

弱中心化的区块链技术在能源互联网交易体系中的应用分析

李庆生¹, 唐学用¹, 赵庆明¹, 邓朴¹, 陈巨龙¹, 糜雨彤², 高华¹

(1. 贵州电网公司有限责任电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550003;

2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 本文结合区块链技术, 提出弱中心化的能量交易系统的框架, 探索在电源、电网、负荷之间的能量与信息复杂交互的情况下未来能源互联网中的能源交易系统。分析了与电源和电网进行良性有效互动时, 对于能源互联网的各种智慧能源方案, 深刻剖析了区块链的技术原理和能源互联网运行特性, 总结出能源互联网与区块链技术耦合需求, 结合区块链具有可信计量、广泛交易、智能合约控制、分布决策以及广域融合的特性, 阐释了区块链与能源互联网特征的一致性, 以及技术耦合特性, 明确区块链技术在能源互联网中的定位, 结合能源互联网中能源交易的去中心化的特征, 构建了弱中心化的区块链能源网交易体系。最后, 分析总结了区块链技术框架下能源互联网交易体系待解决的关键技术。

关键词: 区块链; 能源互联网; 弱中心化; 能源交易

文章编号: 2096-4633(2019)06-0022-06 **中图分类号:** C39 **文献标志码:** B

2016年2月29日, 由国家发展改革委、国家能源局、工业和信息化部联合发布的《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》, 明确指出能源互联网是推动中国能源革命, 增加可再生能源比例, 促进化石能源清洁高效利用的重要战略支撑。提高能源综合效率, 推动能源市场开放和产业升级, 形成新的经济增长点, 提升能源国际合作水平具有重要意义。

能源革命的目标将是可再生能源逐步代替传统化石能源, 让可再生能源逐步占据更大的比例^[1-4], 推动建设清洁低碳、安全高效的新一代能源互联网。由于可再生能源的生产、输送和消费均无法脱离电力系统, 即电力系统在保证能源转型核心指标的实现方面具有关键作用^[5]。因此, 我们需要在技术和创新的根本上着手, 推动整个电力系统自下而上转型, 建设以新一代能源系统为核心的新一代电力系统。

要实现电力系统转型升级, 首先要对现有的电力系统的交易模式进行彻底地分析和设计^[6-7]。从能源的生产、传输和消耗的角度来看, 我们可以将电力系统分为源-网-荷模型, 如图1。在传统的电力系统中, “源”侧主要由火力发电和水力发电等常规能源构成; “荷”侧主要是由常

规的负荷构成, 通常这些负荷不具可控性或只有弱可控性。从能量流-信息流的角度看, 在传统的电力系统的结构中, 能量的流向是单一的, 调度得到的信息也是建立在负荷状态基础上的, 如图1(a)。所以, 传统的电力系统缺乏“源网荷”之间的信息交互和能量流动, 因而, 调度智能根据实时负荷的情况, 通过调度指令将能量被动地从“源”侧通过“网”侧传输给“荷”侧。

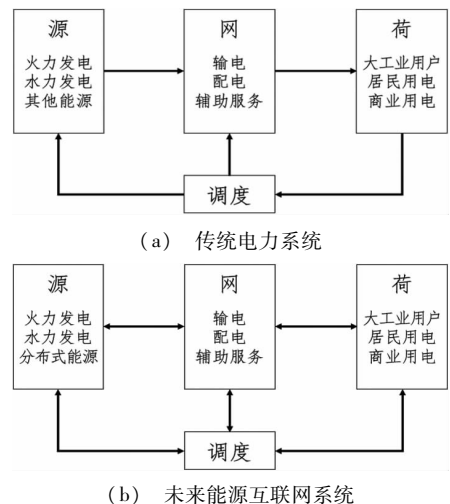


图1 电力系统交互结构图

Fig. 1 Diagram of power system structure

在未来的能源互联网中, 在“源”侧, 除了常规

能源外,还有间断性的能源、大规模储能系统和其他新能源。在“荷”侧,不再是单一的负荷,还有很多灵活、可控的负荷,如充电汽车、分布式能源等^[6]。其中,分布式能源具不仅具有提供能量和储存能量的功能,同时有研究指出^[8-10],提高系统中分布式能源的所占的比例可以提高系统供电可靠性、降低网络损耗、改善电能等,因而分布式能源将在未来的电网中扮演重要的角色。

