

一种适用于分布式光伏交易的区块链共识机制设计

刘航宇^{1,2*}, 何乐天³, 于韶源², 孙瑜³, 耿建², 赵晋泉¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省 南京市 210098;

2. 中国电力科学研究院有限公司南京分院, 江苏省 南京市 210003;

3. 浙江电力交易中心有限公司, 浙江省 杭州市 310020)

Blockchain Consensus Mechanism for Distributed PV Trading

LIU Hangyu^{1,2*}, HE Letian³, YU Shaoyuan², SUN Yu³, GENG Jian², ZHAO Jinquan¹

(1. College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China;

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China;

3. Zhejiang Power Exchange Center Co., Ltd., Hangzhou 310020, Zhejiang Province, China)

Abstract: At present, distributed power-generation trading is a typical application of blockchain technology. However, a suitable consensus mechanism for the same is yet to be designed. The drawbacks of mainstream blockchain-consensus mechanisms include high power consumption and low consensus speed. To address this concern, this paper presents a blockchain-consensus mechanism suitable for distributed PV trading. To this end, several mainstream consensus mechanisms are compared, and the delegated proof-of-stake (DPOS) mechanism is deemed suitable for distributed PV trading. Subsequently, based on the analysis of the type of distributed PV power generation, different trading cycles are formulated and are combined with the DPOS mechanism, and a consensus method based on the node-credit value is proposed. The proposed method provides a specific consensus process and algorithm based on five factors—node-trading cycle, capacity, quality, credit loss, and credit gain. Finally, the application of the proposed method to a 10-node example demonstrates that nodes with a short trading period, large capacity, and small deviation qualify as probable agent nodes for the entire system. Meanwhile, the credit loss and gain values for each also have an impact on the results obtained.

Keywords: distributed PV trading; blockchain; consensus mechanism; credit value

摘要: 分布式发电交易是区块链技术的一个典型应用场

基金项目: 国网浙江省电力有限公司管理咨询项目“基于区块链技术的分布式电源交易支撑技术研究”。

Management Consulting Project of Zhejiang Electric Power Co., Ltd. “Research on Distributed Power Trading Support Technology Based on Blockchain Technology”.

景, 缺乏合适的共识机制是制约其应用落地的重要原因之一。主流区块链共识机制算力消耗大、共识速度慢。针对该问题, 设计了一种适用于分布式光伏交易的区块链共识机制。首先通过对比得出DPOS (delegated proof of stake) 共识机制比较适合分布式光伏交易。然后, 研究不同类型分布式光伏发电的交易周期, 结合DPOS共识机制, 考虑节点的交易频次、容量、质量、信用损耗、信用增益5个因素, 提出一种基于节点信用值的共识方法。最后, 通过10节点的算例表明交易周期短、容量大、偏差小的节点成为整个系统代理节点的概率较大, 同时节点的信用损耗和增益也对结果有一定影响。

关键词: 分布式光伏交易; 区块链; 共识机制设计; 信用值

0 引言

近年来, 以光伏为代表的分布式清洁能源因显著的社会与经济效益得到了迅猛发展^[1], 不但可为用户直接提供清洁电能, 而且可提高配电网弹性^[2-3]。与此同时, 国家也在全面推进分布式发电市场化交易。2017年11月, 国家发改委和能源局联合发布了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》, 表明除了“自发自用, 余电上网”的项目可以进行交易以外, 符合规定条件并就近消纳的项目都可以开展交易^[4]。2019年5月, 国家发改委和能源局联合发布了首批26个分布式发电市场化交易试点^[5]。

分布式光伏发电容量小但数量庞大, 很难采用传统电力交易模式^[6], 如何解决海量的交易成为难题之

一。区块链技术去中心化、可追溯、自治性、信息不可篡改、公开透明等特性满足分布式电力交易的需求^[7]，用户可在电网物理限制之内自由选择交易对象，所有交易都会得到验证并记录，能够大大减轻传统电力交易的负担。

