

区块链技术在分布式能源交易中的应用

徐嘉辉,马立新

(上海理工大学 机械工程学院,上海 200093)

摘要:分布式能源就近自主交易已经成为我国配电网的未来发展趋势。但是分布式能源的出力具有不确定性及个体趋利特性,且参与者众多、单笔交易量少、具有高并发性,使得交易过程中的安全性、公平性与实效性成为突出问题。区块链技术以其去中心化、安全透明、不可篡改等特性与分布式能源交易的需求具有极高的契合度。为此,首先分析了基于现有区块链技术的电力市场交易系统的优势与不足,提出了基于有向无环图(DAG)拓扑的公平委托权益证明(F-DPoS)共识机制的区块链技术,改善了DPoS共识机制下的选举舞弊和DAG中的知名节点问题,辅以公平的通证奖励和刷新机制,以经济激励的方式促进市场主体维护系统的安全;然后构建了基于DAG+F-DPoS共识机制的区块链分布式能源交易管理框架,确保在面对高并发、高流量、高可用的实际场景时能够保证高效、快速、安全的交易吞吐。通过算例仿真分析验证了所提方法的可追溯性、高效性与安全性。

关键词:区块链;有向无环图;公平委托权益证明;共识机制;电力市场;分布式能源交易

中图分类号:TM 73;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202008001

0 引言

随着能源互联网的发展,风能、太阳能、储能电池等具有对环境污染小、能源转化率高、设备小且安装方便等优点的分布式能源大量并网,电力交易类型呈现多元化的趋势^[1]。与传统电力交易相比,分布式能源交易的准入门槛更低^[2],参与者众多、单笔交易量少、高并发性是其最突出的特点^[3]。由于新一轮电力市场改革鼓励分布式能源参与市场化交易^[4]这一政策因素及分布式发电技术的飞速发展等技术因素,分布式能源交易体量迅速膨胀,带来了安全性不足、交易效率低下等问题,因此基于区块链技术的分布式能源交易体系被提出。

现有的基于区块链视角的分布式能源交易模式主要分为以下2类。一类是利用区块链技术的去中心化和去信任特性局域网络下的P2P(Peer-to-Peer)交易,无需第三方参加,交易平台只起到记录作用。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^[5],通过智能电表采集装有太阳能电池板的居民发电数据,并将其记录在区块链上,通过智能合约将这些电力P2P地出售给社区成员,使用户有权将过剩光伏发电回馈至电网。另一类是利用区块链技术公开透明的特性,通过去中心化交易平台根据买卖双方报价及交易需求双向撮合交易的集中出清模

式。而现有区块链技术由于其计算速度有限且耗能巨大等制约因素,在将其应用于分布式能源交易领域时通常很难落实^[6]。文献[1]构建了区块链互联网络;文献[2]提出了基于节点信用评价的交易模式,以经济效益奖励高信用市场主体,实现对分布式电源信用的闭环管控;文献[6]提出了基于区块链技术的多微网竞争博弈模型;文献[7]从多个维度阐述了区块链技术在能源互联网中的应用方式;文献[8]提出了基于区块链技术和改进型拍卖算法的微电网交易方法。以上研究与项目实践都取得了较好的成果,在一定程度上解决了区块链技术视角下的能源交易问题,但是现有共识机制下将区块链应用于分布式能源交易依然存在在保障交易安全性的前提下难以面对高并发的分布式能源交易吞吐的问题。

鉴于此,本文提出了基于有向无环图DAG(Directed Acyclic Graph)拓扑的公平委托权益证明F-DPoS(Fair-Delegated Proof of Stake)机制区块链技术的分布式能源交易管理方法,可有效应对巨大的交易体量,确保分布式能源交易市场的安全、高效、稳定运行。首先分析了区块链技术在分布式能源交易领域的较好适用性,并在委托权益证明DPoS(Delegated Proof of Stake)共识机制的基础上引入变替代弹性VES(Variable Elasticity of Substitution)生产函数,将简单的公开投票选举决定记账节点改成一个含有动态权重的综合评分模型,提升了节点选举的安全性;提出了基于DAG拓扑的区块链结构,支持以交易为粒度的高并发写入,具有更快的出块速度和更大的吞吐量。然后设计了包含应用层、界面层、共识层、激励层、合约层、存储层、网络层的图灵完备的分布式能源交易生态。最后通过算例仿

