

能源互联网中的区块链技术: 研究框架与典型应用初探

张宁¹, 王毅¹, 康重庆¹, 程将南¹, 贺大玮²

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川省 成都市 610200)

Blockchain Technique in the Energy Internet: Preliminary Research Framework and Typical Applications

ZHANG Ning¹, WANG Yi¹, KANG Chongqing¹, CHENG Jiangnan¹, HE Dawei²

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China. 2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610200, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Blockchain is a distributed sharing database technology. Its applications are in the ascendant in various fields. The characteristics of blockchain technique, decentralization, transparency, fairness and openness, are consistent with the spirit of Energy Internet. The blockchain technique would therefore substantially contribute to the implementation of Energy Internet. The basic principle and characteristics of blockchain technique were firstly introduced. The possible applications of blockchain in Energy Internet were then analyzed from three dimensions-function, entity and property. Four functions of blockchain, the measurement and authentication, trading, coordinating and financing, were elaborated on different entities of Energy Internet including generation, transmission, consumption and storage, from the prospective of energy, information and value. Four specific scenarios were designed to further illustrate its application, including authentication of carbon emission right, securing cyber-physical system, trading virtual power resources, and coordinating multi-energy system. Finally, the challenges of blockchain technique faced in the Energy Internet were summarized.

KEY WORDS: energy internet; distributed energy resources; multiple energy systems; cyber-physical system; blockchain; carbon emission right

摘要: 区块链技术作为一种分布式共享数据库技术在各领域的应用研究方兴未艾。区块链技术的去中心化、透明性、公平性以及公开性与能源互联网理念相吻合,其在能源互联网中的应用也将进一步推动能源互联网的建设。首先,介绍了区块链技术的基本原理和特性;然后,从功能、主体、属性等3个维度对区块链技术在能源互联网中的应用进行了归纳和分析,从能量、信息以及价值的角度,阐述了区块链技术对能源互联网中源、网、荷、储等不同主体在计量认证、市场交易、协同组织、能源金融不同环节中发挥的作用;在此基础上,以碳排放权认证、信息物理系统安全、虚拟发电资源交易以及多能源系统协同4个场景为例说明了区块链技术在能源互联网中的具体应用方式;最后,对区块链技术在能源互联网中面临的挑战进行了分析和总结。

关键词: 能源互联网; 分布式能源; 多能源系统; 信息物理系统; 区块链; 碳排放权

0 引言

2008年,随着比特币的发行及其创立者中本聪论文《比特币:一个P2P电子现金系统》^[1]的发表,比特币系统的底层核心技术——区块链,作为一种去中心化(开放式、扁平化、平等性,不具备强制性的中心控制的系统结构)数据库技术,开始进入人们的视野。

美国学者梅兰妮·斯万在其著作《区块链:新经济蓝图及导读》给出了区块链的定义^[2],指出区块链技术是一种公开透明的、去中心化的数据库。公开透明体现在该数据库是由所有的网络节点所共

基金项目: 国家杰出青年基金项目(51325702); 国家重点实验室自主课题(SKLD15M08); 清华大学自主科研计划资助(20151080418)。

National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51325702); State Key Lab funded Project (SKLD15M08); Tsinghua University Initiative Scientific Research Program (20151080418).

享的,并且由数据库的运营者进行更新,同时也受到全民的监管;去中心化则体现在该数据库可以看作一张巨大的可交互电子表格,所有参与者都可以进行访问和更新,并确认其中的数据是真实可靠的。

区块链最先的应用是实现货币和支付手段的去中心化,试图脱离本质为国家信用担保的法币体系,建立新的数字货币体系,如比特币的开发与应用。继比特币提出后,其他基于区块链的加密数字货币,如莱特币、狗币、瑞波币等数百种加密数字货币也相继出现^[3]。在金融领域,跨国大型金融集团诸如纽交所、花旗、纳斯达克等都在2015年以创投的形式进入了区块链领域,如分布式账本初创公司R3CEV的区块链金融项目,目前已吸引了包括摩根大通、汇丰、高盛、摩根斯坦利等25家跨国银行集团的加入^[4]。

由于区块链具有数据的透明性和可靠性,其应用也从单一的货币向不同类型的资产进行延伸,试图通过以创建资产价值的形式记录每次资产的交易,从而实现更宏观地对整个市场的去中心化。其具体应用包括智能合约、智能资产、去中心化应用、去中心化自治企业等。

区块链最核心的优势是因其透明、去中心化等特点保证了不同主体之间能够相互信任,进而极大减少了重塑或者维护信任的成本。于是,区块链技术可以进一步延拓到货币、经济和市场以外的领域,其潜在的应用领域包括选举、医疗、公证、版权,以及网络安全、汽车租赁、学历鉴定等。

自区块链概念提出以来,学术界对其展开了积极探索,为区块链广泛应用提供了重要的支撑。文献[5]针对目前名誉系统存在的安全漏洞,设计了一种基于区块链技术的能够用于多重网络的名誉记录系统。文献[6]则针对第三方采集大量用户信息而导致的个人隐私泄露等问题,提出了一种基于区块链技术的去中心化个人数据管理系统,使得用户能够拥有并控制自己的个人信息。文献[7]基于区块链技术提出了一种传感数据真实性保障方法,能够保证采样机器人在完成任务的同时,不受不当人为干预的影响。

能源互联网作为多种能源融合、信息物理融合、多元市场融合的“互联网+”智慧能源产物,也受到学术界和工业界的广泛关注。2016年2月,国家发改委、能源局和工信部共同发布了《关于推

