

◆负荷管理与客户服务◆

DOI:10.3969/j.issn.1009-1831.2021.01.014

# 基于区块链技术的虚拟电厂交易管理模式研究

周洪益<sup>1</sup>,余爽<sup>2</sup>,柏晶晶<sup>1</sup>,卫志农<sup>2</sup>,孙国强<sup>2</sup>,臧海祥<sup>2</sup>,钱苇航<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司 盐城供电分公司,江苏 盐城 224002;  
2. 河海大学 能源与电气学院,南京 211100)

**Research on trading pattern of virtual power plant based on blockchain technology**

ZHOU Hongyi<sup>1</sup>, YU Shuang<sup>2</sup>, BAI Jingjing<sup>1</sup>, WEI Zhinong<sup>2</sup>, SUN Guoqiang<sup>2</sup>,

ZANG Haixiang<sup>2</sup>, QIAN Weihang<sup>2</sup>

(1. Yancheng Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yancheng 224002, China;  
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**摘要:**以虚拟电厂技术促进清洁能源消纳是泛在电力物联网建设内容的重要组成部分。首先对虚拟电厂的基本概念进行了详细的介绍,其次从定义、数据结构、分类、共识机制以及智能合约方面对区块链技术进行了阐述。再次,对区块链技术与虚拟电厂相结合的适用性进行了详细的分析。在此基础上,建立了基于区块链技术的虚拟电厂商业运营架构和电力交易模式,设计了基于区块链技术的虚拟电厂能源认证和证书交易模式,并对区块链在虚拟电厂中的应用进行了案例说明。最后,给出了虚拟电厂与区块链技术进一步深度融合的发展建议。

**关键词:**电力物联网;虚拟电厂;区块链;电力市场;商业模式

**Abstract:** Promoting clean energy consumption with virtual power plant technology is an important part of the construction of ubiquitous electric Internet of Things. Firstly, the concept of virtual power plant is introduced, then the definition, structure, classification, consensus mechanism, and smart contract of blockchain technology are described, and the feasibility of applying blockchain technology to virtual power plants is analyzed. Thirdly, the virtual power plant commercial operation structure and power transaction mode based on blockchain technology are established. The virtual power plant energy certification and certificate transaction mode based on blockchain technology is designed. Then, the application of blockchain in virtual power plant is illustrated. Finally, the development proposal of virtual power plant based on blockchain technology is given.

**Key words:** electric Internet of Things; virtual power plant; blockchain; electricity market; business pattern

## 0 引言

随着风、光等可再生能源的快速发展,分布式能源接入配电网的趋势日益向高渗透、高密度的方向发展。然而大量新能源的接入,其随机性和不确定性会给电网的运行调度和电力市场的交易产生重要影响。虚拟电厂技术正是聚合众多分布式电源参与电力市场运营,促进新能源消纳的重要手段之一<sup>[1-2]</sup>。

然而传统的虚拟电厂(virtual power plant, VPP)在结算周期、信息安全等方面也存在一些问题。首先,电源业主对虚拟电厂运营方的信任问题,具体表现为能源信息和收益结算是否可靠。传统模式下,虚拟电厂中能源信息和收益结算依赖于中心化机构,可能会存在收益结算效率较低以及虚假能源

信息的现象。

其次,现行的分布式电源结算周期长。传统模式下,虚拟电厂运营方聚合能源后参与电力市场的交易,在虚拟电厂整体收益清算后,再根据电源出力曲线、电源信息进行再清算,电力收益需要较长的周期后才可获得,因此可再生能源所有者的投资积极性将受到影响。

再次,目前虚拟电厂信息数据均存储在虚拟电厂运营方的控制中心中,存在黑客入侵导致的用户身份伪装或数据泄露问题,对虚拟电厂的安全运行造成威胁。

基于区块链技术的虚拟电厂交易管理模式为解决以上问题提供了新思路<sup>[3-9]</sup>。

本文根据虚拟电厂和区块链技术的特点,建立了基于区块链技术的虚拟电厂商业运营架构和电力交易模式,设计了基于区块链技术的虚拟电厂能源认证和证书交易模式,并对区块链在虚拟电厂中的应用进行了案例说明。最后,给出了虚拟电厂与区块链技术未来进一步深度融合的发展建议。

收稿日期:2020-08-02;修回日期:2020-10-25  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877071);国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019105)