大量分布式能源的进入,源网络与负荷之间的互动将呈指数级增长。这对于以调度作为单一控制策略的传统电网结构将是严峻的挑战。如何通过调控电源、电网和负荷之间的各种相互作用,建立安全、高效,经济地改善电力系统的电力平衡。这是未来建设能源互联网最关键的问题。

随着源-网-荷能量、信息的互动增多,在实际应用中,将表现为源-网-荷之间的巨量的、高密度的信息交换。如果用传统的以调度为中心的控制方式,那么这样的控制方式对信息处理能力将是个巨大的挑战:调度端不仅要高速处理海量数据,还要保证整个系统的稳定性和安全性。对整个系统来说,该控制方式会极大地增加风险,主要表现在:若中心化的控制节点出现问题,将会造成难以逆转的灾难型损失^[11-13]。未来能源互联网最重要的特征之一是分布式能源的大量使用以及“互联网+智能能源”的联合应用。若仍然采用中心化的集中管控调度方式,将很难实现低成本、大规模参与用户交互^[14]。

本文将通过将分布式能源与区块链的特征相结合的方式,探讨在能源互联网中利用区块链进行能量交易的体系。

1 区块链技术

区块链技术是指通过组维护公共分类账(数据库)的技术解决方案^[15-16]。在该技术方案的支持下,可以实现数据库的分布式存储和去中心化可信交易。对区块链数据的修改,需要由整个网络中的所有(或大部分)节点验证对分布式数据库的更改^[17-18]。即以群体的计算能力为基础,通过密码学算法将信息记录到数据块(Block)中,并生成该块的数字指纹(Hash)并连接到下一个块头。该技术可以保证每个价值单位只转移一次,同时解决了数字资产诈骗中长期存在的双重支出问题。整个区块链

通过在某时间段解决一个复杂的数学问题来确认新区块和奖励分配,逐渐形成一个庞大、开源、去中心化的数据库,如图2所示。

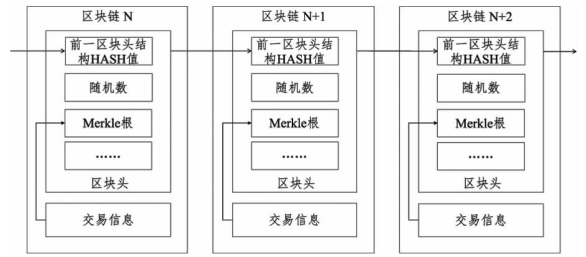


图2 区块链结构图

Fig. 2 Structure diagram of blockchain

分布式数据库指的是数据在整个区块链节点网络中互为冗余备份,而单个节点中存在与否不影响整个区块链数据的完整性。从技术的角度来看:区块链不是单一技术,而是多种技术融合的结果(数据读取,数据存储,数据加密和解密,网络技术和数据挖掘等)。

区块链的特殊数据结构组织使区块链技术具备四个主要特征:去中心化、开源化、智能合约化、交易可追溯化^[19-20]。

去中心化是指,整个区块链节点网络中没有控制节点,即所有区块链中节点的操作权限都是相同的。若区块链有大量节点存在的情况下,其数据在节点中互为冗余备份,所以任意节点的数据损坏或异常不影响整个区块链系统功能的正常运行。因此,这使得区块链的数据存储有较高的可靠性和鲁棒性。

开源化意味着整个区块链系统的操作规则是开源的。区块链信息的变更,需要整个网络中节点的共同验证,在统计意义上节点欺骗整个区块链系统几乎是不可能的。

智能合约化是指,在区块链中有一些共同的规则,这些规则的本质是一段程序代码^[21]。当智能合约触发条件满足时,区块链系统通过节点的共同认证自动强制执行智能合约的内容。智能合约的出现,让区块链系统在没有可信第三方的情况下有效保证了数字合约的可靠执行,不仅提高了智能合约的执行效率,还提高了合约的可信程度。