进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》,试图建立“一种互联网与能源生产、传输、存储、消费以及能源市场深度融合的能源产业发展新形态”,实现“设备智能、多能协同、信息对称、供需分散、系统扁平、交易开放”^[8]。区块链技术本身就在革新传统的互联格局与模式,以保障信任为核心,促进交易、认证等多方面高效运行。同样地,区块链技术也将在能源互联网时代,促进多形式能源、各参与主体的协同,促进信息与物理系统的进一步融合,实现交易的多元化和低成本化。

本文首先简要介绍区块链技术的原理及特点,并分析区块链的特点如何体现能源互联网理念。在此基础上从功能、主体、属性等3个维度对区块链技术在能源互联网中的应用进行了归纳和分析,从能量、信息以及价值的角度,阐述了区块链技术对能源互联网中源、网、荷、储等不同主体在计量认证、市场交易、协同组织、能源金融不同环节中发挥的作用。然后,举例说明了区块链技术在碳排放权认证、虚拟发电资源交易、多能源协同和信息物理系统安全4种典型场景的应用。最后,指出了区块链技术在能源互联网中可能面临的挑战。

1 区块链技术

1.1 区块链技术原理

1.1.1 区块链的构成

区块链是由区块有序链接起来形成的一种数据结构,其中区块是指数据的集合,相关信息和记录都包括在里面,是形成区块链的基本单元。为了保证区块链的可追溯性,每个区块都会带有时间戳,作为独特的标记。具体地,区块由两部分组成:1)区块头,链接到前面的区块,并为区块链提供完整性;2)区块主体,记录了网络中更新的数据信息。图1给出区块链的示意图。每个区块都会通过区块头信息链接到之前的区块,从而形成链式结构^[9]。

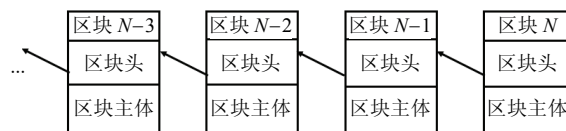


图1 区块链的组织方式

Fig. 1 Organization structure of blockchain

1.1.2 区块链网络

区块链网络是一个P2P网络,即点到点网络。整个网络没有中心化的硬件和管理机构,既没有中

心服务器，也没有中心路由器。网络中的每个节点地位对等，可同时作为客户端和服务端。

在区块链系统中，每个节点保存了整个区块链中的全部数据信息，因此，整个网络中，数据有多个备份。网络中参与的节点越多，数据的备份个数也越多。这种数据构架，各节点数据是所有参与者共同拥有、管理和监督的。一方面使得每个节点可以随意加入或者离开网络，而保证网络的稳定性；另一方面使得数据被篡改的可能性更小。

1.1.3 区块链的加密系统原理

区块链采用非对称加密算法解决网络之间用户的信任问题。非对称加密算法需要两个密钥：公开密钥(public key)和私有密钥(private key)^[10]。公开密钥与私有密钥是一对，如果用公开密钥对数据进行加密，只有用对应的私有密钥才能解密；如果用私有密钥对数据进行加密，那么只有用对应的公开密钥才能解密。

区块链中每个参与的用户都拥有专属的公钥和私钥，其中专属公钥公布给全网用户，全网用户采用相同的加密或解密算法，而私钥只有用户本人掌握。用户用私钥加密信息，其他用户用公钥解密信息。用户可用私钥在数据尾部进行数字签名，其他用户通过公钥解密可验证数据来源的真实性。

1.2 区块链技术的特点

区块链特殊的数据结构组织形式，使区块链技术具有 4 个主要特点^[3,8]：去中心化、透明化、合约执行自动化、可追溯性。

去中心化是指整个区块链网络中没有一个强制性的控制中心，网络中的每一个节点都具有相同的权利和义务，由于数据在较多节点互为备份，所以任意节点的数据损坏或者异常都不会影响整个数据系统的运行，即没有一个中心单元能够对数据进行单方面的操控，这使得基于区块链的数据储存具有较高的可靠性和鲁棒性。

透明化是指整个区块链系统的运作规则是公开透明的，区块链记录的信息在多个节点进行冗余备份，信息的更新需要多个节点共同认证，于是节点之间的数据交换是去信任的，某一节点不能欺骗其他节点。

合约执行自动化是指通过区块链可以设定一系列的写入软件代码的智能合约，在智能合约中规定合约中每一方需要履行的义务及合约执行的判

定条件，区块链系统对合约执行条件的自动判断，当所有判定条件都满足时，区块链系统将自动强制执行合约条款。这一方面提高了合约执行的效率，更重要的是在没有强有力的第三方监督下有效保障了合约的执行。

可追溯性是指加入到区块链中的记录被永久存储，区块链中的每一笔交易记录中均绑定了交易者信息，交易标的完整传递路径能够被完整记录和追溯，不可被摧毁或篡改。为交易的监管带来了便利。

1.3 区块链技术中的能源互联网理念

区块链技术的特点与能源互联网的理念在一定程度上具有相似性(参见表 1)，具体叙述如下。

表 1 区块链技术与能源互联网理念
Tab. 1 Blockchain technique and energy internet philosophy

特点	区块链技术	能源互联网
去中心化	所有节点权利义务对等	各主体平等分散决策
协同自治	所有节点共同维护	不同形式能源高效协同
市场化	无需第三方的信任机制	多元化的能源市场
智能合约	能够自动执行合约	自动化交易无处不在

