

区块链技术下的综合能源服务

龚钢军¹, 王慧娟¹, 杨晟¹, 孙跃², 苏畅¹, 文亚凤¹, 杨海霞¹

- (1. 北京市能源电力信息安全工程技术研究中心(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京市 西城区 100045)

Integrated Energy Service Based on Blockchain Technology

GONG Gangjun¹, WANG Huijuan¹, YANG Sheng¹, SUN Yue², SU Chang¹, WEN Yafeng¹, YANG Haixia¹

- (1. Beijing Engineering Research Center of Energy Electric Power Information Security (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Grid Jibei Electric Power Co. Ltd. Research Institute, Xicheng District, Beijing 100045, China)

ABSTRACT: To seek the new developing mode is the direct power to promote the transformation of power grid companies from electric energy suppliers to integrated energy service providers. Therefore, it is necessary to study the value-added service types, differentiated demands, negotiation mechanisms, transaction modes and operation management and control systems in the whole process of “source-network-sale-load” in the market environment. In this paper, it analyzed the application of blockchain and integrated energy service. A integrated energy service network architecture based on blockchain technology was built around the two tasks of integrated energy and integrated services. At the same time, a integrated energy service network architecture based on blockchain technology was built. A chain transaction model based on multi-chain integrated energy service was designed. Different transaction patterns and information interaction processes between nodes were analyzed, then the proof of sharing-stake (PoSS) consensus mechanism was proposed based on proof of stake (PoS). It used a combination of consensus to achieve the realization of service consensus among different subjects. Finally, the feasibility of a single master-slave chain was verified by the construction of the multichain platform. It provides a reference for proving the applicability of blockchain in the integrated energy service scenarios and the application of blockchain technology in integrated energy services.

KEY WORDS: integrated energy service; blockchain; PoSS consensus mechanism; information interaction mode

摘要: 谋求新的发展模式是促进电网公司由电能供应商向综合能源服务商转变的直接动力, 因此亟需研究市场环境下

“源-网-售-荷”全环节的增值业务类型、差异化需求、协商机制、交易模式和运行管控体系等。该文基于区块链与综合能源服务的融合应用分析, 围绕综合能源和综合服务两大任务, 构建了基于区块链技术的综合能源服务网络架构; 设计了基于多链的综合能源服务链上交易模型; 基于节点间的不同交易模式和信息交互过程的分析, 提出了基于权益证明 (proof of stake, PoS) 共识的权益分享证明 (proof of sharing-stake, PoSS) 服务共识机制; 并采用组合共识的方式实现不同主体间服务共识的达成; 最后通过多链平台的搭建进行了单个主-从多链的可行性验证, 为证明区块链在综合能源服务场景中的适用性以及区块链技术在综合能源服务中的应用提供了参考。

关键词: 综合能源服务; 区块链; PoSS 共识机制; 信息交互模式

0 引言

随着能源结构加快转型和电力体制改革进程的加速^[1], 以及智能电网、智慧能源、能源互联网等能源利用形态的快速发展, 国家电网公司提出了“做强、做优、做大”综合能源服务业务, 推动公司由电能供应商向综合能源服务商转变的发展思路^[2], 并将综合能源服务列入主营业务和新的利润增长点^[3], 力求进一步推动“以电力为中心枢纽”^[4]的综合能源服务模式的发展。综合能源服务的发展模式主要分为两大类: 1) 产业链延伸模式, 多能源系统的规划、建设和运行, 实现能源高效转化与利用; 2) “售电+综合服务”模式, 综合商业模式下涵盖用能设计、规划, 为用户提供能效与节能服务等增值类业务, 形成电能转化为主的能源交易^[5-7]。其中, 第2类模式围绕电能交易与能源增值

基金项目: 国家能源局科技项目(2017BJ0166)。

Project Supported by the Science and Technology Project of National Energy Administration(2017BJ0166).

服务,与第1类模式相比产业基础要求较低,因此“售电+综合服务”模式作为现阶段综合能源服务的主要发展方向。而电网公司在开拓综合能源服务市场方面具有天然的优势,如:仍处于垄断地位的输配电网、承担社会责任的大量自有售电公司、海量的用户资源和用电数据、大量技能娴熟和经验丰富的工程人员、强大的工程设计和建设能力、完善的管理体系等,都可以支撑综合能源服务工作高质量和高效率的开展。

虽然综合能源服务市场巨大,以此为契机有利于进一步推动电网公司的资源优化配置和企业经营模式的转型,提升企业的社会竞争力。但随着我国电力体制及电力市场的改革深入,由电力节能公司转变而来的综合能源服务公司也面临着巨大的经营压力,其问题既在于市场经验的不足和市场竞争激烈的局面,也由于“源-网-售-荷”全环节的增值业务覆盖下业务类型多、客户需求差异大、协商机制和交易模式多样化、交易的安全性和服务实时性要求高、运行体系管控难度大、社会对电网企业可信用度要求高等问题。因此,需要研究如何建立综合能源服务的市场运行与可信管控机制、综合能源与综合服务的运行匹配机制、电网供电主业务与其他增值业务的协调机制,从而进一步构建好综合能源服务的运行管控体系,提升综合能源服务协商机制的高效性、交易的安全性和服务实时性,确保各类用户对综合能源服务企业和相应业务的满意度和信任度。

综合能源服务是覆盖全电力环节、全业务类型的全新增值服务类型^[8],需要结合现有运营经验,采用新的模式、技术、方法来实现新的突破。而云计算、大数据、区块链等关键技术支撑着融合了分布式及微电网技术的新型综合能源服务模式的开展^[9]。其中,区块链在智能合约、分布决策、协同自治、拓扑形态、交易监管等方面与综合能源服务的需求有着天然匹配性,通过区块链技术可以保障综合能源服务信息的准确性、及时性,提高服务质量和效率。文献[10]构建了基于区块链的电力现货实时调度交易与监管模型;文献[11]提出了基于区块链技术的电力需求侧响应资源交易整体框架;文献[12-14]设计了基于区块链技术的能源互联网架构模型,融合智能合约于能源交易互联网,构建协同模式;文献[15]分析了异构区块链技术在多能系统中的应用,为探讨基于区块链的综合能源系统提供了理论参考。

以上文献在电力现货交易、需求响应、电力信息融合和多能系统等方面开展了区块链技术与电力系统业务应用的匹配性研究,有利于将区块链技术引入到综合能源服务体系的建设中来。但由于综合能源服务工作的开展时间相对较短,尚缺乏深入的分析运行体系、以及区块链与综合能源服务体系融合应用的研究。

因此,本文紧扣综合能源和综合服务两大任务,从供能、用能和服务三方面构建基于区块链技术的综合能源服务模型,分析综合能源服务主体节点的功能以及综合能源服务过程中节点间信息流与能量流的交互模式和协商共识机制,并基于多链构建以能源、电网(特指其包括电力综合能源服务公司和自有的售电公司)、售电公司(特指民营类型)、用户等不同类型节点间的区块链网络架构和链间交互通信链路,保障区块链支撑的综合能源服务体系协商机制运行的高效性、交易安全性和服务实时性。