## 1 区块链技术与虚拟电厂相结合的适用性分析

### 1.1 虚拟电厂技术

通过“大云物移智联”等先进的信息技术和通信技术,虚拟电厂可以实现燃气轮机、光伏电站、智能楼宇、电动汽车等分布式资源的通信和聚合,作为一个整体参与电力市场和电网运行。

然而,采用中心化模式的传统虚拟电厂在交易结算、信息安全等方面存在一些不足,主要包括:

(1) 虚拟电厂中的交易结算仅由运行中心负责,当交易情况复杂时存在效率降低的问题,导致交易成本增加,各分布式能源的收益降低。

(2) 虚拟电厂缺乏安全可靠的信息系统,存在黑客入侵导致的用户身份伪装或数据泄露风险,影响虚拟电厂的安全运行。

虚拟电厂的基本结构如图1所示。

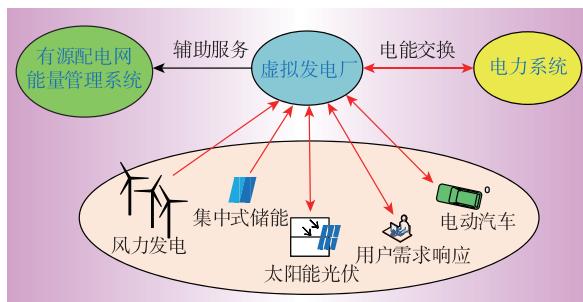


图1 虚拟电厂的基本结构

Fig. 1 Basic structure of virtual power plant

### 1.2 区块链技术

#### (1) 定义

区块链技术本质上是一种多节点参与具有去中心化特性的分布式数据库,由一组使用采用密码学方法加密的数据区块按照时间顺序链接而成,记录了不可篡改的数据信息<sup>[10]</sup>。

#### (2) 结构

区块链中的数据区块由区块头和区块体两部分组成,区块头由上一区块的地址、时间戳、Merkle根以及目标哈希值组成;区块体中包含了系统中一段时间的所有信息,并采用Hash加密算法通过Merkle树生成唯一的Merkle根与区块头联系,如图2所示。

#### (3) 区块链类型

目前,区块链按照其类型的不同具体可以分为公有链、联盟链以及私有链3种<sup>[11]</sup>,3种类型的特点,如表1所示。

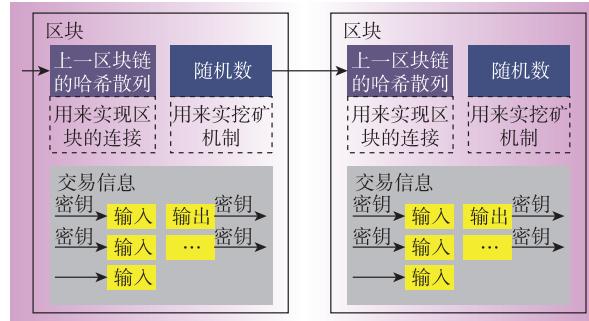


图2 区块链数据结构

Fig. 2 Data structure of blockchain

- 公有链:在公有链中,系统中的所有节点均可以参与共识过程,但由于参与共识的节点数量较多,造成公有链效率降低的问题。

- 联盟链:联盟链中参与共识过程的节点由内部预先选定,区块链上的数据可以是公开的也可以是内部的,即部分去中心化。

- 私有链:在私有链中,共识过程仅由中央节点负责执行,中央节点可决定其他节点的读取权限。私有链的交易速度更快,交易成本更低,但由于权力过分集中于中央节点,存在数据被任意篡改的风险,但适用于某些特殊场景的应用。

表1 3种区块链类型的特点比较

Table 1 Characteristics comparison of three blockchain types

特点	公有链	联盟链	私有链
共识过程	所有节点	部分预选节点	中央节点
节点准入	无需授权	需要授权	需要授权
读取权限	公开	公开或受限	公开或受限
安全性	高	存在风险	存在风险
效率	低	较高	高
去中心化程度	完全去中心化	部分去中心化	部分中心化

#### (4) 分布式共识机制

分布式共识机制是P2P网络中节点之间达成共识协议的过程。每一个区块只有在各个节点经过共识过程达成一致后才能按照时间顺序加入到区块链中。

目前区块链的共识机制有以下几种,权益证明机制、工作量证明机制、股份授权证明机制和拜占庭容错算法。

#### (5) 智能合约

智能合约本质上是部署在区块链上的一组自动执行的计算机程序,规定了交易结算、运行管理机制等规则。智能合约使区块链的应用范围从货币领域扩展到金融、医疗、能源等领域,成为区块链技术落地应用的重要依托<sup>[12~14]</sup>。