1) 区块链和能源互联网都体现了去中心化的思想。区块链系统中，不存在中心化的数据库，每个节点都保存了区块链的全部信息，权利和义务对等；能源互联网中分布式能源和微电网将成为重要的组成部分，“消费者即生产者”，强调个体之间平等进行能源的分享。

2) 区块链和能源互联网都体现了自治协同性。区块链系统由网络中的所有节点运行和维护，不存在统一的管理机构；在能源互联网中强调系统的自调度和生态化运行。

3) 区块链和能源互联网都能够促进建立市场化与金融化平台。利用区块链技术能够建立公平开放的市场机制，同时可以很好地服务于其他金融产品的交易；能源互联网中则强调建立开放的能源市场，也将促进能源的金融衍生品的形成。

4) 区块链和能源互联网都具有智能化、合约化的趋势。区块链系统中可以通过智能合约或“可编程货币”来实现合同执行的自动化和智能化；能源互联网中将存在大量的智能发、输、配、用以及储能设备，需要通过一系列的智能合约保证能源系统的交易等的自动执行。

1.4 区块链在能源互联网中的实践

目前,国内外已有少数公司开始探索并实践区块链技术在能源互联网中的应用,下面将简要介绍几个区块链技术在能源互联网中应用的实例。

美国的能源公司 LO3 Energy 与比特币开发公司 Consensus Systems 合作,在纽约布鲁克林 Gowanus 和 Park Slope 街区为少数住户建立了一个基于区块链系统的可交互电网平台 TransActive Grid。平台上每一个绿色能源的生产者和消费者可以在平台上不依赖于第三方自由的进行绿色能源直接交易^[11]。

美国公司 Filament 在澳大利亚内陆的电网节点上实验性地布置了一套被称作“taps”的检测装置,并基于区块链系统为这些检测装置建立了相应的通讯机制。“taps”检测装置可以检测电网节点的运行状态,并可以将信息传送给 200 英尺外的下一个检测装置。所有的用户都可以通过电话、平板电脑和个人电脑连接这些装置,并在区块链系统上发布和共享数据信息。最终,政府、媒体、电网维护公司,以及消费者都将获得这些信息^[12]。

欧盟 Scanergy 项目旨在基于区块链系统实现小用户绿色能源的直接交易。该项目设想在交易系统中每 15min 检测一次网络的生产与消费状态,并向能源的供应者提供一种类似于比特币的 NRG 币作为能源生产的奖励,该项目目前尚未投入实际运行^[13]。德国的电能供应商 RWE 正在研究基于区块链的电动汽车充电站的收费模式^[14]。

由以上实例可见,目前已有的关于能源互联网中区块链应用的项目,仅有小部分投入实际运行的项目,尚在小规模的实验探索过程中,大部分仍然处于概念阶段。

2 区块链技术在能源互联网中的应用维度

2.1 区块链技术应用维度分析

区块链技术核心功能就是不依靠中心或者第三方机构,保障数据的真实可信,打破信任壁垒,极大降低了业务开展需要支付的信任成本,促进业务的高效开展。区块链的技术特征与能源互联网的理念吻合,使区块链有潜力成为未来能源互联网中重要的技术解决方案之一。如图 2 所示,区块链技术在能源互联网中的应用可以从功能维度、对象维度和属性维度等 3 个方面进行归纳和分析。

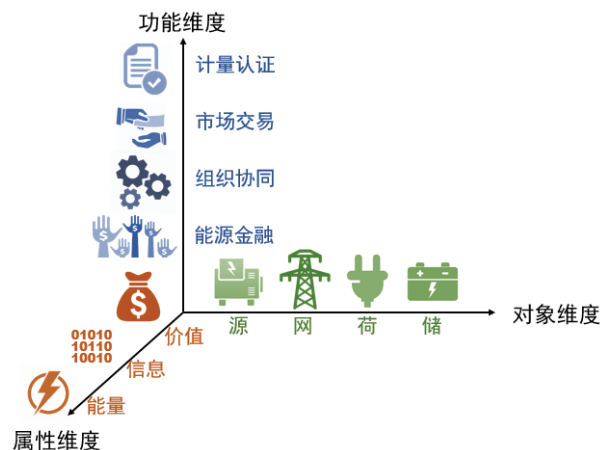


图2 区块链技术在能源互联网中的应用

Fig. 2 The applications of blockchain in energy internet

在功能维度主要包括计量认证、市场交易、组织协同、能源金融四个方面;对象维度则可以分为源、网、荷、储等多个能源生产、传输、存储、消费环节;属性维度主要包括能源互联网中的能量流、信息流和价值流。

2.2 功能维度

区块链去中心化数据存储的模式与技术,使其天然地包含透明性与可追溯性,因此十分适用于对认证及交换等原先需要第三方进行组织及担保的场合。区块链在机制上能够实现可信任与自组织,因此不需要第三方机构的存在,对“互联网思维”下的未来能源系统中具有重要意义。具体而言,在能源及排放的计量认证、能量及其衍生产品的市场交易、多能源形式多主体的组织协同、能源融资等方面将发挥巨大作用。

计量认证是能源互联网实现开放与公平的重要基础。能源互联网涉及到广泛繁杂的市场交易,除现有的能量交易之外,还可能涉及辅助服务、排放等交易甚至金融交易,因此需要可信任的计量以及权威的认证。区块链的分布式的“记账”的原理以及全系统公共认证在机制上保证了数据不能进行私自篡改,保障了计量和认证的权威性,因而能够在能源互联网的计量和认证方面发挥重要作用。例如,区块链能够为绿色证书或碳排放配额提供公证、公开的计量平台,能够被用于能源互联网中进行跨能源系统的计量及认证。区块链还能智能电表或电力系统 PMU 的数据提供记录平台,能够通过公共验证机制降低坏数据比例,保障数据可信度。

