

Research Progress on Blockchain Technology Applied to Energy System

Wenjun Cai, Yan Zhu*

Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan
Email: zhuyankmust@foxmail.com

Received: Mar. 22nd, 2018; accepted: May 8th, 2018; published: May 15th, 2018

Abstract

The concept of the energy internet was put forward and gradually became a focus in “the Third Industrial Revolution”. Through energy internet, energy management will be changed from traditional centralized management to decentralized one, and the power network can be shared in the whole word. The characteristics of decentralization, transparency, contract execution automation, traceability, and openness of blockchain technology are applicable to the development and application of energy internet. This article summarizes the relevant knowledge of blockchain technology and the current application in various aspects of energy systems. Finally, some existing problems of blockchain applications in energy systems are discussed.

Keywords

Energy Internet, Blockchain, Decentralization

应用于能源系统的区块链技术研究进展

蔡文军, 朱艳*

昆明理工大学, 云南 昆明
Email: zhuyankmust@foxmail.com

收稿日期: 2018年3月22日; 录用日期: 2018年5月8日; 发布日期: 2018年5月15日

摘要

能源互联网的概念在“第三次工业革命”中提出并逐渐成为焦点, 它把能源从传统的集中式管理转变为分散式管理, 并将全球的电网变为能源共享网络。区块链技术的去中心化、透明化、合约执行自动化、

*通讯作者。

可追溯性、开放性等特点正好适用于能源互联网的开发运用中。本文对区块链技术相关知识进行概述, 并对目前区块链在能源系统各方面的应用进展进行综述, 最后对区块链技术在能源系统应用中存在的问题进行了简要讨论。

关键词

能源互联网, 区块链, 去中心化

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自“能源互联网”这一概念的提出, 各国就对它十分关注。在文福拴等所撰写的《从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架》[1]中概括出能源互联网是信息技术与可再生能源相结合的产品, 它为有效地利用可再生能源问题提供了可行的解决方案。能源互联网具有可再生性、分布式化、互联性、开放性、智能性的特点[2] [3]。正因为这些特点, 分布式能源更多的接入到能源互联网中, 这使得大量的消费者成了产消者[4]。大量产消者的接入也将会产生新的商业模式, 然而自由双边交易[5]的形成将给能源互联网的运行带来了压力, 因此需要引入新技术来支撑能源互联网的运行[6] [7]。

区块链技术作为一种分布式数据库[9], 具有改变人与人合作模式和商业合作模式的巨大潜力, 是“创造信任”的技术。区块链技术运用于能源互联网将大幅度的提高能源互联网的效率, 实现真正的自组织、自调节的能源系统[12] [13]。基于密码学原理的区块链能解决交易过程的所有权确认问题, 保证交易系统对交换活动的传输、记录、存储结果都是透明化的、可信的。区块链的记录信息一旦生成将会永久记录, 且无法篡改[10]。区块链被认为是继大型计算机、个人电脑、互联网、移动/社交网络之后计算范式的第5次颠覆式创新, 是人类信用进化史上继血缘信用、贵金属信用、央行货币信用之后的第4个里程碑[11]。因此, 区块链技术作为一种新兴的数据库技术, 它的特性与能源互联网中的理念相符合, 可促进信息与物理系统的进一步融合, 促进多形式能源与各参与主体的协同, 实现交易的低成本化和多元化。本文首先简要介绍了区块链技术的相关知识, 然后综述了区块链在能源系统的网络数据安全、系统调度效率、处理能力、交易效率、需求响应等方面的研究应用, 并对区块链在能源系统应用中存在的问题进行了简要讨论。