交易可追溯化是指,区块链中的每一笔交易,都通过数字指纹技术绑定了交易的全部信息,并且经过整个系统节点的验证和储存。即某一交易者的完整交易路径可以被回溯^[22-23]。

2 利用区块链技术改进的能源交易体系

2.1 总体框架

根据能源互联网和区块链的特点,我们提出基于区块链的能源交易系统架构,如图 3 所示。图中基于区块链的能量交易系统由能量交易层,扩展信息层和区块链实现层组成。其中,区块链层是整个系统的底层,负责交易的具体实现。在扩展层的技术支持下,交易层使得整个系统的交易能够根据交易前规则有效且有序地执行。



图 3 基于区块链的能量交易系统架构

Fig. 3 Architecture of blockchain-based energy trading system

能源交易层包括多个系统,包括电力系统,热力系统和气体系统。这些分类后的能源系统形成混合能源系统。在能源互联网下,贸易实体包括发电公司,电力公司,分布式能源生产商,智能家庭(生产者)和其他能源(煤炭,天然气,石油等)持有者。每个交易实体在交易级别申请启动和终止整个能源交易。系统将经双向报价、协商撮合后达成的交易数据(价格、数量等关键交易信息)送到扩展信息层,将所有信息打包并生成适用于区块链的智能合约代码。随后,系统将生成的智能合约代码送到区块链层,由区块链系统广播、验证、写入智能合约与生成区块信息。最终,由区块链层通过弱中心化管理的形式,将生成区块并加入区块链中。

扩展层有两个功能,即智能合约和弱中心化管理。交易主体通过向系统发起交易信息,通过该层的

服务器匹配达成交易意向,形成智能合约,并向区块链系统进行广播验证,通过验证后将智能合约记录入区块。当满足执行条件时,自动执行该数字合约。同时,能源交易不同于一般的实体交易,在能源交易的过程中离不开监管机构对整个能源市场的监管,监管者们必须事实掌握整个能源系统的相关关键参数,并对某些交易进行必要的协调。因此,对能源交易进行监管是有必要的,所以本文引入弱中心化的概念。

区块链层是分布式数据库的技术基础,由对等网络(P2P Network)和区块链节点组成。每个节点都是一个独立的计算机,拥有连接网络和进行独立计算能力,所有节点根据其自身的网络条件连接到系统中的其他节点,以形成典型的对等(P2P)网络。这些节点承担了整个系统中网络路由、验证和广播数据、冗余储存数据等功能。由于节点间的数据有冗余备份,所以任意一个节点退出和加入系统不影响整个网络数据和记录。

2.2 智能合约

智能合约是用程序语言编写的商业合约,在预定条件满足时,能够自动强制的执行合同条款,实现“代码即法律”的目标。智能合约在没有中心管理者参与的情况下,可同时运行在全网所有节点。

随着电力市场改革的推进,电力市场和辅助服务市场等交易领域也越来越偏离集中控制模式。转向以市场为导向的智能合约,是区块链技术在能源互联网市场中实现的关键。

图 4 是基本能源交易智能合约模型的示意图。交易主要分为 3 步:①每个交易节点都同意签署电子合约,其中包括双方的电子签名和交易的使用的资源(这里是电力和货币)、交易规则和完整的状态机;②交易通过 P2P 网络传播,经区块链对等网络节点验证协商一致并写入区块链;③系统定期检查状态机和外部数据。当大多数节点验证并确认时,该事务被视为完成并从最新块中删除。