市场交易是能源互联网生态化的主要手段。建

立多方位的市场机制和创建多元化的商业模式, 促进各能源主体的广泛参与和公平竞争是能源互联网生态化的重要体现。未来能源互联网的交易是多元化的, 而区块链在交易方面的应用具有独特的优势。首先, 区块链中所有交易的清算由系统中的所有节点共同分担, 无需中心化的交易机构组织, 极大降低了交易成本; 其次, 区块链中信息可以实现公开透明, 并且真实可信, 能够实现信息的对称性以及市场的有效性; 再次, 区块链中每一个节点都备份了系统中的全部数据, 交易记录无法被篡改, 保证了交易系统的安全可靠; 最后, 在区块链中可以签署智能合约, 将在条件达成后强制自动执行, 保障了合约的执行力与可靠性, 有利于交易市场的公平可靠。例如, 随着售电市场的改革, 基于区块链的电力零售商与发电厂商双边交易将更加高效透明; 分布式新能源的渗透使传统的用户实现从消费者到生产消费者(Prosumer)的转变, 基于 C2C 的能量微交易也可以在区块链交易平台上实施。除能量交易之外, 区块链的公开透明也将保障辅助服务交易、碳交易等的高效执行。

组织协同是能源互联网提高运行效率, 促进新能源消纳的重要保障。能源互联网的能源形式不再局限于电能, 而是包含电、热、气等多种能源, 参与主体不再局限于“发输配用”, 而囊括了储能运营商、售电商、能源代理商等众多参与者。在合理的机制下, 促进多能源形式, 多参与主体的分布式组织协同需要两个条件: 一是利益的合理分配, 以提高所有人参与的积极性; 二是保证信息交换的真实可靠性, 实现协同的高效性。区块链技术一方面能够通过公开透明的计量保证各方利益的合理分配, 另一方面能够保障信息的可信性。例如, 不同能源主体开展去中心化的协同优化运行, 区块链系统可以完整记录多能源系统中所有能源主体的运行状况以及能源边际成本。系统中所有节点都可以根据自己的需求做出相应的最优决策, 可以在利益驱动下达到自组织生态化运行的目的, 能够在更大的空间内优化系统运行, 实现能源的高效利用。

能源金融是能源互联网建设的重要延伸。吸引各方资本的注入将进一步加快能源互联网的建设, 而众筹等创新的商业模式也成为能源互联网融资的新渠道, 实现了能源互联网的高效快速建设。利用区块链进行能源众筹, 为初创企业的信用提供背

书, 无需作为中介的第三方, 极大降低了融资成本, 并且使得投资者能够按时得到企业分红, 保证了投资者的权益。例如, 分布式光伏的众筹, 通过资产的金融化, 实现资产的自由交易, 而光伏发电收益也可以通过区块链技术直接反馈给投资者。输配电线路等其他能源资产的证券化和金融化, 也可以在区块链平台上进行高效的融资与交易。

2.3 对象维度

传统能源系统呈现源、网、荷界限清晰的结构, 而未来能源互联网中将引入大量的储能技术, 同时源、网、荷的界限逐渐模糊, 在不同能源系统中的耦合性逐渐增强。源、网、荷、储的互联网化对传统的运行和交易机制都带来了极大的挑战。而区块链对等以及去中心化的特质, 能够为源、网、荷、储的互联网化发展提供关键的技术支撑。

在源端, 能源生产在原有集中式常规机组和大规模新能源发电的基础上, 将接入更多的分布式新能源, 系统调度运行也将逐步从集中式走向分布式。区块链技术具有去中心化的特点, 采用基于区块链的调度系统能够实时共享电力系统各节点的电力供需信息以及实时价格, 各机组根据区块链的共享信息自主确定发电出力, 能够实现生态化的调度运行。此外, 大规模新能源接入将极大提升辅助服务市场的需求。区块链能够为电力辅助服务提供开放公平的记账与交易平台, 能够实现风火打捆、风储联合调度中的辅助服务的工作量证明与自动成本补偿, 也能为更多资源(例如电动汽车、需求响应等)参与辅助服务的认定和结算提供便利。

在网侧, 载有大量的能量流和信息流。在能量流方面, 需要对通过网络传输的能量进行准确的计量, 还要保证能量流的合理分布以保障能源系统的安全稳定; 在信息流方面, 需要保证系统状态信息的可靠性, 并能够综合各种信息对全局能源系统进行评估。区块链技术通过保证信息的可靠性和透明性, 能够对能量流和信息流进行可靠计量。例如, 开发基于区块链的多网络(电网、气网、热网)的状态估计平台, 对其进行检测和估计。区块链技术通过打破网络之间的隔阂, 采用统一的能量计量手段, 多能源系统协同消除网络阻塞。区块链技术还能够为物理输电权以及金融输电权提供灵活和开放的交易平台。

在荷端, 一方面负荷形式呈现多样化, 分布式

新能源、用户需求响应、电动汽车等新型负荷参与其中,而不同类型负荷具有不同的用电行为和调节能力;另一方面售电侧市场逐步建立,用户从接受电网单一垄断价格变为自主选择售电公司供电,另外用户还可以调节自身用电行为,参与到不同的能源市场。区块链技术在交易和计量方面的独特优势能够促进负荷侧深度参与到与能源系统的互动中。例如,能源供应商的自由切换与结算需要透明可靠的售电计量服务平台。区块链可对供电信用进行认证,并提供交易平台。