在区块链系统中,智能合约具有读取和写入数

据、保证交易执行、管理数字资产的功能。智能合约的应用减少了系统的管理成本,避免了不必要的交易纠纷,促进了区块链的进一步发展。

### 1.3 适用性分析

区块链技术以其去中心化、公开透明、不可篡改的特性与能源互联网的技术特点具有一致性,将两者相结合可以建立一个基于共识机制的去中心化能源交易管理平台,为解决虚拟电厂目前存在的问题提供了新的解决思路。

(1) 去中心化:区块链系统具有去中心化的特点,各个决策由系统中的所有节点共同执行。而虚拟电厂包含多种分布式能源,亟需由传统的中心化控制模式转为分散控制模式。

(2) 集体维护:区块链系统通过共识机制保证每个节点都能够参与区块的写入过程,各个节点也都具有访问区块数据的权限。因此避免了采用集中化的控制中心。虚拟电厂对分布式电源进行读写、维护权利的授权能够有效提高分布式能源参与虚拟电厂的积极性。

(3) 智能合约:通过智能合约技术,区块链系统可以实现交易结算的自动执行,提高交易管理效率。虚拟电厂在获得收益之后,能够自动实现收益的再分配,减少分布式能源所有者回收资金的周期。

(4) 信息安全:区块链技术使安全智能交易在能源领域成为可能。同时,虚拟电厂现有的交易管理模式存在信息泄露和身份伪装的问题。将两者相结合建立基于区块链技术的虚拟电厂交易管理模式能够提高虚拟电厂运行系统的安全性。

## 2 基于区块链技术的虚拟电厂商业运营架构和电力交易模式

基于区块链技术的虚拟电厂商业运营架构和电力交易模式如图3所示。首先,将虚拟电厂内不同的分布式能源的类型及发电量进行标记,建立电源收益分配机制。其次,考虑两个层面的虚拟电厂交易模式,一是虚拟电厂内部电源与负荷P2P交易;二是虚拟电厂作为一个统一的发电厂参与电力市场交易。基于区块链系统,虚拟电厂与分布式能源所有者之间可以进行双向选择。

分布式能源所有者根据虚拟电厂的收益分配规则选择是否加入,并向虚拟电厂运营方提供能源类型、身份ID、可发电额度量等信息。同时,由于区块链系统分布式共识机制的存在,各分布式能源的实际发电量均是公开透明的。在基于区块链技术

的虚拟电厂商业运营架构和电力交易模式中,虚拟电厂与分布式能源所有者之间能够通过智能合约达成长期购电协议,并且可以实现电力的实时交易结算,缩短资金回收周期。

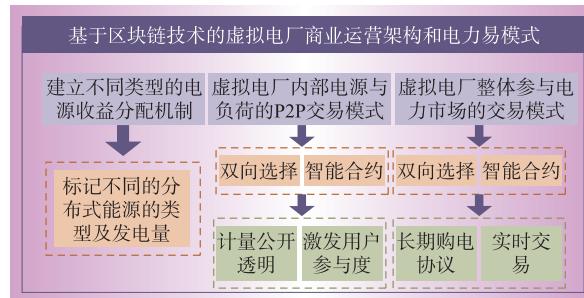


图3 基于区块链技术的虚拟电厂商业运营架构和电力交易模式

Fig. 3 Virtual power plant operation structure and power transaction mode based on blockchain technology

## 3 基于区块链技术的虚拟电厂能源认证和证书交易模式

基于区块链技术的虚拟电厂能源认证和证书交易模式如图4所示。对于电网中的每个虚拟电厂以及虚拟电厂中的分布式电源而言,其提供的电力信息,所处地域,以及其可信程度履约历史等都将公开、透明、不可篡改地记录在区块链中。设计虚拟电厂能源认证模型和证书交易智能合约,将信息认证后写入区块链进行标记,同时证书以令牌的形式参与市场交易,证书交易及转让信息写入区块链,能够保证有据可查并且不可篡改。