1 综合能源服务场景分析

1.1 两大任务—综合能源与综合服务

为进一步完善能源互联网中综合能源服务的商业模式,构建多能互补下的“售电+综合服务”应用场景,以及打造以电为中心、跨域平衡、绿色智能的区域能源互联网体系^[16],需要以电网公司为研究对象,探讨电网转型的支撑技术与服务模式^[17],从而扩展综合能源服务业务,引导用户节能减排,形成以电网公司为主、民营售电公司为辅的综合能源服务公司体系,构建一个安全、稳定、可信的综合能源服务模式。

综合能源服务围绕供能、用能和服务三方面,是将能源销售服务、分布式能源服务、节能减排与需求响应服务等组合在一起的能源服务模式^[18],涉及综合能源和综合服务两大任务^[19],其基本特征是综合、共享、高效、互联和友好^[20]。综合能源和综合服务作为综合能源服务的两大任务。其中综合能源是由传统能源供应商依托传统能源供应的基础设施优势向以冷、热、电、气等多联供方向发展,实现多种能源相互转化、分配、存储和消费^[21],实现供能与用能多元化的新能源体系。综合能源对于提升能源利用效率和可再生能源应用比例具有重要意义。而综合服务是能源供应商向综合能源服务商转变,依托自身技术优势及配售电改革政策,形成一种新型的为满足终端客户多元化能源生产与消

费的能源服务商业模式，具体涵盖能源规划设计、工程投资建设、多能源运营服务、投融资服务、购售电业务、数据交互业务、设备诊断、能效检测等方面。二者共同构建了“以客户为中心、横向多源互补、提高综合能源利用效率”^[22]的综合能源体系，也是紧密遵循电力市场改革与能源结构转型的国家政策，更加强化电源端与电网侧的实时协同调度机制，优化和提升电网公司和民营售电公司的综合服务水平。

1.2 综合能源服务模式分析

良好的综合能源服务模式在推动电网公司转型，丰富电网公司业务类型的同时，需要鼓励用户参与电能服务交易，提高用户参与电能交易的积极性，实现可再生能源的高比例接入电网和促进大规模储能系统的发展。因此，本文基于综合能源服务两大任务主体的特点、功能以及角色定位，构建了综合能源服务模式，如图 1 所示。

综合能源服务模式着重研究各相关主体及其交互关系，主要分为综合能源层、综合服务网络层和综合服务业务层等 3 层，具体如下：

1) 综合能源层：由冷、热、电、天然气、石油构成的综合能源系统，围绕电能清洁高效的特点，推进其他能源与电能之间的单向转化和存储，

以及其他多能源之间的单(或双)向转化和存储^[23]，提高综合能源系统可靠性，提升效率，降低系统的碳排放，提升经济型^[24]，推动了用户侧对综合能源服务的需求，促进了综合服务业务的产生。

2) 综合服务网络层：根据综合服务的交易主体，可将网络中的节点具体分为能源、电网、售电公司、微网、储能和用户等几类，并围绕源、网、售、荷、储间信息和能量的交互，形成为用户提供综合能源服务的网络主体，构建以电网综合能源服务公司为主、民营售电公司综合能源服务部门为辅的综合能源服务体系。

3) 综合服务业务层：综合能源服务业务包括供电业务、设备维护、能效检测与节能设计、数据交易以及分布式能源服务(如电动汽车充电服务、光伏新能源服务、储能)等。其中：①供电业务：供电业务是综合服务业务的基础，最终实现用户更好的用电体验，输送更优质的电能，并制定更为合理的购电方案；②设备维护：将电网公司的业务逐渐向末端延伸，例如：将设备维护(与能效检测)的业务逐步扩展到工厂、居民小区、校园等；③能效检测与节能设计：对于部分大用户，可以申请让综合能源服务公司为其提供能效检测，通过检测了解其耗能设备的能源利用率，并为其出示相应的检测报

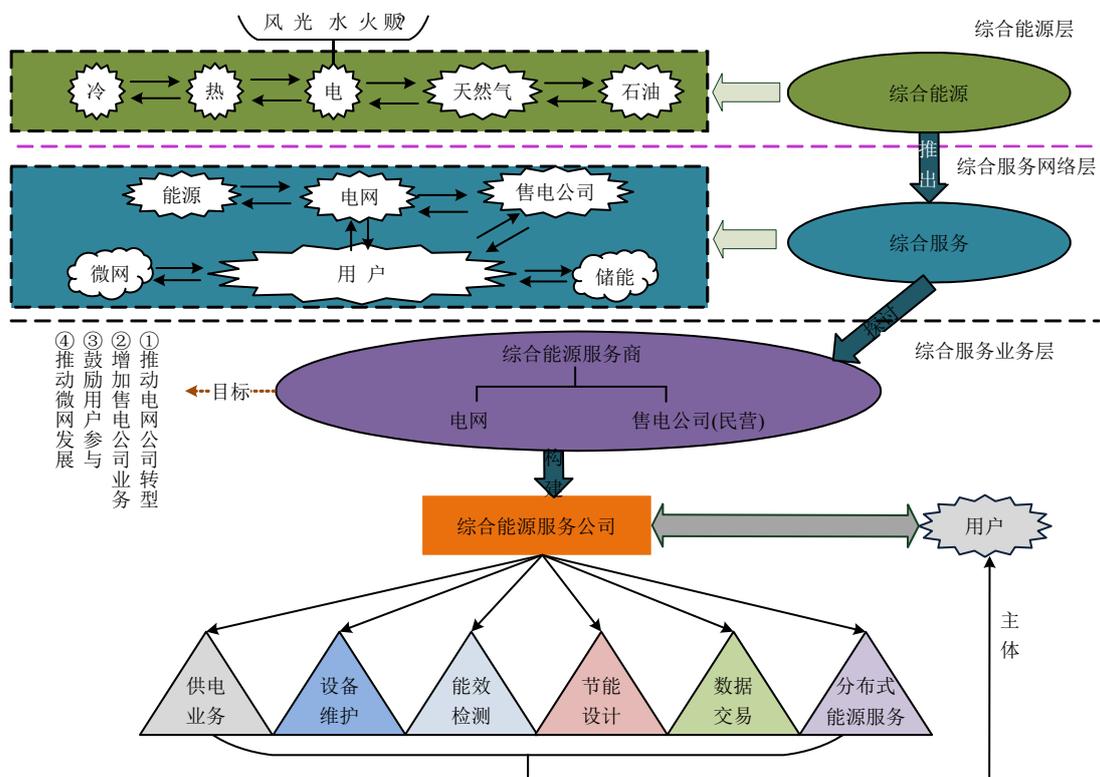


图 1 综合能源服务模式

Fig. 1 Integrated energy service model

告,同时告知节能空间并推荐节能设备,制定节能方案;④数据交易:包括各类用电数据和节能数据等可供交易的有价值数据;⑤分布式能源服务:以分布式光伏发电和就近能量交易为主。