在储能侧,分布式的储能系统和集中的大规模储能系统将在未来电力系统的调峰、调频等方面具有重要作用。区块链的信息透明机制能够促进储能对整个能源系统的贡献,进行合理透明的计量和认证,充分调动分散式和集中式的储能参与市场积极性,为能源系统高效清洁的运行提供辅助服务,并获得相应的回报。例如:基于区块链 P2P 的特点,系统能够实时发布所需的调峰调频备用,而分布式储能能够自行决定不同时段提供多少服务,实现储能的自调度,促进分布式能源的协同工作。

2.4 属性维度

区块链本质上是分布式数据库技术,数据库中存储的对象不仅可以是比特币等“价值”量,还能够存储其他需要进行注册、认证、追溯、交易或共享的量,例如所有权、生产流程、控制信号、版权甚至健康档案。能源互联网是集成能量、信息以及价值的网络,其中信息流和物理流深度融合、双向流动,开放扁平的能源系统将孕育自由多元化的能源及其衍生产品市场,进而带来复杂多元的“价值流”,区块链能够在能量、信息以及价值 3 个方面支撑能源互联网的运行。

对于能量流,除了传统的电力系统中的电力流,还融合了热、气等多种形式的能源,打通各种能源形式的壁垒,实现多种形式能源的融合与协同需要去中心化的调度协调平台,而区块链可靠的数据系统与认证机制能够将不同能源系统中的能量的计量统一化、交易标准化,为打破多能源计量壁垒,实现多能源协同等提供支撑。

对于信息流,一方面来自高级量测体系(AMI)、SCADA 系统、PMU 单元等的数据将会被实时采集和传输,用于对整个能源系统的状态进行检测和评估;另一方面,为了促进不同主体协同优化的调度

指令、分布式优化结果反馈等信息也将在能源系统中实时传播和交换。这两类信息流安全对能源系统的安全稳定和经济运行至关重要。而利用区块链可以确保信息的准确无误不可篡改,实现能源系统数据的集体维护,保障用户隐私,保证数据可靠性,从而实现整个信息物理系统的安全。此外,用户的用电数据被广泛采集,里面包含了大量的用户信息,涉及到用户的隐私,用户也会切换不同的售电商,利用区块链的加密技术能够保证用户的用电数据只能被特定的人获取,并能够可靠的保存,既保障信息安全又保护用户隐私。

能源互联网能量流和信息流中还附带丰富的价值流,例如火电机组发出的电力带有碳排放标签,而可再生能源机组出力能够被赋予绿色证书;另一方面,为了能源资产可以进一步金融化,通过众筹、股权交易等手段,使得未来的能源系统中将包含更多的金融信息价值流。这些价值流都需要精确可靠的计量以及促进高效交易的多边信任,而区块链能够提供可靠协同的数据存储结构,使得价值流能够被准确计量,提供无需第三方的信任。例如,可以利用区块链技术,构建碳排放或绿色证书追溯、计量、认证与交易的平台;又如售电公司与用户之间的交易通过比特币等形式进行结算,逐步取代传统的资金流,极大降低电费催缴成本和支付延迟,实现电费自动计量与扣除。

3 区块链技术在能源互联网中的典型应用

本节将通过碳排放权认证、信息物理系统安全、虚拟发电资源交易,以及去中心化的多能源系统协同 4 个典型场景来介绍区块链技术在能源互联网中的具体应用。

3.1 碳排放权认证

在能源互联网中,随着对可持续发展的重视和对节能减排要求的提升,联合国政府间气候变化专门委员会 1997 年通过《京都议定书》,确立了二氧化碳排放权(简称碳排放权)的认证及其交易机制。碳排放权一种可交易的,能兑现为货币的凭证。顾名思义,碳排放权是对各行业二氧化碳排放的一种分配和计量方式。政府有关部门会结合我国碳减排目标,根据各行业排放情况,对产生排放的各主体分配一定配额的碳排放权^[15]。排放超过配额的主体要被处以罚款。多产生的碳排放需要通过额外购买

排放权的方式抵消, 排放权有余额的参主体可以将多余部分转移给排放超额的主体, 从而获取利润。电力系统是碳排放的大户, 将是碳交易的活跃部门。此外, 绿色证书的认证和交易也具有类似的机制^[16]。

目前, 碳排放市场中存在一系列商业模式的挑战和需求, 主要包括:

1) 政府部门需要对每一个发电商进行碳排放配额认证, 发电公司数量繁多, 使得绿色证书认证工作量巨大。因此, 需要一个自动化、智能化的认证机制;

2) 政府部门需要对所有发电公司上交的排放配额进行追溯, 确保其真实性。碳排放权的频繁交易使得其追溯过程及其复杂。因此, 碳配额的数据记录应可追溯, 并且不能篡改。

区块链能够为碳排放权的认证和碳排放的计量提供一个智能化的系统平台, 如图 3 所示。具体而言, 采用区块链技术搭建碳排放权认证和交易平台, 给予每一单位的碳排放权专有 ID, 加盖时间戳, 并记录在区块链中。发电企业每台机组的发电排放实时向区块链进行更新; 区块链系统将根据发电公司的机组排放情况, 采用智能合约方式自动确认碳排放权消耗量; 碳交易时, 每当碳排放权发生一次所有权转移, 交易信息即记录在区块链中, 并且不可篡改; 区块链系统自动对超标排放的企业进行罚款。