收稿日期:2020-03-07;修回日期:2020-06-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61205076)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61205076)

真验证了该交易生态的安全性高效性。

1 区块链技术及分布式能源交易需求分析

1.1 区块链技术

区块链技术作为一种公开透明、去中心化的数据库,相邻的2个区块通过首尾哈希值单向连接以实现链式存储^[9],其具有不可篡改性、可验证性等特点,在分布式能源交易管理方面体现出巨大的先天优势。

1.2 分布式能源交易需求分析

分布式能源是指分布在用户端的能源综合利用系统^[10]。一次能源以天然气为主,以风电、光伏等可再生能源为辅;二次能源以分布在用户端的冷热电三联供为主、其他中央能源供应系统为辅,实现以直接满足用户多种需求的能源梯级利用^[11]。分布式能源的资源、环境效益最高,我国电力系统正逐步进行能源替换^[12]。

分布式能源交易呈现高度自治、自发进行等特点,由于分布式能源中存在较强的个体趋利特性,其出力的不确定性也会严重影响交易的执行率,因此交易过程中对交易公平性、安全性的要求较高。

1.3 基于区块链技术解决分布式能源交易痛点问题

分布式能源交易在信息开放、信息对等、信息互联、信息安全等需求方面与区块链技术的去中心化、安全透明、不可篡改、可验证可追溯等特性呈现出完美的契合度^[13],两者结合后具有以下几点显著优势:

(1)区块链作为一种去中心化的分布式账本,可以为众多主体提供公平的信息读取权限,用户可以随时上线参与交易,对区块信息进行读写,同时也降低了信用成本和管理成本;

(2)区块链上各节点的地位相同,在交易或记账时是绝对平等的,每个节点具有平等的权利和义务,不存在等级关系,增进了买卖双方之间的互动;

(3)在区块链平台上参与主体的交易信息不受访问的限制,可以及时掌握交易期间可调度资源的变化,便于调整交易策略;

(4)目前分布式能源交易市场中依然存在信息不透明、规则不公开等信任问题^[14],而区块链具有分权化、可追溯、不可篡改的特性,可以解决上述问题^[15]。

2 基于区块链的分布式能源交易管理方法

2.1 共识机制

目前公有链有3种主流共识算法,包括工作量证明 PoW (Proof of Work)、权益证明 PoS (Proof of Stake)、DPoS^[16]。其中,PoW 机制是根据节点的算力公平地分配记账权,各节点为争夺记账权会消耗大

量电力且达成共识的时间较长;PoS 机制根据持有股权及持有时间占系统总量的比例来决定获得本次记账权的概率,存在股权龄依赖问题,容易对系统发起双花攻击;DPoS 机制不需要挖矿,也不需要全节点验证,仅是通过有限数量的见证节点进行验证,但代理记账节点的选举过程存在舞弊的可能性,同时牺牲了一部分去中心化特性^[17]。

2.1.1 F-DPoS 机制

本文提出的 F-DPoS 机制将简单的公开投票选举决定节点改为一个综合的评分模型,使每一个候选节点更加公平地竞选超级节点,使更有能力的节点成为区块生产者,以避免 DPoS 机制中的节点选举舞弊问题。基于 F-DPoS 共识机制选举超级节点的过程如图1所示。