2 基于区块链的综合能源服务模型

2.1 综合能源服务区块链网络架构

将区块链技术与可持续发展融合,是未来科技、金融发展的趋势^[25],而能源电力系统的发展是可持续发展最重要的指标之一。因此,在国内外大力发展分布式能源,提高可再生能源利用效率的背景下,将具有去中心化、防篡改、分布式记账功能的区块链技术应用于能源电力系统有重要意义。“售电+综合服务”作为综合能源服务中的重要实现模式,具有参与主体多、实施业务类型多、交易信息量大等特点,其在具体实施过程中存在服务方不可靠、交易信息不安全以及交易不可追溯等问题,而区块链分布式记账、防篡改的特点能够将“售电+综合服务”过程中全部的交易信息分布存储,降低了由交易信息量大导致的交易信息难以查询、信息泄露、交易不可靠以及交易漏洞的风险。同时区块链技术包括应用层、合约层、激励层、共识层、网络层和数据层6层模型^[26-27],可以很好的融入到综合能源服务中,其中:1)应用层支撑各类综合能源服务业务;2)合约层监督、记录各综合能源服务主体间具体合约的履行(通常为能源交易与增

值数据交易合约);3)激励层制定各综合能源服务主体参与交易的激励指标;4)共识层支撑各主体间高效快速达成切实可行的交易共识;5)网络层构建点对点的分布式综合能源服务网络架构;6)数据层实现综合能源服务数据的采集、计算、存储等底层运行支撑。因此,基于区块链技术实施综合能源服务,有利于保障交易的可靠性,促进能源互联网的安全稳定运行。

目前,已有的基于区块链的需求响应和分布式能源交易的研究主要基于联盟链或公有链^[28-29]的单链方式。但区块链技术在单链架构下存在性能、容量、隐私、隔离性、扩展上的瓶颈^[30],无法满足电力系统综合能源服务应用场景的充分实现。文献^[31]提出的基于哈希锚定的主从多链模型,以一条主链和多个从链的形式满足了多样化数字资产的分类及处理;Multichain是一种能够构建主-从类型多链的区块链技术^[32-33],可为企业建立独立可信的分布式账本,可以支撑多链技术的延伸。

综上所述,结合综合能源服务应用场景中源、网、售、荷对去中心化程度的要求不同,设计了多链技术支撑下的综合能源服务区块链网络架构,如图2所示。采用多链形式实现源-网-售-荷各主体内部的可信及协同自治,确保源-网-售-荷主体间信息公开、可信互联,进一步保障综合能源服务应用的可追溯性和安全高效性,深入研究综合能源服务场景与区块链技术的匹配性(其中,Multichain类

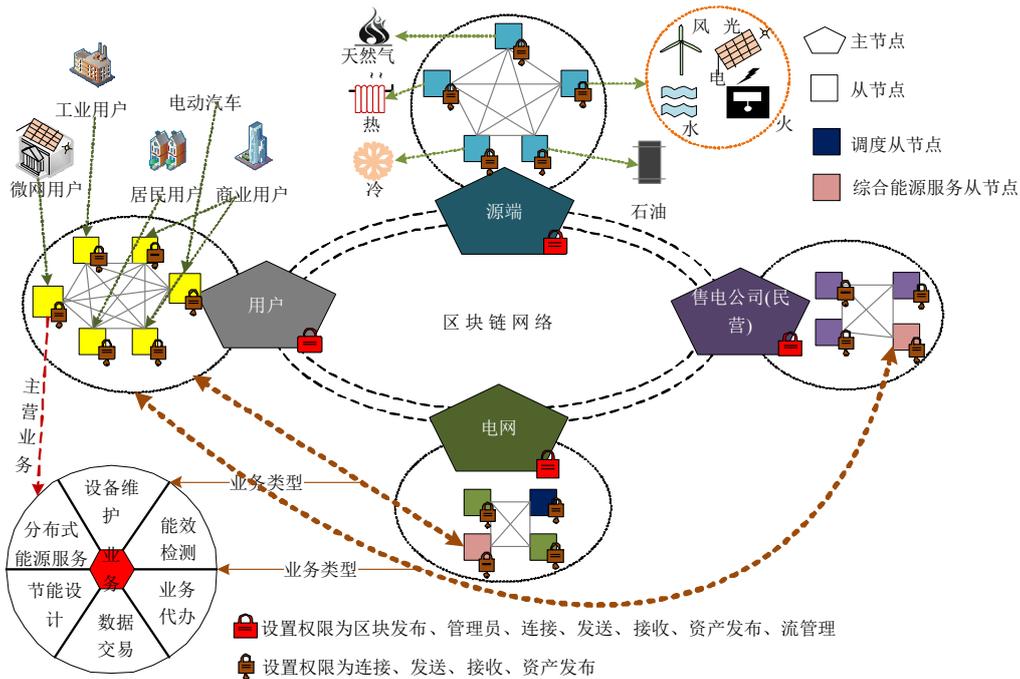


图2 综合能源服务区块链网络架构

Fig. 2 Network architecture of integrated energy service on blockchain

多链为私链，而多链由多重私链+联盟链的形式构成)。

由区块链技术支撑下的综合能源服务网络具有匿名性和公开性的双重特点，即实现匿名的交易双方节点互信，信息公开。图2所示的综合能源服务区块链网络架构以多链的形式实现信息互联。该网络架构具有能源、电网、售电公司以及用户4类主节点，其中，1) 能源节点包括冷、热、电、气、石油五种类型分节点，节点间进行能源互补，最终实现源节点协同；2) 电网节点具有调度、综合能源服务等多类功能，依据功能又可进一步进行划分；3) 售电公司节点主要考虑其综合能源服务功能；4) 用户节点又具体分为工业用户、商业用户、微网用户、居民用户以及电动汽车类储能用户等几种类型。

各主节点与其从节点间采用多链架构形成可信的“主-从”私有链模型，主节点间又采用联盟链的形式实现信息公开互联共享，其中综合能源服务衍生的数据保存在各从节点的私链中，各个私链又根据节点的类型连成主链。参考多链中对权限的定义规则，设置各主节点拥有所在主-从链的管理员权限，包括对主(从)链区块数的设定发布、连接交易网络中的其它主节点、上传交易需求及发布资产、下载接收其它主节点发布的交易信息、流管理的设置等；各内部从节点仅具有连接各自主节点、上传及下载接收交易信息、发布资产的权限(资产指交易的数据、结果等)。