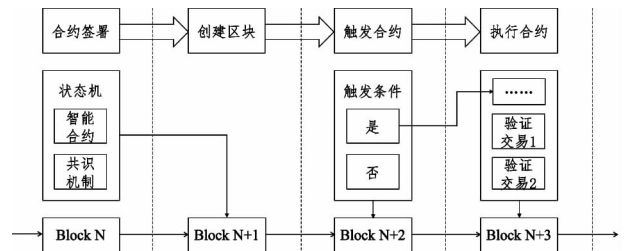


图 4 智能合约模型

Fig. 4 Model of smart contract

2.3 弱中心化

在能源互联网情境下,随着分布式能源技术的日渐成熟及能源市场的逐步放开,分散化、多元化,能源互联网交易市场逐渐显现,它具有能源产消者(Prosumer)数量庞大、可再生能源出力波动性明显、单笔能源交易规模小、随机性强等特征,运行成本高、交易效率低、决策耗时长等传统大规模中心化能源交易模式不再适用。而满足供需双方实时高效、灵活自由等需求的点对点交易成为未来能源互联网分散化交易的发展方向。虽然,完全去中心化的交易模式有利于提高交易的效率和数量。但是,对于整个能源互联网的安全性、可拓展性、监管机制、审核机制等的建立和实现是非常大的挑战。区块链弱中心化的分布式价值传输协议具有高效、低廉、公开、可信等应用优势,可为弱中心化的能源交易提供技术支撑。

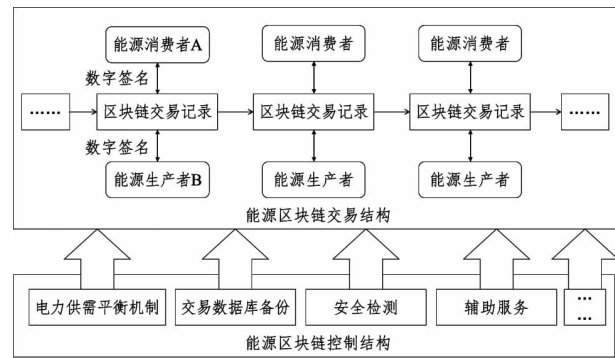


图5 弱中心化点对点能源互联网区块链交易体系架构

Fig. 5 Architecture of weak-centralized point-to-point energy trading system

区块链可以实现弱集中的点对点能量交易。当前,在我国尚不具备应用特定能源代币进行交易的情况下,在能源交易双方推定智能合约交易(包括交易各方的身份,能源配额,价格,交易时间,违约金等)并签署电子交易承诺的前提下,实现自动执行、去第三方中介的能源交易。能源产消者(Prosumer)是兼具能源生产与能源消费两种角色的交易实体,能源生产者和能源消费者在特定能源互联网交易场景中的角色转换。在如图5所示的交易情境中,能源产消者A、B基于自身出力负荷情况分别承担能源消费者和能源生产者的角色。首先,能源消费者A将用自身私钥签名的交易请求发送至能源生产者B,B用A的公钥解密以确保能源交易请求来源于A;其次,能源消费者A将把支付给能源

生产者B的能源交易数量打包加密。并将带有能源生产者B的公钥加密(包括交易地址)发送给B,B用他的私钥解密交易。若能源互联网监管机构证实该交易在满足供需平衡等必要条件时,予以将该交易放入区块链链中,并对全体节点进行广播以验证该交易。即能源消费者A和能源生产者B利用能源区块链进行能源交易,由监管者利用弱中心化的能源区块链的记录信息另行进行结算。即能源互联网交易区块链结构不是完全集中的结构。它是由能源互联网监管机构组成的弱集中能源互联网区块链交易系统。

3 区块链技术框架下的能源互联网交易体系待解决关键技术

(1)区块链的响应速度仍然存在瓶颈。以比特币网络为例,每秒只能处理7个交易。交易确认的延迟时间至少为10分钟。能源互联网中的更多应用,例如源-网-荷协同操作,需要更大量的数据处理速度和对数据处理延迟的更高要求。现有技术的速度可能存在问题。若能源互联网使用区块链处理数据并应用于具有低交易延迟的要求,则需要建立更有效的共识机制、更成熟的分布式系统以及更短的区块更新间隔周期。

(2)异步共识网络的容错能力。区块链节点网络采用的共识网络是多进程异步共识系统,而该共识系统的特性是:不存在一个统一的共识协议能保证整个系统都完全共识,且能实现拜占庭容错。由于分布式系统不能依赖同步通信,因此共识的性能和效率将非常低。目前,区块链使用工作量证明(PoW)机制来解决拜占庭容错问题,同时利用集群的计算能力来确保区块链系统的安全性。但这样的共识机制会被认为是对计算资源和能源的极大浪费。虽然现在有更为先进的共识算法,比如股权证明(proof of stake, PoS)、委任权益证明(delegated proof of stake, DPoS)、实用拜占庭容错(practical byzantine fault tolerance, PBFT)等共识算法,但仍需较为大量的计算资源和网络资源的消耗,且这些较为先进的共识算法在安全性上存在问题。未来的区块链的应用的必然是建立在消耗更少计算资源或者不消耗计算资源的、更为先进和智能的共识算法上。