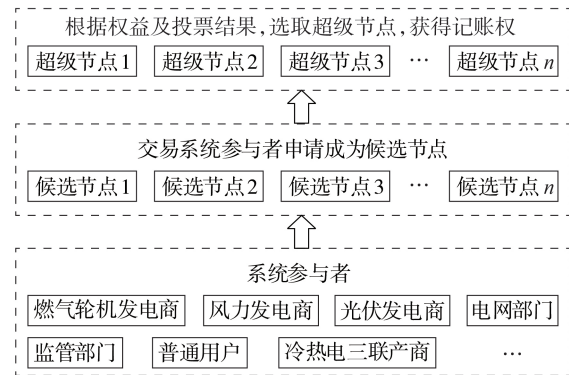


图1 基于F-DPoS共识机制选举超级节点的过程

Fig.1 Election process of super node based on F-DPoS consensus mechanism

微网中含有燃气轮机发电商、风力发电商、光伏发电商以及冷热电三联产商等分布式能源出力点,另外还包括电网部门、监管部门、普通用户等节点分别作为输电方、第三方监管部门和单向用户。首先对各节点算力进行评估,只有具有符合制定标准的算力的节点才有资格和能力成为最终的区块生产者;然后量化每个节点对整个区块链生态做出的贡献(将其定义为通证增长率),配合原有的投票结果,以动态权重的形式对3个变量进行合理的分配,形成最终模型的3个重要变量。

根据模型所得结果进行有效排序,将前 N 个候选节点选为每轮的区块制造者。VES生产函数不仅符合边际收益递减的规律,而且等产量曲线具有严格的凸性,在用于实证分析时具有较好的统计特性,所以本文最终选取VES生产函数作为评分模型,如式(1)所示。

$$R = \gamma [\partial_1 C^{-\rho} + \partial_2 \eta (CI)^{-\mu} I^{-\rho} + \partial_3 V^{-\rho}]^{-1/\rho} \quad (1)$$

其中, ∂_1 、 ∂_2 、 ∂_3 为权重值,且有 $\partial_1 + \partial_2 + \partial_3 = 1$;系数 $\rho < 1$ 且 $\rho \neq 0$, $\mu + \rho = 1$; γ 为平衡系数; η 为约束系数; C 为节点算力; I 为节点的通证增长率; V 为节点所得

投票。根据实际情况调整 ∂_1 、 ∂_2 、 ∂_3 的值,通过控制动态权重使整个选举过程达到相对公平。经过评分加总,根据评分由高到低排序,选取排名靠前的奇数个节点。F-DPoS 机制使得新的有能力的节点也有机会被选中成为区块生产者。

2.1.2 DAG

为了提高无许可协议的吞吐量,在链上模型中基于 DAG 的解决方案被认为是解决吞吐量问题的有效方法^[18]。在有向图 $G=(V_G, E)$ 中,对于任意 1 个顶点 $v \in V_G$,都不存在任何路径 $p=\{e_1, e_2, \dots\} (e_i \in E)$,使得从 v 开始出发到 v 终止,则 G 被称为 DAG。相较于传统区块链基于单链、以区块为粒度、单点写入的特点,DAG 作为一种新型的图形数据结构,其支持以交易为粒度的高并发写入,具有更快的出块速度和更大的吞吐量。图 2 为基于 DAG 拓扑的区块链概念图。每产生一笔交易,数据将被其关联的交易节点获得并传播,使得每个节点都维护着自身和其他节点的通信记录。

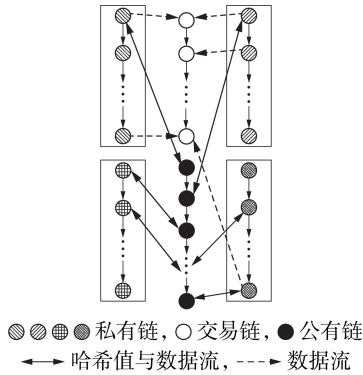


图 2 基于 DAG 拓扑的区块链

Fig.2 Blockchain based on DAG topology

2.2 能源交易账户设置

当前区块链主流交易账户模型有 2 种,一种是比特币系统中的未花费的交易输出 UTXO(Unspent Transaction Output)模型,另一种是以太坊的 Account 模型^[19]。UTXO 模型具有原理简单、易于扩展、高度并行且隐匿性强等优点,但是其局限性在于只能实现账户状态的简单转换,要基于 UTXO 实现图灵完备的智能合约极其困难。以太坊的 Account 模型是天然面向对象的,可以通过智能合约的几行代码实现复杂的状态转换,易于管理、实现,但其缺点是无法实现匿名且不易扩展^[20]。

本文的分布式能源交易账户参照以太坊的 Account 模型。Account 模型中存在 2 种账户,分别是由密钥控制的不关联任何代码的外部账户 EOA(Externally Owned Account)和由智能合约代码控制的合约账户 CA(Contract Account)。EOA 可以触发交易,而 CA 不能主动发起交易,只能在被触发后按预先编