在联盟链中，主节点主要负责管理、传输、存储的业务。当数据交易完成及资产发布后，主节点a广播交易数据资产并发送该资产至拥有查看权限的主节点b，主节点b接收该资产并内部广播至各从节点，拥有交易能力的从节点进行资产计算，反馈交易结果至主节点，由主节点b与交易需求主节点a进行交易的对接并由对应从节点执行交易。同时赋予政府监管权限，即政府拥有对各主节点交易数据查看的权限，可以随时查看并溯源。

区块链网络支撑着综合能源服务系统的安全高效运行，依据综合能源和综合服务两大任务分为两大部分。1) 综合能源部分：由于综合能源服务模式中以电力作为中心枢纽，故以电能作为主要分析对象，多种能源之间相互协调、共同整合，电网的调度节点承担着综合能源中电能传输的调度分配任务。对于某一时段多源端对电能供给的分配情况，用户主节点将电能需求整合传达给电网主节

点，通过其调度从节点的计算，由电网主节点与源端主节点进行电能协商，并通过源端各从节点协商确定供能的比例；对于大型工业用户与源端的直购电，由大型用户所在的用户综合服务从节点发送直购电请求，经由用户综合服务主节点与源端节点进行交易，而对于普通居民用户则由其所在区域的用户综合服务从节点进行电能交易方式的制定，并提交电能交易方案请求至用户综合能源服务主节点进行外部交易协商；在电能交易中源端需要与电网节点共同协商直购电中供电的具体比例，通过电网调度从节点制定电能调度方案并进行传输；2) 综合服务部分：由电网及其它民营售电公司的综合能源服务公司从节点为用户提供各类服务，另外各交易主体将自身的用电等相关数据打包进各自私链，并通过主节点进行数据交易。

2.2 综合能源服务链上交易模型

区块链技术便于开发者在底层开发平台的基础上开发出产品[34]。通过2.1节分析综合能源服务对去中心化程度的要求，发现基于区块链技术的综合能源服务模型并不适合采用单链或完全私有链的方式进行，因此，在研究Multichain技术的基础上，采用多链的形式，即多重私链+联盟链的模式，既保障综合能源服务对安全性、高效性、可靠性的需求，也使得整个综合能源服务场景开放共享。因此，为更好表现综合能源服务区块链网络架构的链间关系，构建了综合能源服务链上交易模型，如图3所示，其中 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 为各主链中区块形成的具体时间。

综合能源服务链上交易模型是基于图4所示的主-从多链模型，包括源端协同主-从多链、电网主-从多链、售电公司主-从多链以及用户综合服务主-从多链，形成由其主链互联即联盟链的形式，构成整个综合能源服务区块链信息交互网络，同时，给予政府监管权限，管控各主链间的服务交易信息的可靠性。

主要交易流程如下：

电网(及民营售电公司)广播服务信息至区块链网络，包括可供服务的类型、要求、价格等，各主(从)节点接收同步服务信息至各自主(从)链中；用户 i 从链计算所需服务要求，上传至其用户综合服务主链，主链整合一段时间(通常为15min)内的服务请求，按用户直购电业务、普通供电业务(从电网或售电公司处购电)、辅助服务业务3类进行划分，广播至全网；源端、售电公司和电网接收到所属业务类别的

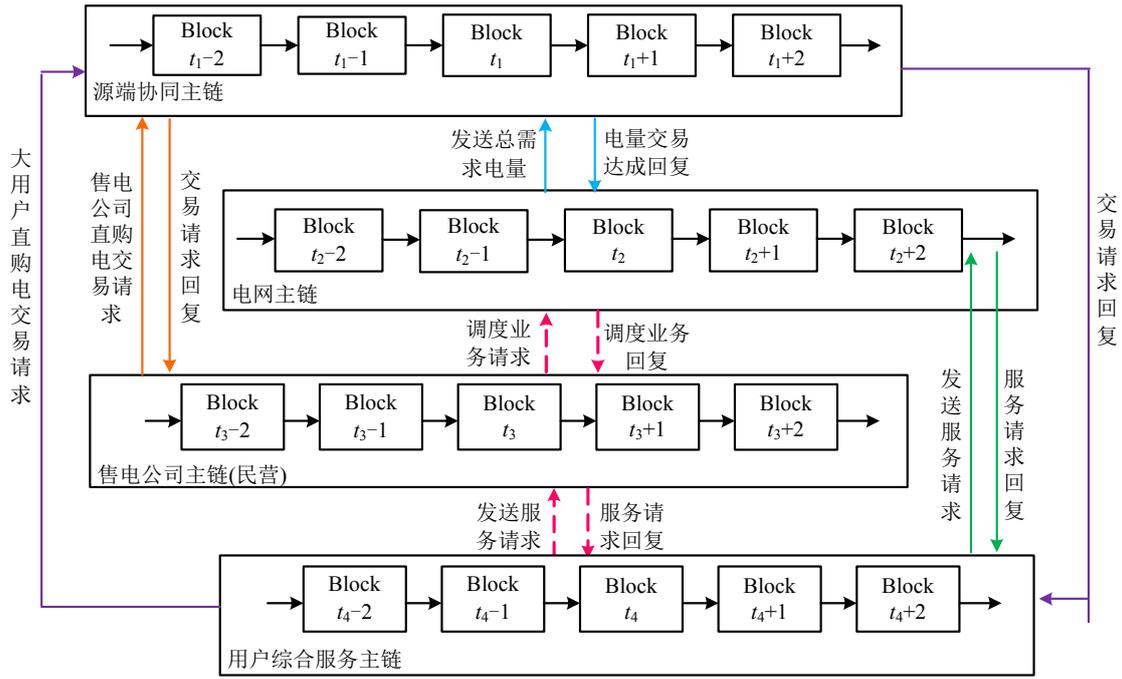


图3 综合能源服务链上交易模型

Fig. 3 Integrated energy service transaction model in the chain

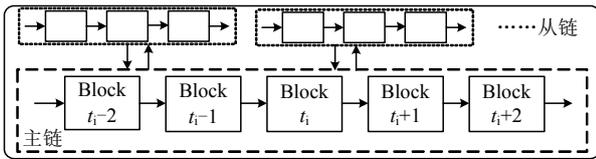


图4 主-从链结构模型

Fig. 4 Master-slave chain structure model

交易信息,由其主链判别并反馈是否接收服务请求,若接收该服务请求,整合服务交易信息,分发至执行从链,由对应的从链计算分析,将交易结果通过其主链广播至区块链网络,并由主链与服务主体进行交易对接;交易达成后记录并打包上链。

电网及售电公司作为综合服务执行的主体,其业务可分为供电业务与其他服务业务。供电业务作为主要服务业务,当用户从链发出供电业务请求,由用户综合服务主链整合同一时段电量需求信息广播至电网主链或售电公司主链,等待请求回复,交易达成需要电网主链(或售电公司主链)以及调度从链与源端协同主链达成电量、电价以及调度的一致性;若为节能设计、设备维护等其它服务业务,则由电网主链(或售电公司主链)以及其综合能源服务从链达成服务交易的一致性,最终每笔交易的执行,需要打包在各交易链中存储并广播。