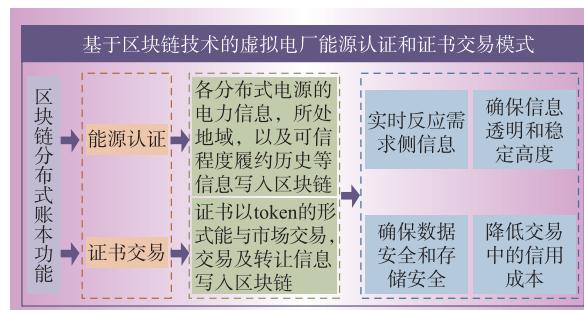


图4 基于区块链技术的虚拟电厂能源认证和证书交易模式

Fig. 4 Virtual power plant energy certification and certificate transaction mode based on blockchain technology

## 4 区块链技术在虚拟电厂中的应用

本文对虚拟电厂传统的中心化结构进行改进,建立了基于区块链技术的虚拟电厂运营架构。在此架构中,虚拟电厂的运营主要由聚合商、分布式

节点和智能电能表共同完成,具体如图5所示。

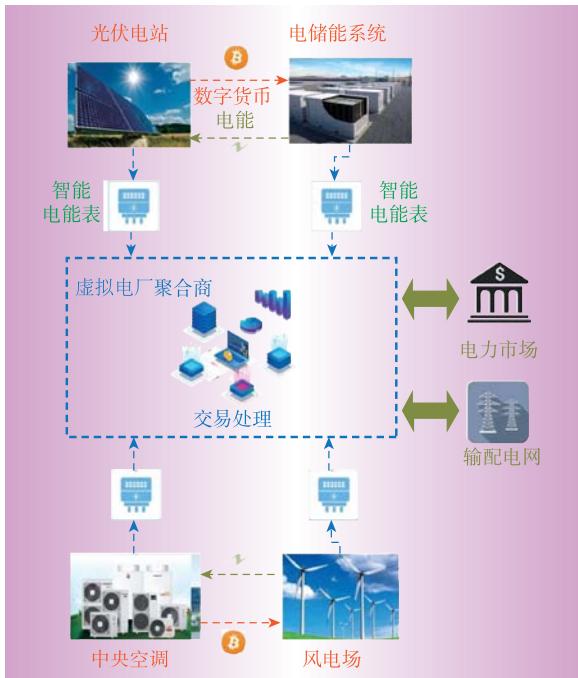


图5 基于区块链技术的虚拟电厂运营架构  
Fig. 5 Operation framework of virtual power plant based on blockchain technology

其中,分布式节点即为虚拟电厂中的各个分布式能源业主;VPP聚合商具有对各个分布式能源节点进行能源认证,收集各个节点的交易请求并进行交易匹配,存储节点间的交易记录等功能;智能电能表可以对实时电力交易量进行记录,并实现分布式节点之间、分布式节点与聚合商之间的通信以及数字货币传输。

区块链模式下的虚拟电厂能源认证与交易流程如图6所示,可以分为6个步骤。

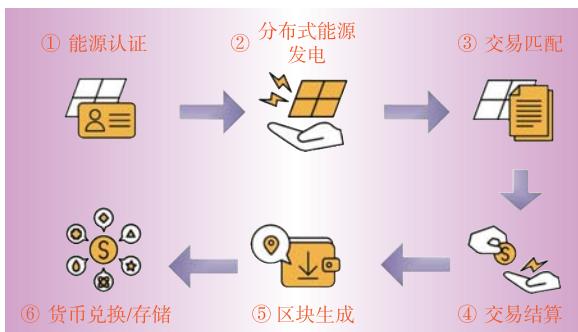


图6 区块链模式下的虚拟电厂能源认证与交易流程  
Fig. 6 Energy certification and transaction process of virtual power plant in blockchain mode

(1) 各分布式能源业主需要将身份ID、地理位置、能源类型、可发电额度等信息发送给VPP聚合商进行能源认证,认证完成后VPP聚合商向各个分

布式能源节点发送对应的公私钥对以及钱包地址。

(2) 各分布式能源业主根据实际情况以及虚拟电厂的优化调度计划进行发电。

(3) VPP聚合商收集各分布式能源节点的交易请求,并进行交易撮合。在交易匹配完成后,各分布式能源节点之间进行电力传输。

(4) 在电力传输完成后,各分布式能源节点将能源币从能源购买节点发送到能源出售节点,并采用公私钥对进行签名,从而对支付信息进行验证。

(5) VPP聚合商收集一段时间内的所有交易记录,并采用共识算法生成数据区块,如果所有的节点均对该区块达成一致,则可以将该数据区块存储至区块链系统中。

(6) 分布式节点收到数字货币后可以长期存储在钱包地址中,也可以在数字货币交易所与政府货币进行兑换以获取收益。

## 5 建议

(1) 研究适应多交易主体和新型交易模式的高比例分布式电源优化规划。考虑虚拟电厂去中心化交易,研究多交易主体模式对配电网接纳分布式电源能力的影响;综合考虑多交易主体功能定位和新型交易模式,研究基于“源网荷”互动的高比例分布式电源接入配电网优化规划方法。