2. 区块链概述

2.1. 定义和原理

中本聪(化名)在2008年10月的《Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System》[8]中并没有明确提出区块链技术的定义和概念, 在其中提出了一种用于记录比特币交易账目历史的数据结构。《中国区块链技术和应用发展白皮书(2016)》[14]中提出了区块链是一种去中心化、公开透明、用于储存交易信息的数据库, 可应用于分布式数据存储、点对点传输、共识机制、加密算法等计算机技术领域。在文福拴等所撰写的《能源系统中的区块链: 概念、应用与展望》[11]中给出这样的定义: 区块链技术是基于时间戳的“区块 + 链式”数据结构、利用分布式节点共识算法来添加和更新数据、利用密码学方法保证数据传

输和访问的安全、利用由自动化脚本代码组成的智能合约来编程和操作数据的一种全新分布式基础架构与计算范式。

区块链的基本原理主要包括三个概念：交易、区块、链。交易：一次对账本的操作，导致账本状态的一次改变，如添加一条转账记录。区块：记录一段时间发生的所有交易和状态结果，是对当前的账本状态的一次共识。链：由区块按照发生顺序串联而成，是整个账本状态变化的日志记录。如果把区块链当做一个状态机，则每次的交易就是改变一次状态，而每次共识生成的区块，就是参与者对于区块中交易导致状态变化的结果进行确认。

在实现上，这个分布式的数据记录账本只允许添加，不允许删除。账本底层的基本结构就是一个线性的链表，链表由一个个“区块”串联组成(如图 1)，后继区块记录前面的区块的哈希值(hash)。新的交易数据想要加入就得放到一个新的区块中，然后根据计算哈希值的方式快速检验出这个区块是否合法。任意维护节点都可以提议一个新的合法区块，但是必须要经过一定的共识机制来对最终的选择区块达成一致。

2.2. 区块链框架

关于区块链的框架已经有很多的学者和专家进行过阐述，袁勇等所撰写的《区块链技术发展现状与展望》[15]中就很详细的将区块链系统划分为六层结构：数据层、网络层、共识层、激励层、合约层和应用层(如图 2)。数据层在最底层，封装了数据区块以及相关的数据加密和时间戳等技术；网络层封装了

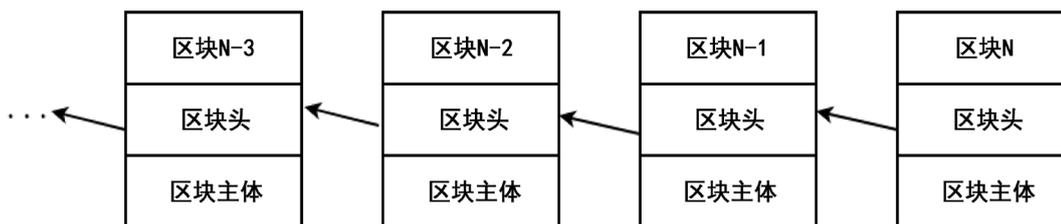


Figure 1. Blockchain structure diagram
图 1. 区块链结构示意图

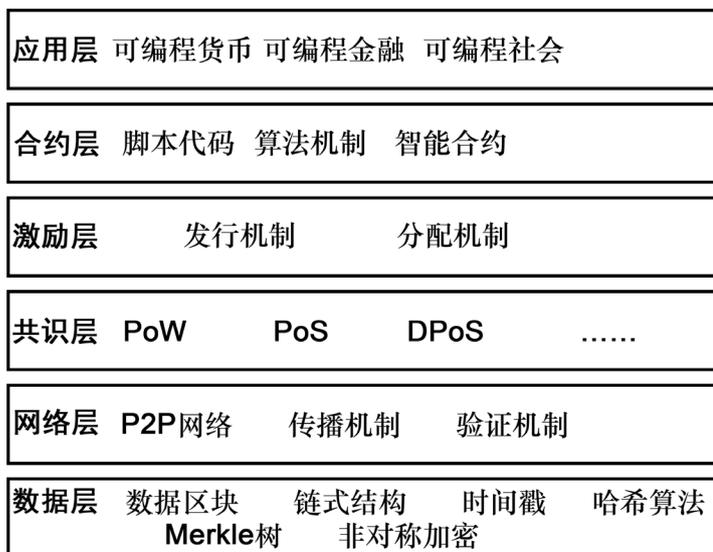


Figure 2. Blockchain framework diagram [15]
图 2. 区块链框架图[15]