3 综合能源服务业务模式与共识机制

3.1 综合能源服务业务模式分析

基于区块链技术的综合能源服务模型实现了

综合能源服务与区块链技术的高效融合,保障了综合能源横向多源互补,综合服务安全高效运行。但由于综合能源服务主体的多样性和服务业务的复杂性,需结合区块链技术深入探讨服务主体间信息交互的网络拓扑结构,以及交易达成所需的共识机制。为分析不同节点间业务的交互类型,构建了如图5所示的业务主体间能量与信息的交互关系。

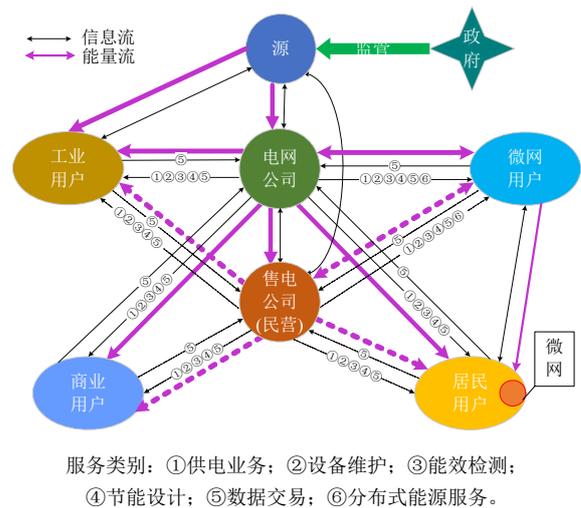


图5 综合服务业务交互模型

Fig. 5 Business interaction model about integrated service

图5中,业务①为综合能源服务的基础业务,该业务的流向与能量流相对应,而且业务①的发生也伴随着业务⑤的产生,业务⑤由电能交易的各类主体提供,作为电能交易预测的参考。综合能源服务公司向各类用户提供②③④类扩展业务,向微网

用户提供业务⑥等。

同时，按照主体功能的差异将源-网-售-荷主体间的信息与能量交互分以下几个方面：1)“源-网”主体间的交互：能量从源端通过电网输配至用户侧，源-网间进行电量、负荷、输配路径的协商；2)“源-售”主体间的交互：分担部分电网售电业务的民营售电公司既可以选择从电网公司购电，也可以选择从源端直购电，由电网进行输配；3)“源-荷”主体间的交互：工业用户(通常为 35kV 及以上的大工业用户)可以选择从源端直购电；4)“网-荷”主体间的交互：电网公司将电能输配到各类用户，同时微网用户可以将多余的电能出售给电网公司，而电网公司向各用户提供其他扩展业务；5)“售-荷”主体间的交互：与“网-荷”主体间的交互过程类似；6)“荷-荷”主体间的交互：为鼓励微网的发展，补充断电时段用户对电能的需求，减少微网售出电能远距离输配损耗，微网用户可将电能直接出售给周边用户。

3.2 综合能源服务共识机制

在综合能源服务系统中，首先在综合能源方面，多个源端应与电网公司的调度部门协商，确定电能调度供给的分配比例；售电公司或大型工业用户从源端处直接购电时，应协商确定其交易方案。其次，在综合服务方面，节点双方以点对点的交互模式协商达成方案。对于上述协商过程的实现，在基于区块链技术的底层架构中需要制定合适的主体间共识写入共识层中。目前，区块链技术主要应用 PoW(proof of work)^[35-36]、PoS(proof of stake)^[37-38]以及 DPoS(delegated proof of stake)^[39]等共识机制，其原理与综合能源服务中各个节点权限不同的特点相驳。因此，根据综合能源服务中各个节点的重要程度不同，基于 PoS 共识提出了适用于综合能源服务系统的改进共识机制 PoSS(proof of sharing-stake)。

在综合能源和综合服务中，二者对于共识机制的需求不同，综合服务虽然交互模式多，但基本上是点对点的协商与交易；而综合能源交互模式相对固定，主要是多主体协商与交易。因此，PoSS 共识根据综合服务与综合能源的不同特点分为 PoSS(a)点对点共识机制与 PoSS(b)多主体共识机制。

从综合服务方面考虑，采用 PoSS(a)共识旨在构建一个点对点的交互模式，交互双方在达成一致后

便可以完成相应服务。节点之间的交互按照交互主体的不同可分为如图 6 中的 B2B、B2C、C2C 三类。

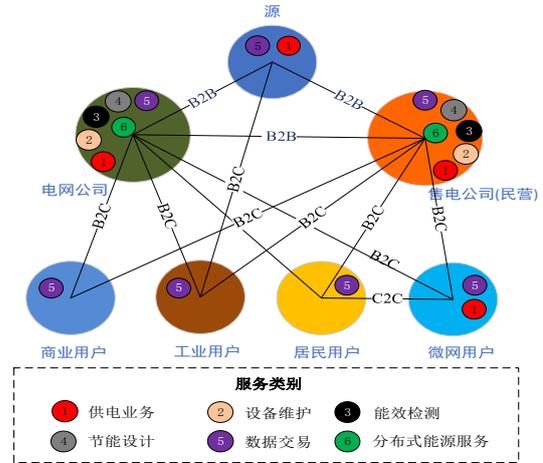


图 6 点对点共识网络

Fig. 6 Point to point consensus network

1) B2B 间的共识机制：源、网、售主体间的服务共识主要采用 B2B 的方式，交易主体间达成共识的内容分为能量交易和数据交易两大类。①对于能量交易，如售电公司的直购电交易，源端提供电能的供应，售电公司负责电能的消纳，二者达成双方许可的电能交易量后，即形成 B2B 的交易许可初步共识；②对于数据交易，各从节点将某一时段 T 内的用电数据和节能数据进行整合，分为可供交易的有价值数据和本地留存数据，然后将该周期内的所有数据进行哈希运算并建立哈希树，求得总哈希值；对于可供交易的有价值数据，进行哈希打包成区块后加入到该节点对应的私链并加密上传至其主链；将本地留存数据进行留底保存，打包存入各自私链。B2B 共识达成数据交易主要指源、网、售间对过去一段时间产生的可供交易的有价值数据进行交易共识的达成，点对点达成交易即可。如调度从节点可向源端太阳能电厂等从节点购买其一年内的售电及发电量等有价值数据进行下一阶段该电厂调度方面的预测等，有助于电网调度调整之后的调度方案，该数据交易的达成通过主节点传送信息从而确认。

2) B2C 间的共识机制：B2C 共识主要指网-荷、售-荷以及源-荷(直购电的大工业用户)主体间服务交易。电网、售电公司作为提供综合服务的主体与用户达成服务交易共识，包括电能交易、能效检测与节能服务、数据交易服务等。B2C 服务共识的实质是点对点服务。如小区级的居民用户从节点 a 需要提供全方位的节能协助服务，帮小区内住户改进用能设备，其提交服务请求由主节点广播至全

