技术支持分析

基于区块链的分布式能源交易方案设计过程

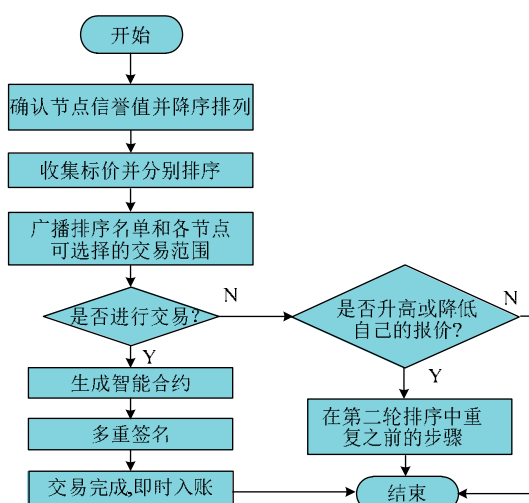


图7 基于区块链的分布式 P2P 能源交易流程
Fig. 7 Blockchain based distributed P2P energy trading process

中，参照分布式光伏接入电网的模式，按照自下而上的原则共分为 4 层，即数据采集层、数据传输层、数据处理层、业务应用支撑层。

1) 数据采集层。通过智能电表、智能家居收集用户在平台上购电和售电的交易信息数据，各项数据通过各种途径和渠道实时传输发送至区块链平台^[46]，平台对这些数据进行整理，分类并储存。目前电表设置的时间为 15 min 采集一次数据，之后可考虑改成更高频率的数据采集仪器，确保决策更精准。

2) 数据传输层。区块链技术可以为智能电表、产能设备以及耗能设备提供跨越各种网络的无缝访问^[47]，协助部署 5G 无线接入技术。智能终端用户通过 5G 网络快速获取并下载区块链上的数据，使平台的推广成为可能^[48]。在下行通信方向，区块链网络可利用 PLC、RS485、Wifi 等低成本通信技术进行信息交互^[49]。

3) 数据处理层。区块链的数据量庞大，为了降低实体经济成本，可采用信息上云、交易上链的模式^[50]。云计算服务由于具备成本低、可靠性高、调整速度快、资源弹性伸缩等优势，能解决区块链开发部署中的多系统、成本高的问题^[51]。将云计算与区块链相结合，可有效降低区块链的开发门槛，推动区块链向更多领域发展^[52]，同时也可以有效分析和处理区块链中的海量数据^[53]。

4) 业务应用支撑层。本层涉及到区块链的关键技术，如能判断交易自动进行的智能合约、保证各节点协同的共识机制等。未来有许多区块链平台，各平台可能有不同标准，涉及到接口不兼容问题。在区块链网络中运用人工智能 AI 技术可协助各设备在不同的系统中拥有统一的注册授权、管理完善的生命周期管理机制，可解决以上不兼容问题。

基于区块链的交易机制仍存在以下问题：

1) 区块链节点成本问题。基于区块链的电力交易体系需要大量的信息化设备的投资和建设^[54]，若将区块链技术应用到电力交易市场，必须考虑区块链技术在电网中的简化应用方式。

2) 区块链数据的存储方式^[55]。区块链技术对于底层的数据存储具有一定的要求，为了降低开销，可以将业务数据与记录数据进行分离，将与信息交互有关的数据上链使用，其余数据放在链下存储。

3) 底层通信速率低^[56]。通道的效率及性能较差，是否应该考虑简化区块链的验证机制，是否规

定全部节点都进行记账。可以在区域配置区块链节点，降低系统的部署成本。

4.3 两种交易模式的比较

传统的电力市场交易依赖于银行等第三方机构^[57]，交易流程多、效率低、时间长。电力需要从中心发电厂运输到个人用户处，电力损耗大，交易成本增加。集中式管理将数据存储在中心机构的数据库中，中心机构管理所有用户账目信息和交易历史记录，数据安全系数低，且数据库一旦受到攻击，数据难以恢复^[58]。用户只掌握自己的记录，无法知晓其他用户的交易记录，故影响互信市场的建立^[59]。黑客如果掌握所有交易记录，可借此推测出账户信息，对用户的交易安全及隐私保护产生巨大威胁^[60]。

基于区块链的分布式能源交易系统中，各节点成为独立的产消者，各主体平等分散决策，采用 P2P 形式进行直接能源交易，减少了不必要的电力损耗，使资源成本和交易成本降到最低。在不同的区域之间各节点也可进行能源交易^[61]，跨区域的分布式能源 P2P 交易如图 8 所示。所有交易公开，交易节点可以匿名，保证节点账户的安全性^[62]。分散化管理无需中心服务器，规避昂贵的运维费用，降低成本。安全的数据共享，拥有更多的数据、优化的模型和更好的结果^[63]。数据溯源跟踪，增加市场主体之间的互信任。