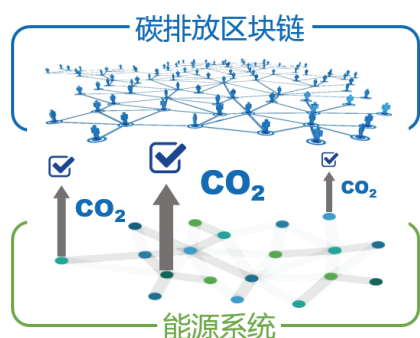


图 3 区块链技术在碳排放权认证方面的应用

Fig. 3 The application of blockchain in carbon emission permits certification

该系统具有如下特点:

1) 可追溯性。区块链系统可以保证每一单位的碳排放权的来源以及交易路径能被追溯根源, 确认其存在及交易的合法有效。此外, 根据碳排放的交易的路径, 还能够计算碳排放在电网中的流动情

况, 为碳排放流的计算提供基础数据^[17];

2) 不可篡改。每家发电企业的每台机组的发电属性不可更改, 保证了碳排放量与常规碳排放机组发电量相匹配。因此, 发电公司如果想保证一定范围内的碳排放量, 必须有效控制单位电量碳排放, 或增加绿色发电机组出力;

3) 数据公开透明。使得用户可查询和确认发电企业的发电规模及其碳排放属性, 在信息对称的条件下实现对电能供应商的选择, 在用户侧保证了碳排放权分配的公平合理;

4) 自动化与智能化。区块链上可记录智能合约, 自动实现碳排放的计量认证, 以及确认配额是否被使用。如果企业和用户的碳配额数量满足要求, 则智能合约条件满足, 达到政策要求; 否则条件不满足, 智能合约将自动执行罚款, 由此可保证政策的执行力。

3.2 信息物理系统安全

信息与物理系统的融合是能源互联网的重要特征之一, 有利于物理系统的实时态势感知与快速决策, 有效提升能源系统的运行效率, 准确的信息将指导物理系统进行合理的决策, 然而一旦信息系统损坏或受到攻击, 错误的信息可能会为实际物理系统带来灾难性的影响^[18]。

在未来能源互联网中, 保障信息物理系统的安全存在一系列的挑战与技术需求, 主要包括:

1) 为了保证信息系统的安全, 目前能源互联网中重要信息均是通过内网传播和交换, 对于 AMI 等数据则采用载波通讯, 前者增加了网络建设成本, 后者信息传播容易受到干扰和攻击;

2) 目前信息安全系统还没有主动防御攻击的完整解决方案。目前, 主要利用数据挖掘技术对可能包含坏数据或者攻击信息的数据进行识别和修正。针对某一特定攻击问题需要构建具有针对性的模型, 不具有普适性。

区块链去中心化的本质有助于解决物理信息系统中面临的部分安全问题, 如图 4 所示。具体而言, 可将区块链作为能源互联网中信息系统的底层。在感知执行层安全上, 每个传感器都有自己固定的私钥, 并在每次向全网广播数据时, 在数据包末尾添加用私钥加密的数字签名, 这使得攻击者试图伪造传感器数据欺骗网络中其他节点变得非常困难。网络中, 只有得到授权的节点才能获取其他

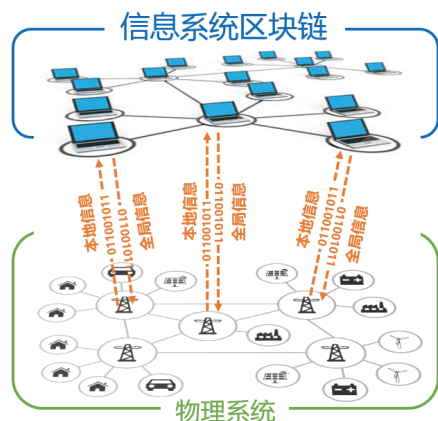


图4 区块链技术在信息物理系统安全中的应用

Fig. 4 The application of blockchain in the security of cyber physical system

节点和传感器的公钥,因此攻击者如果没有公钥将无法解密网络中传输的数据。在数据传输层上,系统中节点链接成网状结构,使得数据通路存在冗余。即使攻击者阻断了网络拓扑中的部分数据通路,信息仍然可通过其他数据通路进行传输。在应用控制层上,区块链系统中所有用户的个人信息具有绝对隐私,因此也不存在隐私泄露问题。

该系统具有如下特点:

1) 抗攻击性。如果攻击者试图篡改区块链数据库中的数据,由于区块链系统的去中心化特点,攻击者无法攻击集中式数据库。由于全网中的所有节点都有数据库的完整备份,存在大量的数据冗余,因此攻击者必须控制系统中至少51%的数据节点才能实现数据篡改,这使得数据篡改的成本大大增加,数据被篡改的可能性大大降低;

2) 数据保密性。区块链采用非对称密钥加密技术,破解条件苛刻,大大增加了攻击者攫取用户个人隐私的难度。即使系统各节点拥有全部的数据,也只能访问其权限内的数据,无法访问保密的数据。

3) 自我修复韧性。系统中每个节点都写入了区块链数据的完整备份,即使系统中部分节点和通路受到攻击而瘫痪,也可以保证系统中的特定节点通过其他通路重构所需信息。

3.3 虚拟发电资源交易

随着能源互联网的发展,众多分布式电源,如分布式风电,分布式光伏发电等,将并入大电网运行。但是分布式电源容量小,并且出力有间断性和随机性。通过虚拟电厂广泛聚合分布式能源、需求