网络, 民营售电公司 b 的综合能源服务从节点下载并反馈接受服务请求的信息, 由双方主节点确认协商达成交易。对于数据交易, 同 B2B 采用相同的数据分类方法并将数据哈希后打包到从链, 利用主节点之间的交互实现数据交易。

3) C2C 间的共识机制: C2C 共识机制主要指微网用户为周边的居民用户提供电能以及双方有价值数据的交易的点对点许可共识。在进行电能交易的同时希望获得周边居民用户的用电数据和节能数据, 其中电能交易和数据交易方案都由交易双方自行拟定并通过主节点传递交易信息完成交易。

从综合能源方面考虑, PoSS(b) 共识机制旨在解决源端处供能分配的问题。PoSS(b) 共识的达成需综合考虑 n 个节点 ($n > 2$) 在一个时段 T 内的电能交易量 W 、提供的综合能源服务项数 N 、在具体某项服务中的贡献程度 D 、以及社会重要程度的系数 S , 进而去确定各个节点的投票权重值 V , 任何节点的投票权重值 V 不能超过 50%。按照以上要求给出了这些考虑因素下的数学描述, 用以计算各个节点的投票权重值 V , 其中 V_i 为 V_i' 的修正值。数学描述如下:

$$V_i' = \frac{S_i [\ln(W_i + 1) + (1 + D_i)^{N_i}]}{\sum_{k=1}^n S_k [\ln(W_k + 1) + (1 + D_k)^{N_k}]} \quad (1)$$

第 i 个节点的权重值修正后为

$$V_i = V_i' + \left[-\varepsilon(V_i' - 0.5) + \frac{\varepsilon(0.5 - V_i')}{n-1} \right] \times (V_{i\max}' - 0.5) \varepsilon(V_{i\max}' - 0.5) \quad (2)$$

其中:

$$\varepsilon(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于源端、电网公司、售电公司间的能源交互, 当多源端通过电网进行调度时, 各源端节点对于某一时段 T 的供电量分配需达成共识, 交易的源节点与电网公司调度节点进行协商后将方案广播至全网络, 源端所有节点以及电网公司调度节点根据 PoSS(b) 共识机制对时段 T 内的 W_i 、 N_i 、 S_i 、 D_i 进行统计, 依据式(1)和(2)计算参与投票的节点权重值 V_i , 并对该方案进行投票, 当得票率超过 50% 时, 该方案通过; 当得票率未超过 50% 时, 重新拟定方案再进行上传。如民营售电公司选择从源端处直购电时, 将两者协商的电能交易方案广播至全网络, 源端所有节点、电网调度节点及民营售电公司节点根据 PoSS(b) 共识计算参与投票的节点权重值 V_i ,

对该方案进行投票从而确定购电的方案。

4 模型可行性分析及验证

图 2 所示的综合能源服务区块链网络架构在运行场景上具有一定复杂度, 因此验证基于多链的综合能源服务模型的可行性成为实践研究方案的重点。本文在 Multichain 技术的基础上构建了主-从多链模型架构, 为简化模型验证所需的大量设备, 选取电网主-从多链进行节点可行性分析及验证。

配置网络环境如下:

下载配置 Multichain 演示文档, 基于 xampp 平台建立 PHP 的运行环境, 并进行软件配置以及区块链环境搭建。通过 3 台系统配置为 64 位 4G 运行内存的 windows 7 电脑来实现电网主-从多链的运行、连接、权限配置以及以资产形式进行信息的传递的模式, 验证模型单个主-从节点运行的可行性。

具体操作如下:

在 xampp 运行的条件下, 分别配置 3 台电脑的区块链网络环境, 通过命令窗口进行多链的创建及配置, 配置的 3 条链分别命名为 TestChain、Chain01、Chain02。选取 TestChain 链作为电网主链, 配置的电网主链的 IP 地址为 192.168.1.1, 并自动配置主链的端口, 设置 TestChain 为全节点链, 权限包括区块发布、管理员、连接、发送、接收、资产发布、流管理。同时配置另外两台电脑为电网从节点, 以调度从节点(链名为 Chain01, IP 为 192.168.1.2)和综合能源服务公司从节点(链名为 Chain02, IP 为 192.168.1.3)为例。两条从链分别通过指令 multichaind TestChain@ 192.169.1.1:6865 发出与主链 TestChain 互联的申请, 主链端接收指令完成互联并赋予从链连接、发送、接收、资产发布的权限。其中主链拥有节点的全部权限, 并具有配置从链权限的功能。主要操作如图 7—9 所示。

```
C:\Users\A>cd C:\multichain-windows-1.0.6
C:\multichain-windows-1.0.6>multichaind TestChain -daemon
MultiChain 1.0.6 Daemon (latest protocol 10011)
Other nodes can connect to this node using:
multichaind TestChain@192.168.1.1:6765
Node ready.
```

图 7 TestChain 的建立

Fig. 7 Establishment of TestChain

- 1) 多链节点的建立(以电网主节点为例)。
- 2) 从节点向主节点发出连接申请(以 Chain01 为例)。

3) 主节点接受申请并设置从节点权限。

其中，由 2.1 节可知，电网主链作为传递转发交易信息的主体具有与其他主链之间进行信息互传的功能。当从链需要传递信息时将需要传递的数据发送给主链，由主链进行传递，从链具有从主链端下载、上传信息的功能。

```
C:\Users\Administrator>cd C:\multichain-windows-1.0.6
C:\multichain-windows-1.0.6>multichaind TestChain@192.168.1.1:6765
MultiChain 1.0.6 Daemon (latest protocol 10011)
Retrieving blockchain parameters from the seed node 192.168.1.1:6765 ...
Blockchain successfully initialized.
Please ask blockchain admin or user having activate permission to let you connect and/or transact:
multichain-cli TestChain grant 1LWMWDLGbtz87UUU9GndFUZkGckRecTCw2QJZW connect
multichain-cli TestChain grant 1LWMWDLGbtz87UUU9GndFUZkGckRecTCw2QJZW connect,send,recv
C:\multichain-windows-1.0.6>multichaind TestChain@192.168.1.1:6765
MultiChain 1.0.6 Daemon (latest protocol 10011)
Retrieving blockchain parameters from the seed node 192.168.1.1:6765 ...
Other nodes can connect to this node using:
multichaind TestChain@192.168.1.2:6765
Listening for API requests on port 6764 (local only - see rpcallowip setting)
Node ready.
```

图 8 发出连接请求

Fig. 8 Issuing of a connection request

```
C:\Users\ab>cd C:\multichain-windows-1.0.6
C:\multichain-windows-1.0.6>multichain-cli TestChain grant 1LWMWDLGbtz87UUU9GndFUZkGckRecTCw2QJZW connect,issue,send,recv
{"method": "grant", "params": [{"id": "06439710-1552983003", "chain_name": "TestChain"}], "id": "06439710-1552983003"}
052b6c342c370916f3c6f921b414e460b25f6f2d41c141a0773d30f0ac46a8dd
```