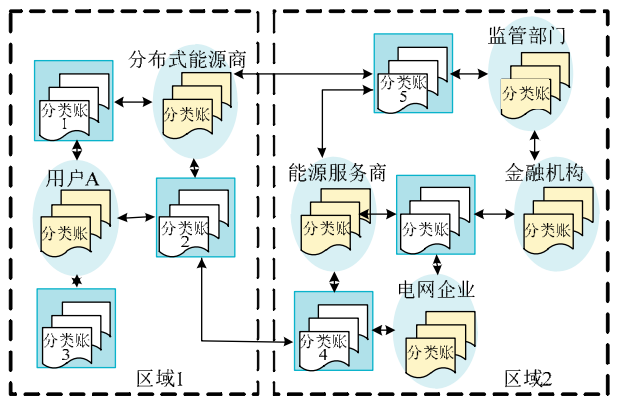


图 8 跨区域的分布式能源 P2P 交易

Fig. 8 Cross-regional distributed energy P2P transactions

综上所述，表 4 从交易方式、资源消耗、交易成本、数据存储、数据安全 5 个方面对比了传统电力市场交易和基于区块链的分布式能源交易性能。

4.4 局限性分析

目前，由于区块链应用正处于初步探索阶段，关于区块链应用落地的标准还未得到制定，故不同领域关于此方面各有不同的看法。以下是常见的区块链应用落地三大误区：1) 区块链一定要发币，一定要挖矿；2) 区块链是万能的；3) 公有链能用

表 4 传统电力市场交易和基于区块链的分布式能源交易性能对比

Tab. 4 Comparison of performance between traditional electricity market transactions and blockchain-based distributed energy trading

性能	传统电力市场交易	基于区块链的分布式能源交易
交易方式	依赖于银行等第三方机构	P2P 直接交易
资源消耗	高	低
交易成本	高	低
数据存储	存放于中心机构的数据库	区块链数据库分布式存储
数据安全	安全系数低、 受攻击后难以恢复	安全系数高、 运用副本可复原数据

于商业部署。对应上述三大误区，本文针对分布式能源交易系统提出 3 点解决办法：1) 公有链的各节点平等^[64]，需要用币作为激励，但联盟链由于节点结成共同利益联盟，故无需用币作为激励。分布式能源交易系统采用联盟链，可以根据业务或利益驱动，节点之间通过投票达成共识，不一定要发币和挖矿。2) 区块链技术不是万能的，并不能提高系统性能，只是改变了集中管理的方式。研究分布式能源市场区块链应用时应注意结合中国能源市场政策和业务需求。3) 我国《信息系统安全等级保护基本要求》和《金融行业信息系统信息安全等级保护实施指引》都规定了信息系统应在网络边界部署访问控制设备、启用访问控制功能，且在网络区域边界对网络最大流量数及网络并发连接数进行监控，限制网络最大流量数及网络连接数。这些规章都与公有链的特性相悖，故公有链的技术架构并不符合国家的相关规定，无法用于商业部署。

5 结论

基于区块链的分布式能源交易的优势在于，一方面使分布式能源 P2P 交易透明便捷，另一方面又同时保证了中心化有效监管。系统的不足之处为电网上分布式节点数量有一定的上限值，这会给交易市场运行带来更高的风险。目前可靠且可实现的区块链实体应用用例较少，且后续的区块链吞吐量增大问题、安全性防护问题、数据处理优化问题等还未得到解决，区块链技术落实到分布式能源交易市场难度大。未来的分布式能源交易区块链市场可能是多链协同、跨链流通形式，将源网荷储、物联网、微电网、电力交易、碳排放、多能互补、能源项目资产化和其他领域通过不同的区块链互联，运用多链形式解决接口扩展适配的问题、跨链形式加速分布式能源流通。在区块链技术发展的早期，进行分布式能源交易市场区块链实体应用白盒测试还为时尚早，但研究应用落地标准、解决存在问题却是刻不容缓。