2016年初，全球第一个能源区块链项目TransActive Grid在纽约推出，该项目采用的技术源于以太坊区块链，采用工作量证明共识机制（proof of work, POW）^[8]。国内虽然没有该类项目落地运行，但已有许多文献探讨区块链在分布式发电交易中的应用，其中部分涉及到共识机制。文献[9]利用POW和权益证明机制（proof of stake, POS）编写智能合约实现电力市场交易结算。文献[10]提出一种改进的权益授权证明机制（delegated proof of stake, DPOS），实现快速剔除异常节点以提高系统安全性。文献[11]将DPOS机制和碳排放约束结合，鼓励用户节能减排。文献[12]采用MPT（Merkle Patricia tree）共识机制实现光伏发电交易在节点间的验证，加快了系统记账时间。文献[13]利用以太坊智能合约实现电动汽车充电站充电权交易，以太坊使用POW机制。

目前成熟的区块链交易平台几乎都采用POW机制，虽然运行稳固，但共识速度慢，出块周期和交易用时长^[14]。对于数量庞大的分布式光伏交易来说，系统同步速度慢，交易效率低。本文分析典型区块链共识机制原理，结合分布式光伏发电交易的特点，提出一种适用于分布式光伏发电交易的共识机制，并搭建原型系统进行模拟验证。

1 主流区块链共识机制分析与比较

区块链共识机制保证每一笔交易在所有节点上的一致性和正确性^[15]。除密码学技术外，共识机制是区块链的核心技术，是保障区块链系统稳定运行的关键^[16]。

1.1 POW共识机制

POW首次出现在比特币系统中，是其安全稳固运行的核心。POW根据节点在网络中完成的工作量来决定其获得打包区块权力的概率。每个节点都可以通过求解一道数学题来参与竞争区块的打包权，这个过程也称为“挖矿”。获得打包权的节点在产生区块后要向全网广播，其余节点进行验证。POW共识机制能够解决在完全开放、自由网络中的数据一致性问题^[17]，但

耗费算力大，出块时间在分钟级，难以满足商业需求。

1.2 POS共识机制

POS共识机制的核心思想是获得区块打包权的难度与该节点所持的代币和天数的乘积呈反比。虽然POS共识机制在一定程度上减少了计算带来的资源损耗，但仍然没有摆脱“挖矿”的本质，生成区块的时间仍然较长，无法应用于对交易吞吐量要求高的业务^[18]。

1.3 DPOS共识机制

DPOS共识机制与以上2种共识机制有本质区别，不再依托“挖矿”来竞争区块的打包权，而是通过投票的方式选举代理节点^[19]。任何拥有代币的节点都有投票权，投票产生若干代理节点，代理节点轮流打包区块。该共识机制不需消耗大量算力，出块速度可达秒级^[20]。但是，系统选取出来的代理节点若是不作为节点甚至恶性节点，则会对系统造成严重破坏，所以需根据实际情况建立一套完整、严格的选取方法。

1.4 几种共识机制的比较分析

表1比较了3种共识机制的优缺点。DPOS将节点代理者的利益与全系统紧密结合。代理节点交易电量、交易频繁，在全网中信用值最高，系统出现问题对其不利影响也最大。DPOS减少了参与记账的节点，从而减少了发生区块链分叉的概率^[21]。

表1 三种共识机制比较
Table 1 Comparison of three consensus mechanisms

共识机制	POW	POS	DPOS
性能效率	低	较高	高
去中心化程度	强	强	弱
最大允许作恶节点数	50%	50%	50%
是否需要代币	是	是	是
安全性威胁	算力集中	候选人作弊	候选人作弊
资源消耗	高	中	低
可监管性	弱	弱	弱

分布式光伏参与用户数量大、交易频繁，对交易系统同步性能要求高，而基于POW、POS的交易系统同步通常需要数十秒甚至数分钟，不能满足海量交易的需求。因此，选择DPOS作为分布式光伏交易的区块链共识机制。

2 分布式光伏交易的区块链共识机制设计

2.1 分布式光伏发电用户分类和交易周期分析

分布式光伏发展的前期阶段主要以建设大型光伏电站为主,随着技术的进步,发电成本大幅下降,逐渐出现以家庭、村镇为单位的分布式光伏发电^[22-23]。本文主要考虑负荷侧的光伏用户,按照装机规模及发电单位可分为以下3类。