图 9 设置从节点权限

Fig. 9 Setting the permissions of slave node

以 B2B 中电网节点与源端购电交易为例，当电网公司与源端协商想要达成电能交易过程中，电网主链接收到从链 Chain02 的资产信息并下载，开展电能资产交易时，与源端进行电能的交易，交易达成后，由从链 Chain01 进行调度计划的制定并提交调度方案资产至主链从而完成交易的完整制定。电网主-从多链内部的主要操作如图 10—12 所示(以 Chain01 调度请求为例)。

区块链信息			
区块链名称	节点IP	区块数	已连接的能源节点数量
TestChain	192.168.1.1:6765	70	2

主能源节点			
节点名称	节点IP	节点区块链地址	节点权限
Chain1-Label1	192.168.1.1:6765	19db2050d9pac5NMx0xjEjR0v7CwJZ3x	连接、接收、资产发布权限、流管理、区块发布权限、高级管理权限 - 修改

能源子节点			
节点名称	节点IP	节点区块链地址	响应时间
Chain02-提交节点	192.168.1.2:6765	1UJWMDLGS7z87UUU9GndFUZkGckRecTCw2QJZW	0.010 sec

图 10 主-从节点连接示意图

Fig. 10 Master-slave node connection diagram

- 1) 主链 TestChain 与从链 Chain01 连接显示。
- 2) 从链 Chain01 发布调度交易方案，主链 TestChain 接收调度方案并下载。

通过搭建主-从多链平台，并模拟电网主-从多链节点的连接及信息交互，能够验证基于多链的综合能源服务模型中单个主-从多链的可行性，即验证了区块链技术运用于售电+综合能源服务具有可行性，但本文基于区块链技术的完整综合能源服务平台的搭建，由于设备硬件的需求暂时无法完成，接下来将进一步完善模型场景的搭建，探究将区块链技术运用于综合能源服务所存在的障碍。

数字资产发布

发布者: 1WYVUVU2BCa3nf3cm8V45ca86jp2B1ByH

数字资产名称: 调度方案01

资产价值: 100

选择文件: 选择文件: config.txt

数字资产大小: 579 Byte

资产哈希值: 4b4086772c891060302b130d276c0952

发布时间: 2019-03-25

数据来源: 机器数据

所属区块号: 81

下载文件

发布资产

图 11 Chain01 发布调度方案

Fig. 11 Chain01 release scheduling scheme

发布者: 1WYVUVU2BCa3nf3cm8V45ca86jp2B1ByH

发布时间: 2019/03/25

2019/03/25

告知

序号	资产名称	数字资产价值	发布者	数字资产大小	资产哈希值	发布时间	数据来源	所属区块号	下载
1	调度方案01	100	Chain01 [1WYVUVU2BCa3nf3cm8V45ca86jp2B1ByH]	579 Byte	4b4086772c891060302b130d276c0952	2019-03-25	机器数据	81	下载文件

图 12 调度方案资产信息下载

Fig. 12 Scheduling scheme asset information download

5 结论

本文研究了基于区块链技术的综合能源服务运行模式，通过分析区块链技术的特点，及综合能源服务场景的需求，参考 Multichain 和主从多链的概念，采用多链的方式，构建了基于区块链技术的综合能源服务网络架构以及综合能源服务链上的交易模型，探讨综合能源服务区块链技术的匹配性，以“售电+综合服务”为主要研究点，从综合能源、综合服务两个方面深入研究，提出了适用于综合能源服务场景的 PoSS 服务共识机制，进一步探讨基于区块链的综合能源服务机制。同时，搭建基于 Multichain 平台的电网主-从多链模型，对单个主-从多链的实现进行了验证。而随着区块链概念的不断普及，区块链技术将长久快速地发展，以此为基础将进一步研究基于区块链的综合能源服务，使搭建的区块链网络更为清晰，高效地协调利用综合能源，使得提供的综合服务也趋向于多样化，并将链上的节点更为细化地分类，不断扩大研究的应用范围，为未来研究综合能源服务场景提供参考。

参考文献

- [1] 罗志坤. 加快建设“一先三优”国内领先综合能源服务公司[J]. 大众用电, 2018(4): 3-4.
Luo Zhikun. Accelerate the construction of “one first three excellent” domestic leading integrated energy service company[J]. Popular Utilization of Electricity, 2018(4): 3-4(in Chinese).
- [2] 张友良, 金振文, 程权. 综合能源服务:变革的风口[J]. 国家电网, 2018(4): 44-49.
Zhang Youliang, Jin Zhenwen, Cheng Quan. Integrated energy services: a vent of change[J]. State Grid, 2018(4): 44-49(in Chinese).
- [3] 王秀强. 国家电网为什么高调做综合能源服务商?[J]. 新能源经贸观察, 2017(11): 80-81.
Wang Xiuqiang. Why is the state grid a high-profile integrated energy service provider?[J]. Energy Outlook, 2017(11): 80-81(in Chinese).
- [4] 刘纪鹏. 坚持电力市场化改革助推能源互联网发展[J]. 中国电力企业管理, 2016(6): 40-41.
Liu Jipeng. Adhere to the reform of power marketization to promote the development of energy internet[J]. China Power Enterprise Management, 2016(6): 40-41(in Chinese).
- [5] 国网天津市电力公司电力科学研究院. 综合能源服务技术与商业模式[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 12-13.
State Grid Tianjin Electric Power Company Electric Power Research Institute. Integrated energy services technology and business model[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 12-13(in Chinese).
- [6] 封红丽. 国内外综合能源服务发展现状及商业模式研究[J]. 电器工业, 2017(6): 34-42.
Feng Hongli. Research on the development status and business model of comprehensive energy services at home and abroad[J]. China Electrical Equipment Industry, 2017(6): 34-42(in Chinese).
- [7] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网简述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 1-13.
Yu Xiaodan, Xu Xiandong, Chen Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 1-13(in Chinese).
- [8] 杨锦成, 骆建波, 康丽惠, 等. 区域能源互联网构架下的综合能源服务[J]. 上海节能, 2017(3): 137-146.
Yang Jincheng, Luo Jianbo, Kang Lihui, et al. Comprehensive energy service under regional energy internet structure[J]. Shanghai Energy Conservation, 2017(3): 137-146(in Chinese).
- [9] 蔡兴. 基于区块链技术的本地化云计算大数据应用发展[J]. 中国有线电视, 2018(2): 127-129.
Cai Xing. Development of localized cloud computing big data application based on blockchain technology[J]. China Digital Cable TV, 2018(2): 127-129(in Chinese).
- [10] 龚钢军, 王慧娟, 张桐, 等. 基于区块链的电力现货交易市场研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6955-6966.
Gong Gangjun, Wang Huijuan, Zhang Tong, et al. Research on electricity market about spot trading based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6955-6966(in Chinese).
- [11] 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.
Wu Geng, Zeng Bo, Li Ran, et al. Research on the application of blockchain in the integrated demand response resource transaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3717-3728(in Chinese).
- [12] 周国亮, 吕凛杰. 区块链技术在能源互联网中的应用[C]//2016 电力行业信息化年会论文集. 天津: 中国电机工程学会, 2016: 340-343.
Zhou Guoliang, Lü Linjie. Application of blockchain technology in energy internet[C]//2016 Proceedings of the Annual Conference on Power Industry Informationization. Tianjin: Chinese Society for Electrical Engineering, 2016: 340-343(in Chinese).
- [13] 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): 1278-1290.
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(5): 1278-1290(in Chinese).
- [14] 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.
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): 3672-3681(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3305.
Wang Weiliang, Wang Dan, Jia Hongjie, et al. Review