参考文献

- [1] 周海明, 刘超群, 刘敦楠, 等. 能源互联网选择权放开交易研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5412-5417.
Zhou Haiming, Liu Chaoqun, Liu Dunnan, et al. Internet option open energy trading research[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5412-5417(in Chinese).
- [2] 张弛, 陈晓科, 徐晓刚, 等. 基于电力市场改革的微电网经营模式[J]. 电力建设, 2015, 36(11): 154-159.
Zhang Chi, Chen Xiaoke, Xu Xiaogang, et al. Microgrid operation mode based on electricity market reform[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(11): 154-159(in Chinese).
- [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 Jinqi, Li Shuxian, Fan Bing, et al. Blockchain based energy trading in energy internet[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 24-31(in Chinese).
- [4] 王继业, 高灵超, 董爱强, 等. 基于区块链的数据安全共享网络体系研究[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(4): 742-749.
Wang Jiye, Gao Lingchao, Dong Aiqiang, et al. Block chain based data security sharing network architecture research[J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(4): 742-749(in Chinese).
- [5] 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).
- [6] 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): 4011-4022(in Chinese).
- [7] 吴振铨, 梁宇辉, 康嘉文, 等. 基于联盟区块链的智能电网数据安全存储与共享系统[J]. 计算机应用, 2017, 37(10): 2742-2747.
Wu Zhenquan, Liang Yuhui, Kang Jiawen, et al. Secure data storage and sharing system based on consortium blockchain in smart grid[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(10): 2742-2747(in Chinese).
- [8] Lee B, Lee J H. Blockchain-based secure firmware update for embedded devices in an Internet of Things environment[J]. Journal of Supercomputing, 2017, 73(3): 1-16.
- [9] 赵赫, 李晓风, 占礼葵. 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(1): 216-219.
Zhao He, Li Xiaofeng, Zhan Likui. Data integrity protection method for microorganism sampling robots based on blockchain technology[J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 216-219(in Chinese).
- [10] 李彬, 张洁, 祁兵, 等. 区块链: 需求侧资源参与电网互动的支撑技术[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 1-8.
Li Bin, Zhang Jie, Qi Bing, et al. Block chain: supporting technology of demand side resources participating in grid interaction[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 1-8(in Chinese).
- [11] 曾鸣, 舒彤, 李冉, 等. 能源互联网背景下可交易能源实施的关键问题及展望[J]. 电力建设, 2018, 39(2): 1-9.
Zeng Ming, Shu Tong, Li Ran, et al. Key problems and prospects of transactive energy implementation under energy internet[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(2): 1-9(in Chinese).
- [12] Lu Q, Xu X. Adaptable blockchain-based systems: a case study for product traceability[J]. IEEE Software, 2017, 34(6): 21-27.
- [13] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 1-5.
Deng Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5(in Chinese).
- [14] 曾鸣, 彭丽霖, 孙静惠, 等. 兼容需求侧可控资源的分布式能源系统经济优化运行及其求解算法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1650-1656.
Zeng Ming, Peng Lilin, Sun Jinghui, et al. Economic optimization and corresponding algorithm for distributed energy system compatible with demand-side resources[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1650-1656(in Chinese).
- [15] 王雁凌, 李蓓, 崔航. 天然气分布式能源站综合价值分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 136-142.
Wang Yanling, Li Bei, Cui Hang. Comprehensive value analysis for gas distributed energy station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 136-142(in Chinese).
- [16] 李彬, 曹望璋, 祁兵, 等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 736-744.
Li Bin, Cao Wangzhang, Qi Bing, et al. Overview of application of block chain technology in ancillary service market[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 736-744(in Chinese).
- [17] 张俊, 高文忠, 张应晨, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544-1554.
Zhang Jun, Gao Wenzhong, Zhang Yingchen, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1544-1554(in Chinese).
- [18] Pop C, Cioara T, Antal M, et al. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids[J]. Sensors, 2018, 18(1): 162-182.
- [19] 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(1-2): 207-214.
- [20] Cheng S, Zeng B, Huang Y Z. Research on application model of blockchain technology in distributed electricity market[C]/IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017: 012065.
- [21] 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).
- [22] 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(in Chinese).
- [23] Chen S, Liu C C. From demand response to transactive energy: state of the art[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2017, 5(1): 1-10.
- [24] 张永, 李晓辉. 一种改进的区块链共识机制的研究与实现[J]. 电子设计工程, 2018, 26(1): 38-42.
Zhang Yong, Li Xiaohui. The research and implementation of an improved blockchain's consensus mechanism[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(1): 38-42(in Chinese).
- [25] Teixeira B, Pinto T, Silva F, et al. Multi-agent decision support tool to enable interoperability among heterogeneous energy systems