1) 以家庭为单位的屋顶光伏,利用城市楼宇屋顶或乡村庭院空地安装少量光伏发电组件。该类装机容量较小,通常自发自用,余电可以卖给周围用户。该类应尽可能节约交易成本,在收回成本的基础上谋取一定利益,将一个季度作为其交易周期。

2) 单户集群光伏发电,通常在农村利用田间地头、鱼塘等成片空地安装光伏发电组件。此类装机容量有所提升,发电量除少量自用外,大部分送入中压配电网。为了使其尽可能获利,应缩短交易周期,虽然增加了交易成本,但可避免电能浪费,将一个月作为其交易周期。

3) 多户集群社区光伏发电,一般由村镇集中开发、采用合作社方式统一运营,整体容量较大,以盈利为主要目的,通常还配有储能来平衡光伏出力峰谷差,一般也配有专业的电力交易人员。缩短交易周期可使预估发电曲线更准确,交易电量也可快速调整,从而获取更多收益,因此采用一周作为其交易周期。

2.2 基于节点信用值的DPOS共识机制设计

2.2.1 代理节点的选择

DPOS共识机制的本质是选择代理节点的过程,并打包所有节点的交易信息,生成新区块。竞争代理权会增加工作难度和负担,本文认为购电用户只想在规定时间内购电,不会参与竞争成为代理节点。对代理节点有如下要求。

1) 代理节点地位平等,依次具有记账权。

2) 代理节点一旦不作为、胡作为(提供的计算机宕机、不稳定或者利用权力作恶),将立刻被取消代理资格,由候补节点替代其工作。

3) 至少有一个监管节点,负责监管整个系统的事务,避免不良情况发生,交易中心或电网公司可作为监管节点。

4) 规定系统有一个保底节点。光伏发电随机性和不可预测性较大,当计划交易值与实际交易量发生较大偏差时,输电运营商或电网公司可作为保底节点。

5) 规定参与交易的节点需支付一定费用给交易平台,交易平台建立奖金池,代理节点完成工作后,可获取部分奖励,有利于促进其提高自身的信用值。

2.2.2 基于节点信用值的共识机制设计

系统根据共识值选择代理节点,共识值越大越可能被选为代理节点。共识值 G 包括信用值 C_{cre} 和投票值 V 两部分。

$$G = \mu C_{cre} + \xi V \quad (1)$$

式中: μ 、 ξ 为权重系数,且 $\mu + \xi = 1$,本文取 $\mu = \xi = 0.5$ 。投票值即投票选取代理节点的行为中,各节点所得票数。下面重点讨论信用值。

系统维护着一张动态更新的节点信用值属性表,该表包含5个要素:交易频次值 F 、交易容量值 P 、交易质量值 D 、信用损耗 ΔC_{-} 和信用增益 ΔC_{+} ,5个要素均取值 $[0, 10]$,无单位量纲。节点信用值可表示为

$$C_{cre} = \alpha F + \beta P + \gamma D + \Delta C_{+} - \Delta C_{-} \quad (2)$$

式中: α 、 β 、 γ 为权重系数, $\alpha + \beta + \gamma = 1$,为鼓励用户减小交易偏差、提高交易质量,本文取 $\alpha = 0.3$, $\beta = 0.3$, $\gamma = 0.4$ 。

交易质量值定义为

$$D = k \left(1 - \frac{|E_{real} - E_{plan}|}{E_{plan}} \right) \quad (3)$$

式中: E_{real} 为实际交易电能,取自用户端电能计量表; E_{plan} 为上报到交易平台的计划交易电能; k 为比例系数,取值为10。实际交易电能越接近计划交易电能,交易偏差越小, D 值越大。

信用损耗 ΔC_{-} 指某个用户若长时间都没有成为代理节点,其信用值会随时间推移而降低,表明其不愿意、不主动为交易系统服务或由于其恶劣的行为导致系统剥夺其成为代理节点的权力。

$$\Delta C_{-} = \begin{cases} 0, & t \leq T_a \\ m(t / T_a), & t > T_a \end{cases} \quad (m > 0) \quad (4)$$