P2P 网络、数据传播机制和验证机制; 共识层主要封装了网络节点的各种共识算法, 如: PoW、PoS、DPoS……; 激励层包含了发行机制和分配机制等, 把经济因素集成到区块链技术体系中来; 合约层封装了各种脚本代码, 算法和智能合约, 是区块链技术的编程特性的基础; 应用层封装了区块链的各种应用场景和案例。

2.3. 区块链的特点

基于区块链数据结构的特殊性, 区块链具有 4 个主要的特点[16] [17]:

1) 去中心化: 整个网络没有强制性的控制中心, 网络内所有节点的地位对等, 具备的权利与义务也没有区别。区块链数据之间的验证、记账、储存、维护和传输等过程均基于分布式系统的结构, 采用纯数学方法而不是中心机构来建立分布式节点间的信任关系, 从而形成去中心化的可信任的分布式系统。

图 3 给出了中心化和去中心化的结构示意图。

2) 透明化: 除了用户的私人信息被加密不可访问外, 用户可以通过相关数据接口访问区块链的任何数据信息而不受限制, 整个系统的数据信息高度透明。大量的区块链程序是开源的, 数据和规则在全网所有节点均可查询。

3) 合约执行自动化: 利用区块链设定一系列带有软件代码的智能合约, 并在智能合约中对每一方应履行的义务及合约制定的判定条件进行明确规定, 可以让区块链系统实现对合约执行条件进行自动判断。如果满足所有判定条件, 则区块链系统可以自动强制执行合约条款。这一特点就能满足去中心化的监督, 使合约自动执行。

4) 可追溯性: 代表被区块链记录的数据信息会被永久储存。同时, 区块链系统中所有交易信息、传递路线都会被完整记录, 而且所有被区块链系统记录和存储的数据信息都无法被摧毁或篡改。这不仅保证了数据信息的准确性, 也方便对每笔交易进行追溯, 对提高交易监管效率和质量有很大帮助。

2.4. 区块链的演变

到目前为止, 区块链技术已经经历了四个发展阶段, 包括技术起源, 区块链 1.0, 区块链 2.0 和区块链 3.0, 如图 4 所示。区块链的技术起源于它所产生的土壤——互联网技术的发展和云计算、大数据的兴起。区块链 1.0 是数字货币阶段, 如比特币。区块链 2.0 指数字资产与智能合约, 是当前研究热点, 其中智能合约是一组计算机程序, 是区块链的重要特性, 是可编程能源交易的技术基础, 具有广阔应用前景。区块链 3.0 指可编程社会(平行社会), 使去中心化的自治社会成为现实[12]。

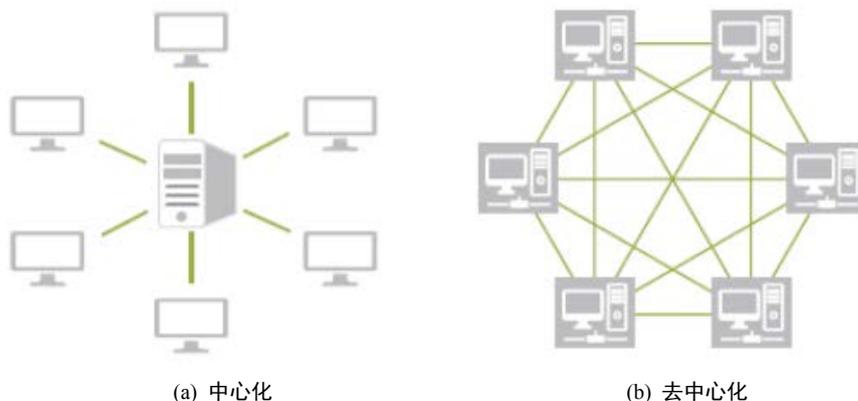


Figure 3. Schematic diagram of the centralization and decentralization [11]