响应、分布式储能等进行集中管理、统一调度,进而实现不同虚拟发电资源的协同是实现分布式能源消纳的重要途径^[19]。在未来的能源互联网中,虚拟发电资源的选择与交易应满足公开透明,公平可信,成本低廉的要求。

在虚拟发电资源交易的愿景中,存在一系列商业模式的挑战,主要包括:

1) 虚拟电厂的交易缺乏公平可信、成本低廉的交易平台。虚拟电厂之间的交易以及虚拟电厂与其他用户的交易成本高昂,难以实现社会福利最大化;

2) 虚拟电厂缺乏公开透明的信息平台。每家虚拟电厂的利益分配机制并不公开,分布式电源无法在一个信息对称的环境下对虚拟电厂进行选择,增加了信用成本。

区块链能够为虚拟发电资源的交易提供成本低廉、公开透明的系统平台,如图5所示。具体而言,基于区块链系统建立虚拟发电厂信息平台和虚拟发电资源市场交易平台,虚拟发电厂与虚拟发电资源可以在信息平台上进行双向选择。每当虚拟发电资源确定加入某虚拟电厂中时,区块链系统将为两者之间达成的协议自动生成智能合约。同时,每个虚拟发电资源对整个能源系统的贡献率即工作量大小的认证是公开透明的,能够进行合理的计量和认证,激发用户、分布式能源等参与到虚拟发电资源的运作中去。在区块链市场交易平台中,虚拟电厂之间以及虚拟电厂和普通用户之间的交易,可

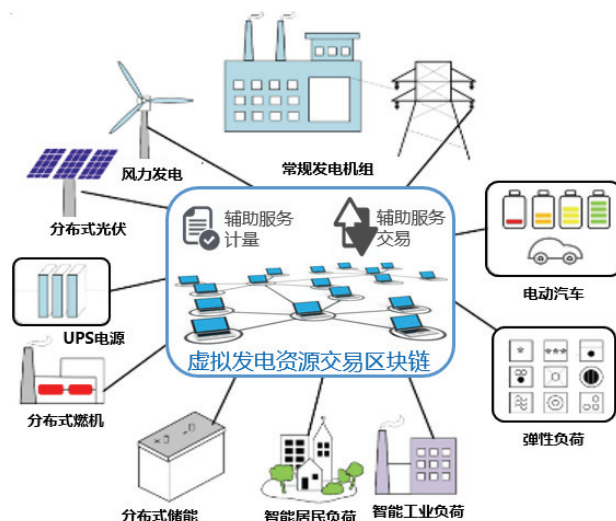


图5 区块链技术在虚拟发电资源交易方面的应用

Fig. 5 The application of blockchain in virtual power sources trading

以智能合约的形式达成长期购电协议,也可以在交易平台上进行实时买卖。

该系统具有如下特点:

1) 运行生态化。分布式信息系统与虚拟电厂中的虚拟发电资源相匹配,用户自愿加入虚拟电厂系统平台的维护工作,权利义务对等,保证了系统平台的去中心化属性;开放的信息发布与交易平台易于接入,便于聚合更多虚拟资源;

2) 工作量认证公平化。构成虚拟电厂的各种资源如分布式储能、弹性负荷等对能源系统的贡献大小即工作量能够根据既定规则进行公开公平的认证,保障各参与者利益的合理分配,激发其参与辅助服务市场等的积极性;

3) 智能合约化。虚拟电厂与分布式能源签署有关利益分配的智能合约,一旦智能合约实现的条件达成,区块链系统将自动执行合约,完成虚拟电厂中的利益分配。由此虚拟电厂中分布式能源利益分配的公平有效,并且降低了信用成本;所有的交易都建立在区块链系统上。整个系统中交易的清算由系统中的所有节点共同分担,费用低廉,免去了交易手续昂贵的中心化机构;

4) 信息透明化。虚拟发电资源在信息平台上,得到了公开市场信息。公开透明的信息平台,不仅有利于分布式电源寻找条件最优的虚拟电厂加入,也为不同虚拟电厂之间提供了定价参考,激励它们降低成本,促进市场竞争。

3.4 去中心化的多能源系统协同

多能源系统融合是能源互联网的重要特征,传统能源系统中电力、热力、燃气等能源系统均处于各自分立运行的状态,而未来能源互联网中,各能源系统在生产、转换、储备、运输、调度、控制、管理、使用等环节紧密融合与协同优化,形成有机的整体。各种能源能够通过能量转换设备实现不同物理系统中的灵活流动,实现能量的灵活存储与梯级利用,能够显著提高能源的转化与利用效率^[20]。

在多能源系统协同的愿景中,存在一系列商业模式的挑战与技术需求,主要包括:

1) 电力系统、热力系统、燃气系统等不同能源系统长期处于分立自制的状态,其分属于不同的部门管理,难以设立一个中心化调度机构进行运行管理。因此需要进行去中心化的协同;

2) 不同能源系统物理特性迥异,调度模式差

别很大,其控制方式、控制间隔时间、信号指令等无法进行统一。因此需要一个标准化平台进行“对话”,需要平台数据能够在多个能源系统之间进行同步,且能够保障数据的安全性和可信性;