- [J]. Applied Sciences, 2018, 8(3): 328.
- [26] Sharma P K, Chen M Y, Park J H. A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT[J]. IEEE Access, 2018(6): 115-124.
- [27] 李彬, 曹望璋, 张洁, 等. 基于异构区块链的多能系统交易体系及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 183-193.
- Li Bin, Cao Wangzhang, Zhang Jie, et al. Multi-energy system trading system and key technologies based on heterogeneous blockchain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 183-193(in Chinese).
- [28] Christidis K, Devetsikiotis M. Blockchains and smart contracts for the internet of things[J]. IEEE Access, 2016(4): 2292-2303.
- [29] Lu Q, Xu X. Adaptable blockchain-based systems: a case study for product traceability[J]. IEEE Software, 2017, 34(6): 21-27.
- [30] Gao J, Asamoah K O, Sifah E B, et al. Grid monitoring: secured sovereign blockchain based monitoring on smart grid[J]. IEEE Access, 2018(6): 9917-9925.
- [31] Pop C, Cioara T, Antal M, et al. Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids[J]. Sensors, 2018, 18(1): 162-182.
- [32] Wang J, Wang Q, Zhou N, et al. A novel electricity transaction mode of microgrids based on blockchain and continuous double auction[J]. Energies, 2017, 10(12): 1971-1992.
- [33] 朱芷, 王海潮, 赵振宇, 等. 大规模分布式能源博弈竞争模型及其求解算法[J]. 电力建设, 2017, 38(4): 135-143.
- Zhu Jiang, Wang Haichao, Zhao Zhenyu, et al. Game competition model of large-scale distributed energy system and its solution algorithm[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(4): 135-143(in Chinese).
- [34] 李刚, 孟欢, 周国亮, 等. 基于区块链技术的微网能量管理探析与方案设计[J]. 电力建设, 2018, 39(2): 43-49.
- Li Gang, Meng Huan, Zhou Guoliang, et al. Energy management analysis and scheme design of microgrid based on blockchain[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(2): 43-49(in Chinese).
- [35] 左坤雨, 刘友波, 向月, 等. 基于信息互动的分布式可再生能源多代理交易竞价模型[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2477-2484.
- Zuo Kunyu, Liu Youbo, Xiang Yue, et al. Multi-agent transaction bidding model for distributed renewable energy based on information interact[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2477-2484(in Chinese).
- [36] 刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
- Liu Dunnan, Zeng Ming, Huang Renle, et al. Business models and market mechanisms of E-Net(2)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056(in Chinese).
- [37] 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(in Chinese).
- [38] Khaqqi K N, Sikorski J J, Hadinoto K, et al. Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application[J]. Applied Energy, 2017(209): 8-19.
- [39] 邵雪, 孙宏斌, 郭庆来. 能源互联网区块链应用的交易效率分析[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3400-3406.
- Tai Xue, Sun Hongbin, Guo Qinglai. Transaction efficiency analysis of blockchain applied to energy internet[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3400-3406(in Chinese).
- [40] 赖清平, 吴志力, 崔凯, 等. 微电网规划设计关键技术分析与展望[J]. 电力建设, 2018, 39(2): 18-29.
- Lai Qingping, Wu Zhili, Cui Kai, et al. Key technology analysis and prospect of microgrid planning and design[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(2): 18-29(in Chinese).
- [41] 国务院办公厅. 关于进一步深化电力体制改革的若干意见[EB/OL]. (2015-03-23)[2018-01-12]. <https://wenku.baidu.com/view/7a04cf8cf61fb7360a4c6538.html>.
- [42] 包铭磊, 丁一, 邵常政, 等. 北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4881-4892.
- Bao Minglei, Ding Yi, Shao Changzheng, et al. Review of Nordic electricity market and its suggestions for China[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4881-4892(in Chinese).
- [43] 汪朝忠. 双边交易模式下的电力定价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [44] 张葵, 刘德. 区块链中的安全问题研究[J]. 数字技术与应用, 2017(8): 199-200.
- Zhang Yan, Liu De. Research on security problem in block chain[J]. Digital Technology and Application, 2017(8): 199-200(in Chinese).
- [45] Zhang N, Wang Y, Kang C, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4022.
- [46] 曾鸣, 程俊, 王雨晴, 等. 区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3672-3681.
- Zeng Ming, Cheng Jun, Wang Yuqing, et al. Primarily research for multi module cooperative autonomous mode of energy internet under blockchain framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681(in Chinese).
- [47] Sharma P K, Singh S, Jeong Y S, et al. DistBlockNet: a distributed blockchains-based secure SDN architecture for IoT networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(9): 78-85.
- [48] Fan K, Ren Y, Wang Y, et al. Blockchain-based efficient privacy preserving and data sharing scheme of content-centric network in 5G[J]. IET Communications, 2018, 12(5): 527-532.
- [49] Kogure J, Kamakura K, Shima T, et al. Blockchain technology for next generation ICT[J]. Fujitsu Scientific & Technical Journal, 2017, 53(5): 56-61.
- [50] Yang C, Chen X, Xiang Y. Blockchain-based publicly verifiable data deletion scheme for cloud storage[J]. Journal of Network & Computer Applications, 2018, 103.
- [51] 颜拥, 赵俊华, 文福拴, 等. 能源系统中的区块链: 概念、应用与展望[J]. 电力建设, 2017, 38(2): 12-20.
- Yan Yong, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. Blockchain in energy systems: concept, application and prospect[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 12-20(in Chinese).
- [52] Sharma P K, Chen M Y, Park J H. A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT[J]. IEEE Access, 2018(6): 115-124.
- [53] 李彬, 卢超, 曹望璋, 等. 基于区块链技术的自动需求响应系统应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3691-3702.
- Li Bin, Lu Chao, Cao Wangzhang, et al. A preliminary study of block chain based automated demand response system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3691-3702(in Chinese).
- [54] 严太山, 程浩忠, 曾平良, 等. 能源互联网体系架构及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 105-113.
- Yan Taishan, Cheng Haozhong, Zeng Pingliang, et al. System architecture and key technologies of energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 105-113(in Chinese).
- [55] 朱岩, 甘国华, 邓迪, 等. 区块链关键技术中的安全性研究[J]. 信息安全研究, 2016, 2(12): 1090-1097.
- Zhu Yan, Gan Guohua, Deng Di, et al. Security architecture and key