图 3. 中心化和去中心化的结构示意图[11]

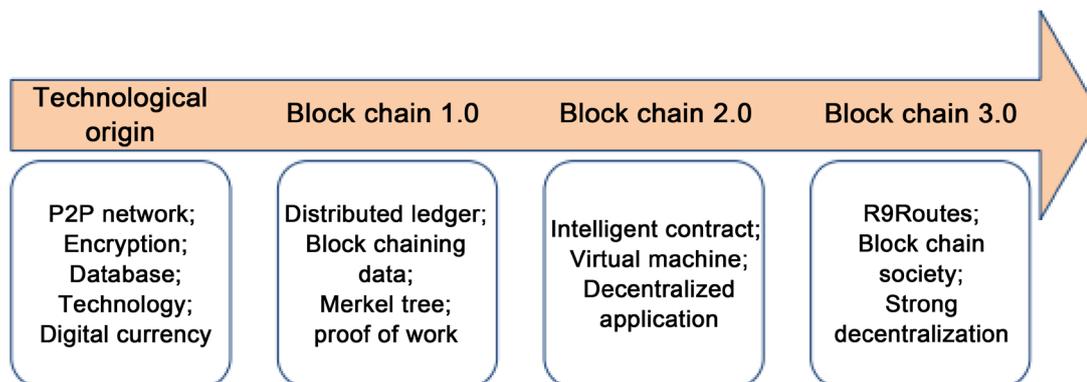


Figure 4. Evolution of blockchain technology [18]

图 4. 区块链技术的演变途径[18]

2.5. 区块链与能源系统之间的联系

现在的能源系统主要是分布式能源系统,分布式能源系统的能源生产和消费结构是典型的“无中心”、多节点状况。鉴于此,分布式能源运营难以简单套用现有能源运营模式,需要利用新的技术进行创新。区块链技术与能源系统之间存在一定的相似性关系:如资源分散,多能源合作自主化,市场化等,这使得能源系统与区块链技术不谋而合。

3. 能源领域的区块链应用进展

区块链在能源领域的应用已经开始了初步的探索研究,在能源系统中的最新应用大致有如下几个方面:

1) 能源系统的网络数据安全问题:网络数据的安全对于企业内部及企业间来说至关重要,2017年王继业等提出了基于区块链的数据安全共享网络体系[19],设计出了开放式数据索引命令结构,也阐述了开放式数据索引命令运行机制,而且在 ODIN 技术的基础上设计基于 ODIN 的去中心化 DNS 的域名协议模块,并验证了它的功能。这为能源互联网数据间 P2P 安全可信共享奠定了基础,为实现企业内部及企业间的数据安全共享构建一个可信的网络环境。

2) 能源系统的系统调度效率问题:2017年华北电力大学的曾鸣等提出一种区块链框架下能源互联网多模块协同自治模式[20],从思维和技术角度论证了区块链与能源互联网的兼容性;改进了现有的能源互联网结构理念,构建了以区块链为支撑的能源互联网框架;基于区块链系统的分布式运行决策机制,提出了能源互联网多模块协同自治模式及其控制流程;分别从区块链和能源互联网角度探讨了促进区块链与能源互联网融合的关键技术。

3) 能源系统的处理能力问题:能源互联网的处理能力事关整个系统的性能,在2017年北京信息科技大学的 Li Jun Wu 等设计出了一种新型混合区块链存储模式[21]:区块静态存储(BSS,内部结构为 N+X 混合区块链)。通过 N+X 混合区块链存储机制,可以有效提升能源互联网的效率,效率比以太坊大幅提高。但是储存数量波动受网络延迟等因素影响,块生成速率保持在 10 秒以上。