(2) 出台支撑基于区块链技术的虚拟电厂建设发展的相关政策。鼓励区块链技术应用发展,综合考虑各参与主体的价值,充分调动各方对能源区块链投资的积极性,逐步研究、层层推进,鼓励多方参与、技术革新。

(3) 制定泛在物联网下新型虚拟电厂的规范和标准体系。结合电力行业标准体系,在通用区块链的标准基础上,完善融合后纳入到泛在电力物联网下虚拟电厂的标准体系中。

(4) 建立泛在电力物联网下虚拟电厂监管体系,创新管理模式。建立虚拟电厂区块链的投资效益评估和纠纷仲裁机制,对虚拟电厂的投资、建设、运营和效益进行科学准确的评估和监管,并以此作为引导,优化后续的建设应用。

## 6 结束语

以虚拟电厂技术促进清洁能源消纳是泛在电力物联网建设内容的重要组成部分,区块链技术在虚拟电厂的应用仅处于理论研究阶段,仍有大量的研究需要开展。本文介绍了虚拟电厂的概念,阐述

了区块链技术的定义、结构、分类、共识机制、智能合约,分析了区块链技术与虚拟电厂相结合的适用性。建立了基于区块链技术的虚拟电厂商业运营架构和电力交易模式,设计了基于区块链技术的虚拟电厂能源认证和证书交易模式,以期能够对未来区块链技术在能源领域的研究提供帮助。

## 参考文献:

- [1] 李扬,宋天立,王子健.基于用户数据深度挖掘的综合能源服务关键问题探析[J].电力需求侧管理,2018,20(3):1-5.  
LI Yang, SONG Tianli, WANG Zijian. Research on key issues of integrated energy services based on user data deep mining[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(3):1-5.
- [2] 卫志农,余爽,孙国强,等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力系统自动化,2013,37(13):1-9.  
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13):1-9.
- [3] 徐峰,何宇俊,李建标,等.考虑需求响应的虚拟电厂商业机制研究综述[J].电力需求侧管理,2019,21(3):2-6.  
XU Feng, HE Yujun, LI Jianbiao, et al. Review of research on commercial mechanism for virtual power plant considering demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3):2-6.
- [4] 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.
- [5] 谭磊,陈刚.区块链2.0[M].北京:电子工业出版社,2016.  
TAN Lei, CHEN Gang. Blockchain 2.0[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [6] 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):3 664-3 671.  
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) : 3 664-3 671.
- [7] KRAFT D. Difficulty control for blockchain-based consensus systems [J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2016, 9(2):397-413.
- [8] 龚钢军,张桐,魏沛芳,等.基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系研究[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1 278-1 290.  
GONG Gangjun, ZHANG Tong, WEI Peifang, et al. Research on intelligent trading and cooperative scheduling system of energy Internet based on block-chain [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5):1 278-1 290.
- [9] 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):12-21.  
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):12-21.
- [10] 高赐威,童格格.区块链技术在分布式发电市场化交易中的应用分析[J].电力需求侧管理,2018,20(4):1-4.  
GAO Ciwei, TONG Gege. Application analysis of blockchain technology in market-based transaction of distributed generation [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(4):1-4.
- [11] 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.  
ZOU Jun, ZHANG Haining, TANG Yi, et al. Technical guide to blockchain [M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陈妍希,赵奇,龚育成,等.基于区块链技术的电动汽车充电交易探讨[J].电力工程技术,2020,39(6):2-7.  
CHEN Yanxi, ZHAO Qi, GONG Yucheng, et al. EV charging transaction based on blockchain technology [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39 (6):2-7.

## 作者简介:

周洪益(1982),男,江苏盐城人,本科,研究方向为电网规划;

余爽(1991),男,江苏南京人,硕士研究生,主要研究方向为虚拟电厂及区块链技术研究;

柏晶晶(1991),男,江苏盐城人,硕士,工程师,从事电网规划、变电站运行工作。

(责任编辑 郝 洁)