(3)智能合约的责任主体缺失问题。智能合约

是保证能源互联网交易中能源交易双方权益的重要实现手段,是依托区块链技术实现的重要功能。因为智能合约的本质是用计算机语言写的程序,所以程序不具有语义上的歧义性。但现实中的合约还存在终止合约、合同违约处罚等较为复杂的情况。所以在智能合约形成的同时,还需要形成相应的主体责任规范,以保证在智能合约失效、终止等情况时对能源交易的双方都有法律责任上的约束,并予以监管机构进行仲裁的权利,避免智能合约责任主体失效的情况。

4 结论

能源区块链在互不了解的交易双方间建立了可靠的信任,弱中心化地实现了可靠的能源交易,主动将零散、大量的交易信息分布式地进行处理,减轻了对监管机构的压力。相比以中心化为主的能源互联网交易体系,采用弱中心化的能源互联网区块链的交易体系,可以有效地提高能源网络的鲁棒性,分散了计算压力、数据储存压力以及从根本上降低了交易的安全风险。在现行电力改革和能源互联网概念的冲击下,对传统能源互联网的改造和升级也在逐步进行。区块链的发展同时会给云计算、大数据及物联网等行业的发展带来更多的想象空间。所以能源互联网区块链不仅仅是一种新型的交易技术,也是一场能源互联网价值革命,将会给现有的能源行业带来深远影响。

参考文献:

[1] 朱继忠,冯禹清,谢平平,等. 考虑可再生能源配额制的中国电力市场均衡模型[J]. 电力系统自动化,2019,43(01):168-176.

[2] ZHU Jizhong,FENG Yuqing,XIE Pingping,et al. Equilibrium model of chinese electricity market considering renewable portfolio standard[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(01):168-176.

[3] XUE Y,JI L,NAZARIAN S,et al. Fundamental challenges toward making the IoT a reachable reality: a model-centric investigation [J]. ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems,2017,22(03):1-25.

[4] LIU W,LUND H,MATHIESEN B V,et al. Potential of renewable energy systems in china[J]. Applied Energy,2011,88(02):518-525.

[5] 吉平,武守远,周孝信. 含风力发电的市级电网区域可再生能源规划方案确定及重要因素影响研究[J]. 电网技术,2013,37(02):334-341.

[6] JI Ping,WU Shouyuan,ZHOU Xiaoxin. Determination of regional renewable energy planning scheme for urban power grid containing wind farm and its important impacting factors[J]. Power System Technology,2013,37(02):334-341.

[7] 吴斌,杨超,唐华. 区块链技术在微电网中的应用初探[J]. 电力大数据,2018,21(06):17-22.

[8] WU Bin,YANG Chao,TANG Hua. Preliminary applications of blockchain technique in microgrid[J]. Power Systems and Big Data,2018,21(06):17-22.

[9] 王华勇,杨超. 基于区块链技术的电力期货市场研究[J]. 电力大数据,2018,21(06):31-36.

[10] WANG Huayong,YANG Chao. Research on electricity futures market based on blockchain technology[J]. Power Systems and Big Data,2018,21(06):31-36.

[11] 陈耀圣,杨苹,曾智基等. 考虑微电网运行域的配电网分布式能源规划[J]. 电力系统自动化,2019,43(03):83-95.

[12] CHEN Yaosheng,YANG Ping,ZENG Zhiji,et al. Planning of distributed energy resources for distribution network considering dispatchable regin of microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(03):83-95.

[13] 梁凤宾. 分布式电源接入分析与评估系统的设计与实现[D]. 北京:北京交通大学,2015.

[14] 吴万禄,韦钢,谢雨蓉,等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(15):90-91.