式中: t 表示某节点两次投票的间隔时间; T_a 表示交易周期; m 表示信用值消耗的速率。

信用增益值 ΔC_{+} 指某节点在交易周期内积极参加代理节点的竞争并被选中,同时能够完成打包所有交易信息的任务,其信用值会增加,并在下一阶段竞选过程中更具优势。

$$\Delta C_{+} = \begin{cases} 0, & n < N_{tra} \\ a, & n = N_{tra} \end{cases} \quad (a > 0) \quad (5)$$

式中: n 为交易周期内代理节点打包的交易数目; N_{tra} 为交易周期内所有的交易数目; a 为信用增益值。

基于信用值的共识机制工作流程如图1所示。图中51%验证机制^[24]主要利用交易账户的公私钥对，制造区块、验证区块有效性、数据入链等过程与传统区块链共识机制一致。

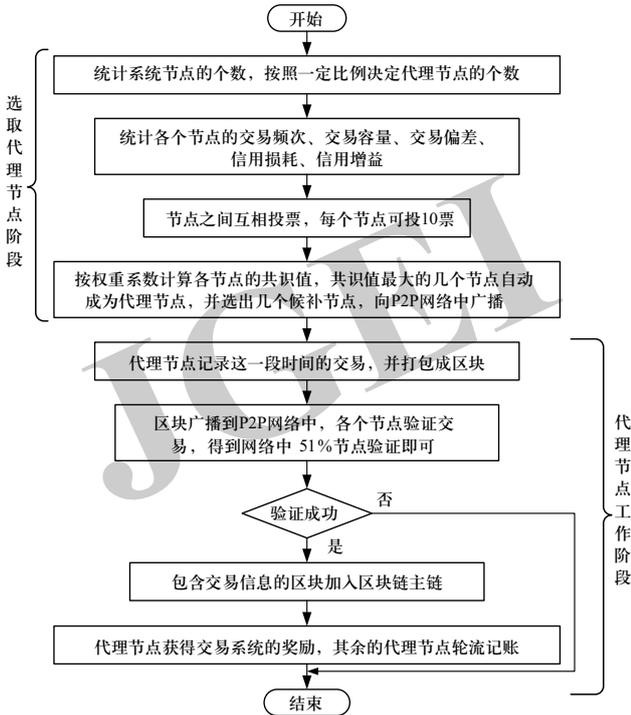


图1 基于信用值的共识机制工作流程

Fig. 1 Flowchart of consensus mechanism based on credit value

3 实验分析

本文搭建原型系统实现基于DPOS共识机制的代理节点选取。假设10个节点参与交易并竞争记账，每个节点都有投票权且可投10票，用随机函数模拟节点投票，选出3个节点作为代理节点。程序运行环境为i7八代处理器，4GB内存，Window10操作系统，Java运行环境JRE（Java runtime environment）。

通过3次实验验证本文提出的共识机制，每次实验程序运行1000次，运行结果为各节点被选中的次数。第1次实验不考虑信用损耗和增益，两者属性值为0；第2次实验提高了5、6、7节点的交易质量和交易容量；第3次实验在第1次实验的基础上，考虑节点的信用损耗和增益。10个节点的属性值如表2所示。1~4节点交易容量小、周期长，代表小容量分布式光伏发电，5~7节点代表中容量分布式光伏发电，8~10节点代表大容量分布式光伏发电。

表2 10个节点的属性表
Table 2 Parameters of the 10 nodes

节点编号	交易频次	交易质量	交易容量	信用损耗	信用增益
1	4	6	2	1	0
2	4	8	2	1	0
3	4	5	3	1	0
4	4	7	3	1	0
5	6	6	4	0	0
6	6	9	5	0	1
7	6	8	6	0	0
8	8	7	7	0	1
9	8	6	8	0	1
10	8	8	8	0	0

3次实验运行结果如图2所示。第1次实验中8、9、10节点被选中次数最多，5、6、7节点次之，1~4节点几乎为0。8、9、10节点交易容量大、交易频繁，发电预测值相对精准，交易偏差相对小。小容量发电商多是个体用户，对盈利没有强烈要求，打包区块的硬件设施及专业程度不足，几乎不可能成为代理节点。