写的智能合约代码执行。

2.3 挖矿制度设计

2.3.1 通证奖励

本文所设计分布式能源交易方法的挖矿制度是通过比较装有智能电表的每个节点的交易体量和设定的挖矿难度(交易量上限)以获得通证,交易量上限的设定是为了避免恶意挖矿,同时保证在节点数量快速增长的情况下,总的通证产出大致不变。

当前周的挖矿难度是由上一周的挖矿难度与上一周占再之前一周中参与交易的节点的比例相乘所获得的,并将这一挖矿难度作为本周的交易量上限。

$$D_N = D_{N-1} \frac{N_{\text{node}N-1}}{N_{\text{node}N-2}} \quad (2)$$

其中, D_N 、 D_{N-1} 分别为第 N 、 $N-1$ 周的挖矿难度; $N_{\text{node}N-1}$ 、 $N_{\text{node}N-2}$ 分别为第 $N-1$ 、 $N-2$ 周参与交易的节点数量。

对于每天具体产出的总通证,需要分 2 种情况判断每个节点能够获得的通证奖励。

(1)情况 1:当第 $N-1$ 周的平均交易量 A_{N-1} 小于等于第 N 周挖矿难度值的一半,即 $A_{N-1} \leq 0.5 D_N$ 时,节点 i 在第 N 周获得的通证奖励 $P_{\text{profit}i}$ 如式(3)所示。

$$P_{\text{profit}i} = \begin{cases} 0.5 P_{\text{profit.Threshold}} \frac{W_i}{A_{N-1}} & W_i \leq A_{N-1} \leq 0.5 D_N \text{ (奖励情形 1)} \\ 0.5 P_{\text{profit.Threshold}} \left(1 + \frac{W_i - A_{N-1}}{D_N - A_{N-1}} \right) & A_{N-1} \leq W_i \leq 0.5 D_N \text{ (奖励情形 2)} \\ P_{\text{profit.Threshold}} & \text{其他 (奖励情形 3)} \end{cases} \quad (3)$$

其中, W_i 为节点 i 在第 N 周的交易量; $P_{\text{profit.Threshold}}$ 为第 N 周的交易量阈值对应的通证奖励。

情况 1 下本周的总产量 T_{mining} 如式(4)所示,周通证产出量曲线如图 3(a)所示。

$$T_{\text{mining}} = \sum_{i=1}^{M_1} P_{\text{profit}i} + \sum_{j=1}^{M_2} P_{\text{profit}j} + P_{\text{profit}k} M_3 \quad (4)$$

$$N_{\text{node}} = M_1 + M_2 + M_3 \quad (5)$$

其中, M_1 、 M_2 、 M_3 分别为发生奖励情形 1—3 的节点数; N_{node} 为节点总数。

(2)情况 2:当第 $N-1$ 周的平均交易量 A_{N-1} 大于第 N 周挖矿难度值的一半,即 $A_{N-1} > 0.5 D_N$ 时,节点 i 在第 N 周获得的通证奖励 $P_{\text{profit}i}$ 如式(6)所示。

$$P_{\text{profit}i} = \begin{cases} P_{\text{profit.Threshold}} \frac{W_i}{A_{N-1}} & W_i \leq 0.5 D_N \text{ (奖励情形 4)} \\ P_{\text{profit.Threshold}} & \text{其他 (奖励情形 5)} \end{cases} \quad (6)$$

情况 2 下本周的总产量如式(7)所示,周通证产出量曲线如图 3(b)所示。

$$T_{\mining} = \sum_{i=1}^{M_4} P_{\text{profit}i} + P_{\text{profit}j} M_5 \quad (7)$$

$$N_{\text{node}} = M_4 + M_5 \quad (8)$$

其中, M_4 、 M_5 分别为发生奖励情形4、5的节点数。

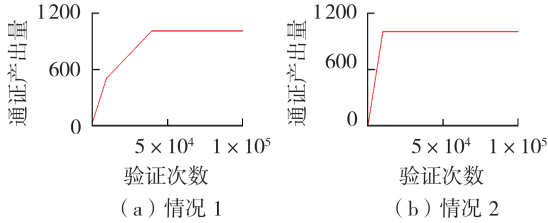


图3 通证周产出量

Fig.3 Weekly output of token

2.3.2 刷新机制

由于通证奖励的总产量在不断上升,故本文引入刷新机制。当挖矿难度达到设定值,即每周交易量达到限值时,刷新挖矿难度,并且使产量减半,如式(9)所示。

$$P_{\text{profit.newthreshold}} = 0.5 P_{\text{profit.oldthreshold}} \quad (9)$$