[15] WU Wanlu,WEI Gang,XIE Lirong,et al. Coordinated planning of distribution network containing charging station and distributed generation[J]. Power System Protection and Control,2014,42(15):65-73.

[16] 徐丙垠,张海台,咸日常. 分布式电源对配电网继电保护的影响及评估方法[J]. 电力建设,2015,36(01):142-147.

[17] XU Bingyin,ZHANG Haitai,XIAN Richang. Evaluation method for impact of distributed electric resources on the relaying protection of distribution network [J]. Electric Power Construction,2015,36(01):142-147.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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(03):736-744.

[23] 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(03):736-744.
- [24] 顾为东. 能源4.0:重塑经济结构——互联网技术与智慧能源[J]. 中国工程科学,2015,17(03):4-9.
- [25] GU Weidong. Energy 4.0: Constructing the economic structure, internet technology and smart energy[J]. Engineering Sciences, 2015,17(03):4-9.
- [26] 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.
- [27] ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqin, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(15):4011-4023.
- [28] 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.
- [29] TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Transaction efficiency analysis of blockchain applied to energy internet [J]. Power System Technology,2017,41(10):3400-3406.
- [30] 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.
- [31] ZENG Ming, CHENG Ming, 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.
- [32] 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(05):1278-1290.
- [33] GONG Gangjun, ZHANG Tong, WEI Peifang, et al. Research on intelligent trading and cooperative scheduling system of energy internet based on blockchain [J]. Proceedings of the CSEE, 2019,39(05):1278-1290.
- [34] SUBRAMANIAN H. Decentralized blockchain-based electronic marketplaces[J]. Communications of the ACM,2017,61(01):78-84.
- [35] WANG M, WU Q, QIN B, et al. Lightweight and manageable digital evidence preservation system on bitcoin [J]. Journal of Computer Science and Technology,2018,33(03):568-586.
- [36] MAGAZZENI D, MCBURNEY P, NASH W. Validation and verification of smart contracts: a research agenda [J]. Computer,2017,50(09):50-57.
- [37] PECK E, WAGMAN D. Energy trading for fun and profit buy your neighbor's rooftop solar power or sell your own-it'll all be on a blockchain [J]. IEEE Spectrum,2017,54(10):56-61.
- [38] 吕诗宁,颜拥,丁麒,等. 能源互联网中的区块链应用:优势、场景与案例[J]. 浙江电力,2017,36(03):1-4.
- [39] LYU Shining, YAN Yong, DING Qi, et al. Application of blockchain in energy internet: advantage, scenario and case [J]. Zhejiang Electric Power,2017,36(03):1-4.

收稿日期:2019-03-21

作者简介:



李庆生(1971),男,本科,高级工程师,主要研究方向:主动配电网运行控制、新能源电力系统;

(本文责任编辑:范斌)

Analysis of applying weak-centralized blockchain technology in energy trading system of energy internet

LI Qingsheng¹, TANG Xueyong¹, ZHAO Qingming¹, DENG Pu¹, CHEN Julong¹, MI Yutong², GAO Hua¹

(1. Power Grid Planning & Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550003 Guizhou, China;

2. Electrical Engineering College of Guizhou University, Guiyang 550025 Guizhou, China)

Abstract: Based on block chain technology, this paper proposes a framework of weakly centralized energy trading system, and explores the energy trading system in the future energy Internet under the complex interaction of energy and information among power, power grid and load. This paper analyses various intelligent energy schemes of energy Internet when interacting benignly and effectively with power supply and power grid, deeply analyses the technical principle of block chain and the operation characteristics of energy internet, sums up the demand of technology coupling between energy Internet and block chain, and combines the characteristics of block chain such as credible measurement, extensive trading, intelligent contract control, distribution decision-making and wide area integration. It explains the consistency of the characteristics of block chain and energy internet, as well as the characteristics of technology coupling, defines the location of block chain technology in energy internet, and constructs a weakly centralized block chain energy network trading system combined with the de-centralized characteristics of energy transactions in energy internet. Finally, the key technologies to be solved in the energy Internet trading system under the block chain technology framework are analyzed and summarized.

Key words: blockchain; energy internet; weak centralization; energy trading