- of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305(in Chinese).
- [17] Hey C. Low-carbon and energy strategies for the EU the European commission's roadmaps: a sound agenda for green economy?[J]. GAIA-Ecological Perspectives on Science and Society, 2012, 21(1): 43-47.
- [18] Lei J, Xin Huanhai, Xie Jun, et al. Optimization of distributed energy systems taking into account energy saving and emission reduction[C]//2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing: IEEE, 2009: 1-6.
- [19] Mancarella P, Chicco G. Integrated energy and ancillary services provision in multi-energy systems[C]//2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control-IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid. Rethymno, Greece: IEEE, 2013: 1-19.
- [20] 韦丹, 黄金. 论“新电改”背景下综合能源服务市场的催生[J]. 人力资源管理, 2018(3): 311-312.
Wei Dan, Huang Jin. On the birth of integrated energy service market under the background of “new electricity reform”[J]. Human Resource Management, 2018(3): 311-312(in Chinese).
- [21] 李更丰, 别朝红, 王睿豪, 等. 综合能源系统可靠性评估的研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 114-121.
Li Gengfeng, Bie Chaohong, Wang Ruihao, et al. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 114-121(in Chinese).
- [22] 蔡世超. 智慧能源多能互补综合能源管理系统研究[J]. 应用能源技术, 2017(10): 1-4.
Cai Shichao. Research on hybrid energy management system based on intelligent energy resources[J]. Applied Energy Technology, 2017(10): 1-4(in Chinese).
- [23] 田园园, 廖清芬, 刘涤尘, 等. 面向综合能源供给侧改革的城市配网规划方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2924-2933.
Tian Yuanyuan, Liao Qingfen, Liu Dichen, et al. Planning of urban distribution network considering the integrated energy supply-side reform[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2924-2933(in Chinese).
- [24] Jarke J, Perino G. Do renewable energy policies reduce carbon emissions? On caps and inter-industry leakage[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2017(84): 102-124.
- [25] Nguyen Q K. Blockchain - a financial technology for future sustainable development[C]//2016 3rd International Conference on Green Technology and Sustainable Development(GTSD). Kaohsiung: IEEE, 2016: 51-54.
- [26] Neudecker T, Hartenstein H. Network layer aspects of permissionless blockchains[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 838-857.
- [27] Li C, Zhang L. A Blockchain based new secure multi-layer network model for internet of things [C]//2017 IEEE International Congress on Internet of Things (ICIOT). Honolulu, HI, USA: IEEE, 2017: 33-41.
- [28] 杨晓东, 张有兵, 卢俊杰, 等. 基于区块链技术的能源局域网储能系统自动需求响应[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3703-3716.
Yang Xiaodong, Zhang Youbing, Lu Junjie, et al. Blockchain-based automated demand response method for energy storage system in an energy local network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3703-3716(in Chinese).
- [29] 孙涵洁. 融合区块链技术和智能合约的能源互联网需求侧响应分析[J]. 机电信息, 2017(9): 64-65.
Sun Hanjie. Energy internet demand side response analysis of blockchain technology and smart contracts[J]. Mechanical and Electrical Information, 2017(9): 64-65(in Chinese).
- [30] Pony_chen. 联盟链多链与跨链的思考[EB/OL]. 2018 [2018-02-27]. https://blog.csdn.net/weixin_41545330/article/details/79383676.
Pony_chen. Thoughts on multi-chain and cross-chain of alliance chains[EB/OL]. 2018[2018-02-27]. https://blog.csdn.net/weixin_41545330/article/details/79383676(in Chinese).
- [31] 徐宇芹. 主从多链模型下的区块链共识性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
Xu Yuqin. Research on blockchain consensus mechanism performance based on master and slave multi-chain model[D]. Jinan: Shandong University, 2018(in Chinese).
- [32] 汪榆. 港口供应区块链中的多链簇集结构设计与研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
Wang Yu. Design and study of multi chain cluster structure in port supply block chain[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018(in Chinese).
- [33] Multichain[EB/OL]. 2018[2018-12-10]. <https://www.multichain.com/>.
- [34] 苏汉. 工信部发布《2018年中国区块链产业发展白皮书》[J]. 中国汽配市场, 2018(2): 15.
Su Han. Ministry of industry and information technology released “White paper on China's blockchain industry development in 2018”[J]. China Auto Parts Market, 2018(2): 15(in Chinese).
- [35] Keenan T P. Alice in blockchains: surprising security pitfalls in PoW and PoS blockchain systems[C]//2017

- 15th Annual Conference on Privacy, Security and Trust(PST). Calgary, AB, Canada: IEEE, 2017: 400-402.
- [36] Cho H. ASIC-resistance of multi-hash proof-of-work mechanisms for blockchain consensus protocols[J]. IEEE Access, 2018(6): 66210-66222.
- [37] Eyal I. Blockchain technology: transforming libertarian cryptocurrency dreams to finance and banking realities [J]. Computer, 2017, 50(9): 38-49.
- [38] 刘懿中, 刘建伟, 喻辉. 区块链共识机制研究: 典型方案对比[J]. 中兴通讯技术, 2018, 24(6): 1-7.
Liu Yizhong, Liu Jianwei, Yu Hui. Research on blockchain consensus: comparison of typical schemes[J]. ZTE Technology Journal, 2018, 24(6): 1-7(in Chinese).
- [39] 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, 47.
Zhang Yong, Li Xiaohui. The research and implementation of an improved blockchain's consensus

mechanism[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(1): 38-42, 47(in Chinese).



龚钢军

收稿日期: 2019-01-14。

作者简介:

龚钢军(1974), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为区块链技术应用、能源电力信息安全, gong@ncepu.edu.cn;

王慧娟(1994), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区块链技术应用、能源电力信息安全, wang594292080@163.com;

杨晟(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区块链技术应用、能源电力信息安全, yangsheng18hebut@163.com。

(责任编辑 乔宝榆)