其中, $P_{\text{profit.newthreshold}}$ 为刷新之后本周产出量限值; $P_{\text{profit.oldthreshold}}$ 为上一周的产出量限值。

刷新后第1周的挖矿难度为:

$$D(1) = A_{N-1} \quad (10)$$

之后的挖矿难度 ($N > 1$) 根据式(2)进行迭代。

2.4 系统架构

接入区块链网络的各节点通过数字签名、智能合约、F-DPoS 共识机制等来实现 P2P 交易,保证了公平公正性、交易的安全性以及交易效率。基于区块链的分布式能源交易系统架构如图4所示,其采用模块化、灵活扩展的松耦合设计,系统架构整体分为全生态的7层,包括应用层、界面层、共识层、激励层、合约层、存储层、网络层,具有图灵完备的特点。

该分布式能源交易方案的过程主要分为信息发布与撮合、信息上链、结算、信息存储等阶段,具体

如下。

(1)信息发布与撮合:已安装智能电表并上链的用户与发电商通过交易平台发出购售电请求,用户与发电商在应用层提交交易意向,即完成买卖双方交易匹配。

(2)信息上链:每个节点向不中断的私有链写入上一阶段获取的数据信息,其中包含双方报价及交易双方身份、购电方式、交易数量等初始信息,并同时通过公有链和交易链对其他节点进行通信。

(3)结算:链上所有节点收到买卖双方提交的匹配信息后,通过由智能合约代码控制的合约账户按照预先编写的智能合约代码执行本次交易结算,并实现买方合约账户向卖方外部账户的资金转移。

(4)信息存储:一旦交易完成,DAG链式结构将直接分块存储交易数据,私有链上记录交易双方此次交易的详细信息,公链上生成新的区块来记录本次交易的摘要内容,为下一轮交易提供参考。

3 算例与仿真分析

3.1 分布式能源交易智能合约测试

本节设置一个微网系统模型进行分布式能源交易智能合约测试,其中燃气轮机发电商、风力发电商、光伏发电商以及冷热电三联产商为生产型消费者,包含电网部门、监管部门以及4种类型普通消费者共7个用户。电网对分布式电源的收购电价为0.4元/(kW·h),并以首笔交易为例进行结算。表1为首笔交易发生时交易链生成的区块信息,微网系统中所有已上链的分布式能源可以访问负荷需求、各分布式能源出力 (P_{gt} 、 P_{w} 、 P_{pv} 、 P_{ch} 分别为燃气轮机、风机、光伏、冷热电三联产机组出力)、各分布式能源可参与电能交易的可用额外功率 (P'_{gt} 、 P'_{w} 、 P'_{pv} 、 P'_{ch} 分别为燃气轮机、风机、光伏、冷热电三联产机组的可用额外功率)、出售电价和当前哈希等信息,可以为运营商提供清晰的利润视图,之后生成的区块中还将