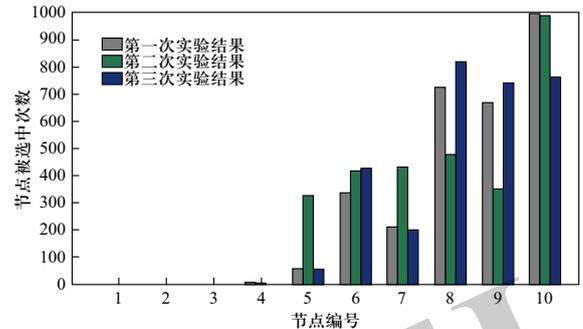


图2 三次实验结果对比

Fig. 2 Comparison of three experiment results

第2次实验假设5、6、7节点也想成为代理节点，其属性值如表3所示。根据图2，5、6、7节点被选中次数相对第1次实验明显增加，反映出提高发电容量、减小发电偏差可增加共识值，加大节点被选中的概率。

表3 第2次实验5、6、7节点的属性值

Table 3 Parameters of nodes 5, 6, and 7 in the second experiment

节点编号	交易频次	交易质量	交易容量
5	6	8	7
6	6	9	6
7	6	9	6

第3次实验假设6、8、9节点在上一阶段交易中有一定信用增益,无信用损耗,其被选中的次数相对第1次实验明显增大;假设10节点在上一阶段交易中未能被选为代理节点,信用增益为0,在本次交易中被选中次数相对第1次实验明显下降。

某次交易花费的时间主要取决于选取代理节点的用时,即“共识的时间”。50次共识程序用时如图3所示,最短用时0.9 s,最长用时1.09 s,有效提高了交易效率,使其在具体交易中有实用价值。

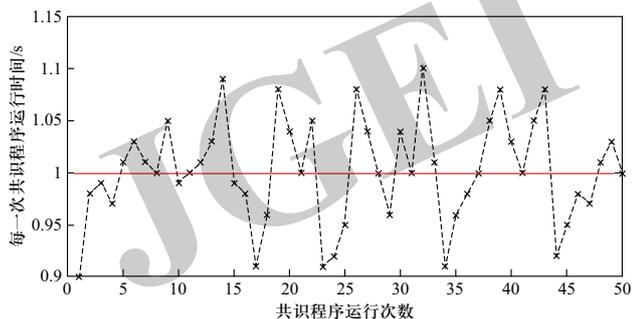


图3 50次共识程序运行时间统计

Fig. 3 Statistical graph of 50 consensus program running time

4 结论

本文针对分布式光伏发电交易,提出了一种基于节点信用值的共识机制,综合考虑了节点的交易频次、容量、质量、信用损耗和增益5个因素,通过原型系统设计了10节点的算例,验证了交易周期短、容量大、偏差小的节点成为代理节点的概率更大,同时也指出节点的信用损耗和增益对选取结果也有一定影响。后续研究可将此共识机制应用于具体的交易平台。

参考文献

- [1] 章激扬,李达,杨苹,等.光伏发电发展趋势分析[J].可再生能源,2014,32(2):127-132.
ZHANG Jiyang, LI Da, YANG Ping, et al. Development trend analysis of photovoltaic power generation[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(2): 127-132(in Chinese).
- [2] 卞艺衡,别朝红,黄格超,等.弹性配电网分布式可再生能源电源最优配置模型[J].全球能源互联网,2020,3(3):213-221.
BIAN Yiheng, BIE Zhaohong, HUANG Gechao, et al. Optimal renewable energy distributed generators placement for resilient distribution system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 213-221(in Chinese).
- [3] 刘飞,汤亮亮,邓鹤鸣,等.计及分布式电源的城市重要用户应急电源优化配置[J].全球能源互联网,2018,1(5):581-588.
LIU Fei, TANG Liangliang, DENG Heming, et al. Optimal allocation of emergency power supply of urban important loads considering distributed generation[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 581-588(in Chinese).
- [4] 国家发展和改革委员会,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)[2020-10].
http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.
- [5] 国家发展和改革委员会,国家能源局.关于公布2019年第一批风电、光伏发电平价上网项目的通知[EB/OL].(2019-05-20)[2020-10].
http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201905/t20190522_3664.htm.
- [6] 耿建,李亚平,陈庆祺,等.分布式电源市场交易的探讨[C]//中国电机工程学会电力市场专业委员会2018年学术年会暨全国电力交易机构联盟论坛论文集.上海,2018:54-57.
- [7] 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).
- [8] 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.
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] 祁兵,夏琰,李彬,等.基于区块链激励机制的光伏交易机制设计[J].电力系统自动化,2019,43(9):132-139.
QI Bing, XIA Yan, LI Bin, et al. Photovoltaic trading mechanism design based on blockchain-based incentive mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 132-139(in Chinese).
- [13] 王浩然,陈思捷,严正,等.基于区块链的电动汽车充电站充电权交易:机制、模型和方法[J].中国电机工程学报,