4) 能源系统的交易效率问题:区块链运用于能源互联网上的交易,许多研究学者对分布式能源交易框架、交易方法、交易速率、交易模式等最新提出了不同的方案,这些方案对能源系统的交易效率有很大的影响。在2016年清华大学孙宏斌团队提出了弱中心化管理电力交易的方法[22],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。在2017年 YujieXu 等分析了区块链的特点和基础设施[18],建

立了基于区块链的分布式能源交易架构, 并对关键技术进行了总结。同年邵雪的团队又提出了利用区块链应用于能源互联网的具体架构[23], 不仅对区块链交易的成本和速度的影响因素进行了定性分析, 更建立了数学模型对其进行定量分析。通过仿真探究得到的影响交易速率因素, 验证了数学模型的正确性, 这为今后电力交易区块链的具体设计提供了参考; 但在研究区块链传播时间时, 没有考虑市场机制、定价机制、信息安全、商业模式等对区块链网络的具体影响。华北电力大学的武庚团队从电力需求侧响应(DR)在能源互联网中的发展趋势出发, 分析了综合需求侧响应(IDR)的基本概念和系统中可交易 IDR 资源的基本特征[24]。基于当前 DR 资源在市场交易中存在的问题, 从 EMS 系统架构、交易系统模块以及交易流程框架三个方面提出了基于区块链技术的 IDR 资源整体交易体系框架, 阐述出未来基于区块链的 IDR 资源交易体系中若干关键的技术问题, 展望了未来的研究方向。平健等提出一种“多交易请求、多响应报价”的配电网去中心化多边交易模式[25], 并且采用 VCG(Vickrey-Clarke-Groves)拍卖规则激励产消者理性报价, 设计安全校核方法消除潮流越限, 最小化消除偏差电量的成本, 确保配网的安全、经济运行。能源系统中大用户直购电是电力市场改革的重要一环, 欧阳旭等介绍了区块链技术与大用户直购电相关的概念, 根据大用户直购电自身的特点, 搭建了基于区块链的大用户直购电交易系统框架, 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[26]。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, 对区块链技术应用用于大用户直购电中可能遇到的问题进行了归纳。通过对该文献中的分析可以看出, 区块链技术应用用于大用户直购电中, 将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。

5) 能源系统的需求响应问题: 区块链技术已经运用于电力市场的需求响应和中。在 2017 华北电力大学的李彬团队在基于现有电力市场自动需求响应业务的需求分析, 提出了基于区块链技术的应用方案[27], 并从 PoW、互联共识、智能合约、信息安全等方面剖析了区块链在自动需求响应系统中的关键问题, 而且针对现有的技术水平分析了区块链目前应用与自动需求响应系统所存在的问题, 并提出相应的建议方案。国家电网江苏电力科学研究所的 Gaoying Cu 团队根据电力需求响应的特点, 选择了区块链来解决用户之间, 负荷聚合器和电网之间相互信赖的多层次需求响应问题通讯, 用智能合约解决了需求响应自动化的问题[28]。

6) 能源系统中虚拟电厂方面: 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)已经成为由智能能源互联网最为重要的一个分支。余维等针对现有的 VPP 模型中存在的问题, 将区块链技术引入 VPP, 提出一种能源区块链网络模型[29], 进而提出一种改进的 VPP 运行与调度模型。通过仿真实验, 对比了该模型与原有的 VPP 运行模式在煤炭消耗、温室气体排放和经济成本等方面的数据。仿真结果也表明, 该模型可更好地反映需求侧实时信息, 更有利于 VPP 进行环境友好、信息透明的稳定调度, 也提高了系统的数据安全性和存储安全性。