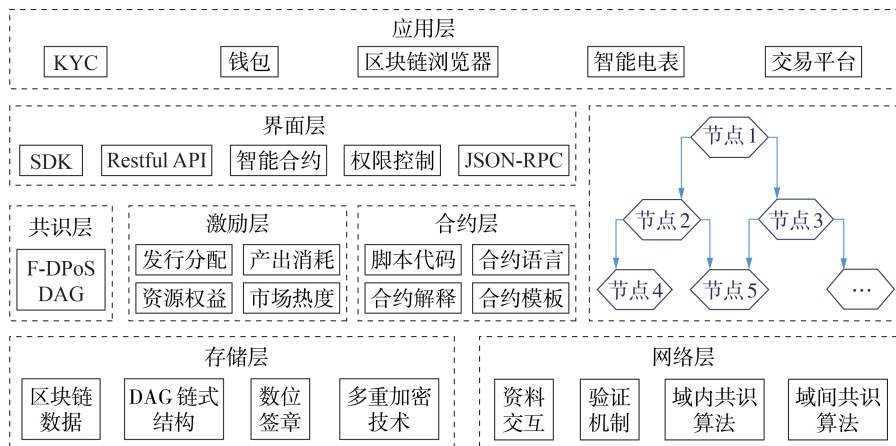


图4 基于区块链的分布式能源交易系统架构

Fig.4 Architecture of distributed energy transaction system based on blockchain

包含前一区块哈希等信息,且每笔交易均可追溯。

表 1 首笔交易的交易链区块信息

Table 1 Block information of transaction blockchain for first transaction

区块信息	数值
区块号	1
负荷需求 / kW	923.1478
$P_{gl}, P_w, P_{pv}, P_{ch} / \text{kW}$	635, 0, 288.1478, 0
$P'_{gl}, P'_w, P'_{pv}, P'_{ch} / \text{kW}$	1055, 0, 381.6744, 0
出售价 / [元·(kW·h) ⁻¹]	0.4
当前区块哈希	0x81b7E08F65Bdf5648606c89998A9CC8164397647

表 2 为首笔交易发生时公有链生成的区块信息。由表 2 可以看出,公有链区块信息中不包含每个分布式能源出力信息及负荷需求,仅对每笔交易信息的摘要部分进行记录,增强了网络的安全性和隐私性。

表 2 首笔交易的公有链区块信息

Table 2 Block information of public blockchain for first transaction

区块信息	数值
区块号	1
$P'_{gl}, P'_w, P'_{pv}, P'_{ch} / \text{kW}$	1055, 0, 381.6744, 0
出售价 / [元·(kW·h) ⁻¹]	0.4
当前区块哈希	0x81b7E08F65Bdf5648606c89998A9CC8164397647

3.2 交易吞吐量测试

为了测试本文所提基于 DAG+F-DPoS 共识机制的区块链的吞吐性能,本节首先基于以太坊官方开源 go-ethereum 代码进行测试。链上测试由 P2P 网络模块、F-DPoS 模块、DAG 模块、挖矿模块这 4 个模块组成。图 5 为改进后的 DAG+F-DPoS、以太坊、比特币在不同区块大小和宽度下的吞吐量对比。

通过观察测试结果可知,DAG+F-DPoS 共识机制下的区块链吞吐量与区块大小和区块宽度呈正相关,且始终优于比特币和以太坊下的吞吐量。当区块大小为 30 KByte、宽度为 20 时,DAG+F-DPoS 共识机制下的吞吐量分别为以太坊和比特币的 24 倍和 56 倍。同时,随着宽度的不断增加,DAG+F-DPoS 共识机制下的吞吐量出现波动,这是因为较大的宽度代表着更多的区块信息,导致需要更长的传播时间,从而降低了吞吐性能。

3.3 恶意交易验证速度测试

本实验设置 7 个验证节点来验证交易的合法性,规定交易的整个过程为从生成交易到将验证结

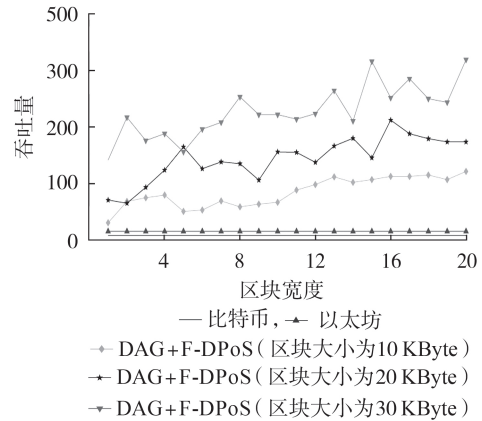


图 5 不同区块大小和宽度下 DAG+F-DPoS 共识机制的吞吐量

Fig.5 Throughput of DAG+F-DPoS consensus mechanism with different blocksizes and widths