- 2020, 40(2): 425-436.
WANG Haoran, CHEN Sijie, YAN Zheng, et al. Blockchain-enabled charging right trading among EV charging stations: mechanism, model, and method[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 425-436(in Chinese).
- [14] 周鑫, 邓莉荣, 王彬, 等. 基于联盟链的去中心化能源交易系统[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6): 556-565.
ZHOU Xin, DENG Lirong, WANG Bin, et al. Decentralized energy trading system based on consortium blockchain[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 556-565(in Chinese).
- [15] 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).
- [16] WANG Y H, CAI S B, LIN C L, et al. Study of blockchains's consensus mechanism based on credit[J]. IEEE Access, 2019, 7: 10224-10231.
- [17] 戴安博, 陈恭亮. POW区块链共识算法分析与展望[J]. 通信技术, 2019, 52(12): 2839-2845.
DAI Anbo, CHEN Gongliang. Analysis and prospect of POW blockchain consensus algorithm[J]. Communications Technology, 2019, 52(12): 2839-2845(in Chinese).
- [18] NGUYEN C T, HOANG D T, NGUYEN D N, et al. Proof-of-stake consensus mechanisms for future blockchain networks: fundamentals, applications and opportunities[J]. IEEE Access, 2019, 7: 85727-85745.
- [19] 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(in Chinese).
- [20] 武岳, 李军祥. 区块链共识算法演进过程[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(7): 2097-2103.
WU Yue, LI Junxiang. Evolution process of blockchain consensus algorithm[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(7): 2097-2103(in Chinese).
- [21] 王健, 陈恭亮. 比特币区块链分叉研究[J]. 通信技术, 2018, 51(1): 149-155.
WANG Jian, CHEN Gongliang. Overview on blockchain fork in bitcoin[J]. Communications Technology, 2018, 51(1): 149-155(in Chinese).
- [22] 马溪原, 郭晓斌, 周长城, 等. 电网公司投资分布式光伏发电系统的典型运营模式分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 52-59.
MA Xiyuan, GUO Xiaobin, ZHOU Changcheng, et al. Typical operation mode analysis for distributed photovoltaic generation system invested by power grid corporation[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(3): 52-59(in Chinese).
- [23] 林俐, 许冰倩, 王皓怀. 典型分布式发电市场化交易机制分析与建议[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 1-8.
LIN Li, XU Bingqian, WANG Haohuai. Analysis and recommendations of typical market-based distributed generation trading mechanisms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 1-8(in Chinese).
- [24] 蔡晓晴, 邓尧, 张亮, 等. 区块链原理及其核心技术[J/OL]. 计算机学报, (2019:1-51) [2020-10-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1826.tp.20191118.1126.002.html>.

收稿日期: 2020-05-31; 修回日期: 2020-10-26。

作者简介:

刘航宇 (1995), 男, 硕士, 研究方向为电力市场、区块链相关技术。通信作者, E-mail: lhyhohai@163.com。

何乐天 (1988), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力市场、监控运营等。

于韶源 (1995), 女, 工程师, 研究方向为电力市场、区块链等。



刘航宇

(责任编辑 张宇)