根据以上区块链技术在能源系统的应用可以看出, 区块链技术在能源系统中的应用有很大的发展前景。在能源区块链领域, 目前尚未形成规范的技术标准。笔者认为能源系统中的中心化管制都可以受益于区块链技术, 在未来的发展中, 工业界和学术界可以向能源系统的 P2P 电力交易、电动汽车的充电桩、电力系统的物理信息安全及商业模式等发展, 使能源系统更好的受益于区块链技术。

4. 总结

区块链技术去中心化、透明化、合约执行自动化、可追溯性的特点, 在能源系统建设中得到了越来越广泛的应用。现阶段, 区块链已经在能源系统的网络数据安全、系统调度效率、处理能力、交易效率、需求响应、虚拟电厂方面得到了初步的研究, 尤其在交易当面研究较多。但是每个方面或多或少还是存在一定的问题, 比如运行处理方面, 区块链的交易记录和相关信息需要所有参与者同步存储, 这需要大

容量存储系统, 需要我们完善区块链的激励机制和储存结构; 此外在交易效率方面, 区块链的计算能力不能跟上能源系统的实时计算要求, 需要把大数据、云计算和区块链相结合, 实时的完成能源系统之间的交易。所以, 能源区块链的研究还需要研究者们进一步的推动和不断的完善。

参考文献

- [1] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
- [2] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.
- [3] 曹军威, 袁仲达, 明阳阳, 等. 能源互联网大数据分析技术综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 1-12.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 陈启鑫, 刘敦楠, 林今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(一) [J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
- [7] 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): 3057-3063.
- [8] Nakamoto, S. (2009) Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- [9] Blockchain (Database). <https://en.wikipedia.org/wiki/Blockchain>
- [10] Guy Zyskind, G., Oz Nathan, O. and Alex 'Sandy' Pentland, A.S. (2015) Decentralizing Privacy: Using Blockchain to Protect Personal Data. *Proceedings of the Security and Privacy Workshops (SPW)*, San Jose.
- [11] 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.
- [12] 周国亮, 吕凛杰. 区块链技术在能源互联网中的应用[J]. 电力行业信息化年会论文集, 2016.
- [13] 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.
- [14] 中国区块链技术和产业发展论坛, 中国区块链技术和应用发展白皮书[EB/OL]. <http://www.cbdforum.cn/index/article/rsr-6.html>, 2016-10-18.
- [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.
- [16] 谭磊, 陈刚. 区块链 2.0[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [17] 龚鸣. 简单谈谈究竟什么是“区块链”技术[EB/OL]. <http://mt.sohu.com/20151023/n424005566.shtml>, 2015-10-23.
- [18] Xu, Y.J., Wu, M.M., Lv, Y. and Zhai, S.J. (2017) Research on Application of Block Chain in Distributed Energy Transaction. 2017 *IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, 3-5 October 2017, 957-960. <https://doi.org/10.1109/ITOEC.2017.8122495>
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Wu, L.J., Meng, K., Xu, S., et al. (2017) Democratic Centralism: A Hybrid Blockchain Architecture and Its Applications in Energy Internet. *IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI)*, Beijing, 17-21 April 2017, 176-181. <https://doi.org/10.1109/ICEI.2017.38>
- [22] 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.
- [23] 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): 1000-3673.
- [24] 武赓, 曾博, 李冉, 等. 区块链技术在综合需求侧响应资源交易中的应用模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3717-3728.
- [25] 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.
- [26] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在大用户直购电中的应用初探[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3737-3745.
- [27] 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.

- [28] Cui, G.Y., Shi, K., Qin, Y.C., Liu, L., Qi, B. and Li, B. (2017) Application of Block Chain in Multi-Level Demand Response Reliable Mechanism. 2017 3rd International Conference on Information Management (ICIM), Chengdu, 21-23 April 2017, 337-341. <https://doi.org/10.1109/INFOMAN.2017.7950404>
- [29] 余维, 胡跃, 杨晓宇, 等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3729-3736.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org