果返回网络。含有不同比例恶意交易节点时 DAG+F-DPoS 共识机制下的吞吐量见图 6。

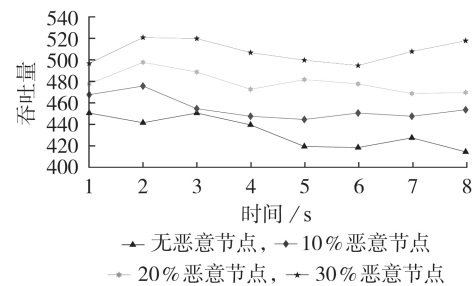


图 6 含有不同比例恶意节点时 DAG+F-DPoS 共识机制的吞吐量

Fig.6 Throughput of DAG+F-DPoS consensus mechanism with different proportions of malicious nodes

由图 6 可知,DAG+F-DPoS 共识机制下恶意节点所占比例越高,则模型的验证速度越快,能更快地排除恶意交易,具有良好的容错性。即使在存在大量恶意交易的情况下,该方法仍可以安全、高效地处理交易。

4 结语

在我国大力支持分布式能源发展的政策背景下,多种清洁能源、分布式储能装置大规模并网,参与到分布式能源交易市场中。分布式能源符合中国电力市场的发展需求和大方向,并且逐渐成为小型低压配电网发电侧的主力军,其发展速度之快、前景之广阔使得当前的分布式能源交易机制难以满足市场。本文考虑到分布式能源交易市场的特点与区块链技术完美的契合性,提出了一种更高效、更安全的共识算法,辅以合理的挖矿制度,构造了一个更合理的分布式能源交易生态。目前的能源区块链项目实际落地较少,还应该在解决眼下矛盾的同时加强项

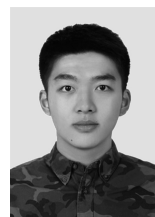
目的落地。

本文是将区块链技术应用于分布式能源交易领域的起步性研究,后续将深入研究能源区块链领域的痛点问题,建立更加成熟的区块链能源交易生态,希望对有关项目的发展有一定的参考作用。

参考文献:

- [1] 王蓓蓓,李雅超,赵盛楠,等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术[J]. 电力系统自动化,2019,43(14):53-64.
WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Shengnan, et al. Key technologies on blockchain based distributed energy transaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64.
- [2] 平健,严正,陈思捷,等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(24):7137-7145,7487.
PING Jian, YAN Zheng, CHEN Sijie, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7137-7145, 7487.
- [3] REYNA A, MARTÍN C, CHEN J, et al. On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities[J]. Future Generation Computer Systems, 2018, 88: 173-190.
- [4] 国家发改委,国家能源局. 关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL]. (2017-10-31)[2020-03-07]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.
- [5] LO3 Energy. The USA's first consumer energy transaction begins 'power to the people' revolution in New York[EB/OL]. (2016-04-12)[2020-03-07]. <https://lo3energy.com/usas-first-consumer-energy-transaction-begins-power-people-revolution-new-york/>.
- [6] 马天男,彭丽霖,杜英,等. 区块链技术下局部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.
- [7] 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.
- [8] 秦磊,孙文强,李整,等. 基于区块链和改进型拍卖算法的微电网电能交易方法[J/OL]. 电力自动化设备. (2020-04-21)[2020-05-26]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202006002>.
- [9] 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. Transaction system and key technologies of multi-energy system based on heterogeneous blockchain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 183-193.
- [10] BARANSKI M, MEYER L, FÜTTERER J, et al. Comparative study of neighbor communication approaches for distributed model predictive control in building energy systems[J]. Energy, 2019, 182: 840-851.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 秦磊,孙文强,朱有产,等. 微电网中基于区块链的电能交易方法[J/OL]. 电力自动化设备. (2020-04-21)[2020-05-25]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202005032>.
- [14] 陈启鑫,王克道,陈思捷,等. 面向分布式主体的可交易能源系统:体系架构、机制设计与关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(3):1-7,31.
CHEN Qixin, WANG Kedao, CHEN Sijie, et al. Transactive energy system for distributed agents: architecture, mechanism design and key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 1-7, 31.
- [15] 李彬,覃秋悦,祁兵,等. 基于区块链的分布式能源交易方案设计综述[J]. 电网技术,2019,43(3):961-972.
LI Bin, QIN Qiuyue, QI Bing, et al. Design of distributed energy trading scheme based on blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 961-972.
- [16] 袁勇,倪晓春,曾帅,等. 区块链共识算法的发展现状与展望[J]. 自动化学报,2018,44(11):2011-2022.
YUAN Yong, NI Xiaochun, ZENG Shuai, et al. Blockchain consensus algorithms: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 2011-2022.
- [17] 窦晓波,曹水晶,刘之涵,等. 弱中心化的配电网市场交易机制、模型与技术实现[J]. 电力系统自动化,2019,43(12):104-120.
DOU Xiaobo, CAO Shuijing, LIU Zhihan, et al. Trading mechanism, model and technical realization of weakly-centralized distribution network market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 104-120.
- [18] ZHAO L R, YU J S. Evaluating DAG-based blockchains for IoT[C]//2019 18th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications / 13th IEEE International Conference on Big Data Science and Engineering (TrustCom/BigDataSE). Rotorua, New Zealand: IEEE, 2019: 507-513.
- [19] 平健,陈思捷,严正. 适用于电力系统凸优化场景的能源区块链底层技术[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1):108-116,378.
PING Jian, CHEN Sijie, YAN Zheng. A novel energy blockchain technology for convex optimization scenarios in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 108-116, 378.
- [20] 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.