- technologies of blockchain[J]. Journal of Information Security Research, 2016, 2(12): 1090-1097(in Chinese).
- [56] 杨德昌, 赵肖余, 徐梓潇, 等. 区块链在能源互联网中应用现状分析和前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3664-3671. Yang Dechang, Zhao Xiaoyu, Xu Zixiao, et al. Developing status and prospect analysis of blockchain in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3664-3671(in Chinese).
- [57] 李彬, 肖惠, 文亚凤, 等. 基于区块链的智能用电云服务模式分析[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 8-14. Li Bin, Xiao Hui, Wen Yafeng, et al. Cloud service mode analysis of smart electricity based on block chain[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 8-14(in Chinese).
- [58] Lei A, Cruickshank H, Cao Y, et al. Blockchain-based dynamic key management for heterogeneous intelligent transportation systems [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(6): 1832-1843.
- [59] Teixeira B, Pinto T, Silva F, et al. Multi-agent decision support tool to enable interoperability among heterogeneous energy systems [J]. Applied Sciences, 2018, 8(3): 328.
- [60] 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 & Secure Computing, 2016, 15(5): 840-852.
- [61] 施泉生, 刘坤, 温蜜. 基于区块链技术的跨省发电权交易模型[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 15-23. Shi Quansheng, Liu Kun, Wen Mi. Interprovincial generation rights trading model based on blockchain technology[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 15-23(in Chinese).
- [62] 齐林海, 李雪, 祁兵, 等. 基于区块链生态系统的充电桩共享经济模式[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 1-7. Qi Linhai, Li Xue, Qi Bing, et al. Shared economy model of charging pile based on block chain ecosystem[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 1-7(in Chinese).
- [63] Sharma P K, Rathore S, Park J H. DistArch-SCNet: blockchain-based distributed architecture with Li-Fi Communication for a scalable smart city network[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2018, 7(4): 55-64.
- [64] 田兵, 雷金勇, 许爱东, 等. 基于能源路由器的能源互联网结构及能源交易模式[J]. 南方电网技术, 2016, 10(8): 11-16. Tian Bing, Lei Jinyong, Xu Aidong, et al. Structure and energy trading mode of energy internet based on energy router[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(8): 11-16(in Chinese).



李彬

收稿日期：2018-05-27。

作者简介：

李彬(1983), 男, 博士, 副教授, 通信作者, 主要从事智能用电、自动需求响应技术方面的研究工作, E-mail: direfish@163.com;

覃秋悦(1996), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为能源互联网信息通信技术, E-mail: 1788840122@163.com;

祁兵(1965), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力节能、自动需求响应相关技术研究;

孙毅(1972), 男, 教授, 主要从事电力大数据与电网能效节能相关技术研究;

李德智(1982), 男, 硕士, 工程师, 从事智能用电、需求响应、能效管理方面的研究;

石坤(1984), 男, 工程师, 研究方向为能效与智能用电技术;

杨斌(1977), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力需求侧管理;

奚培锋(1981), 男, 硕士, 主要研究方向为智能电网用户端。

(责任编辑 王金芝)