作者简介:



徐嘉辉

徐嘉辉(1997—),男,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为区块链技术、智能电网优化运行;

马立新(1960—),男,陕西安康人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统可靠性与优化运行、区块链技术、智能电网与智能科学等(E-mail: ma_eeepsi@usst.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

(下转第30页 continued on page 30)

Two-stage robust optimal scheduling of virtual power plant based on energy blockchain

REN Jianwen, ZHANG Qingqing

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: With the increasing proportion of renewable energy resource access, the architecture, control method and operation mode of the power system begin to change. The introduction of blockchain technology into energy internet system to form an energy blockchain network is conducive to solving the information security and other issues. The blockchain is introduced into the scheduling and operation mechanism of VPP (Virtual Power Plant). Aiming at the power system model participating with new energies, the practical Byzantine fault tolerance algorithm consensus mechanism suitable for VPP is proposed to realize the semi-centralization two-stage robust optimal scheduling model under blockchain, which remains the guiding role of VPP control center. In the first stage, the pre-scheduling scheme is solved. In the second stage, the blockchain technology is used to obtain historical data, and a data-driven wind power output uncertain set is established to solve the regulation scheme. This constraint set can exclude some extreme scenarios to reduce the conservatism of the model. In the optimization process, the verification function of blockchain consensus mechanism is used to discard the information tampered by malicious nodes and enhance the system's fault tolerance capability. The effectiveness of the proposed method is verified by a simulation example.

Key words: energy blockchain network; virtual power plant; practical Byzantine fault tolerance algorithm; consensus mechanism; data-driven; robust optimization; two-stage scheduling

(上接第22页 continued from page 22)

Application of blockchain technology in distributed energy transaction

XU Jiahui, MA Lixin

(College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The autonomous transaction of distributed energy nearby has become the future development trend of China's distribution network. However, the output of distributed energy has the characteristics of uncertainty and individual profitability, and the transaction has many participants, small single transaction volume and high concurrency, which makes the security, fairness and effectiveness of the transaction process become prominent issues. Blockchain technology has the characteristics of decentralization, security, transparency and non-tamper, which is highly compatible with the demands of distributed energy transaction. To this end, firstly, the advantages and disadvantages of the electricity market transaction system based on existing blockchain technology are analyzed, and the blockchain technology of F-DPoS (Fair-Delegated Proof of Stake) consensus mechanism based on the DAG (Directed Acyclic Graph) topology is proposed. The election fraud under the DPoS mechanism and the well-known node issues in DAG are improved. Supplementing by fairness token reward and refresh mechanism, the market entities are promoted to maintain the system security in the way of economic incentives. Then, a blockchain distributed energy transaction management framework based on DAG+F-DPoS consensus mechanism is constructed to ensure efficient, fast and safe transaction throughput in the face of practical scenarios with high concurrency, high flow and high availability. The high traceability, high efficiency and security of the proposed method are verified by case simulation.

Key words: blockchain; directed acyclic graph; F-DPoS; consensus mechanism; electricity market; distributed energy transaction