3) 不同能源系统之间没有跨平台的商业模式,不同能源系统之间协同缺乏激励相容的机制。一个能源系统为另一个能源系统的优化运行做出贡献时,应能够分享一部分收益。

区块链能够为多能源系统提供一个去中心化的系统平台,如图 6 所示。具体而言,采用区块链记录不同能源系统的实时生产信息及其成本,存在跨能源类型的市场时,可记录多个能源系统之间的交易及其价格信息,在此基础上实时生成各地区各类能源的边际价格(例如节点电价、节点气价、节点热价);不同能源系统可以通过区块链中的边际价格信息对自身系统的运行进行优化,或通过签署智能合约,根据边际价格信息执行自动调度指令,并且根据边际价格信息进行能量费用结算。

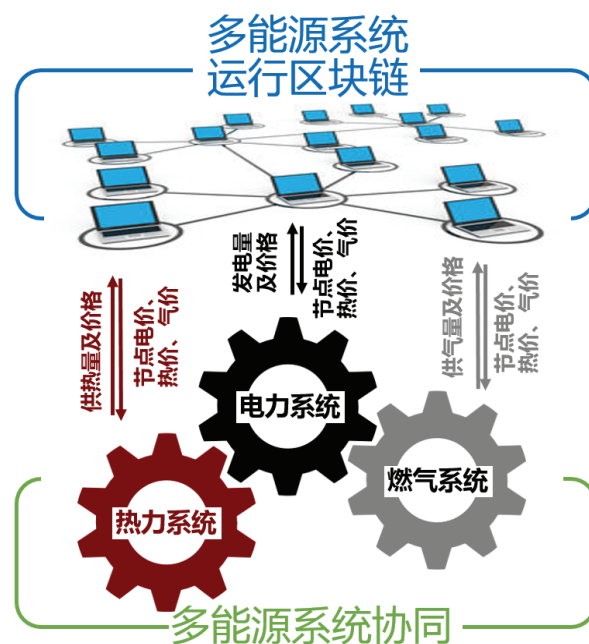


图 6 区块链技术在多能源系统协同方面的应用

Fig. 6 The application of blockchain in the cooperation of multiple energy systems

该系统具有如下特点:

1) 调度运行去中心化。区块链使多个能源系统之上不需存在统一的机构进行调度管控,通过“边际价格”将不同能源系统以及不同地区的能源供求关系信息在多个能源系统中进行共享,多能源系统中每个个体都能够通过所在地区的不同能源

的边际价格信息进行自调度决策,在优化自身收益的同时也促进了不同能源系统之间的协同。例如,当用电紧张时,电价升高、用户可以微型燃机供电,或将电供暖改为燃气供暖,进而缓解电力系统的供需矛盾。

2) 跨能源系统通用性。区块链通过价格信息搭建了不同能源系统之间进行沟通及协同的桥梁。不同能源系统中运行方式及交易模式大不相同,区块链为不同能源系统的信息提供统一化、标准化的“对话平台”,能够在不改变各系统调度运行方式以及交易方式的前提下实现不同能源系统之间的协同。

3) 数据具有保密性与可靠性。不同能源系统内的交易能量交易信息是私有信息,这些交易信息通过公钥加密后上传拷贝的方式确保交易信息的保密性;而系统节点价格信息是共有信息可以被公开查询,区块链分布式账本的存储方式能够保证节点价格信息的真实可靠不易被篡改进而具有公正性。

4) 通过智能合约实现自协作。不同能源系统之间可以以节点价格作为触发条件而签署一系列智能合约以实现协同。例如对于风电供暖而言,如在冬季深夜产生弃风时(系统发电边际价格接近于0),风电供暖设备可以自动启动将风机发电用于转换为热能供暖,实现自动化的风电供暖。

5) 调节服务有偿化。通过节点价格信息可以进行跨能源系统之间的价值计量,能够明确对多能源协同而产生效益有贡献的参与者的经济收益,进而实现跨能源系统的激励相容。即使能源系统中不采用节点价格进行结算,区块链中也可采用虚拟货币的形式对参与者的贡献进行认证与奖励。

4 区块链技术在能源互联网中应用的挑战

区块链技术在能源互联网中的应用仍然存在巨大的挑战。这些挑战部分来自于区块链技术自身的局限性,部分来自于区块链与能源互联网结合的潜在制约因素。

在能源互联网的应用中,区块链目前仍然存在一些内生性短板:

1) 区块链的计算能力及响应速度仍然存在瓶颈。以目前最成熟的区块链应用——比特币网络为例,其吞吐量很小,平均每秒钟只能处理7笔交易,交易确认存在至少10min的延迟时间;区块数的增

加也对数据库容量和带宽提出更高要求。能源互联网中的较多应用如多能源系统协同优化运行等数据量较大、对实时性要求较高。未来区块链在能源系统这样数据处理量大、对实时性要求性较高的系统中实现应用之前,需要建立更新间隔更短的区块链技术体系,其中包括吞吐量更大的数据库技术、更快的数据通信技术、更高效的共识机制等。

2) 异步共识网络的容错挑战。区块链技术本身是异步共识网络,理论上不存在一个一致性的算法保证系统能够达到共识并且能够实现拜占庭容错。目前比特币的工作量证明机制(挖矿)采用激励机制来解决拜占庭容错进而保障系统的安全性,但相应的代价是需要耗费大量的计算资源以及工作量验证所造成的延时。未来区块链的应用必然要采用不需要挖矿的创新性共识机制,保持系统安全性鲁棒性的基础上降低系统对计算资源的消耗。

3) 智能合约的责任主体缺失问题。智能合约签订主体往往是虚拟的账户而不是自然的人,所以有一系列伦理问题,比如合同授权、违约责任方的追责等。未来区块链在能源互联网中的应用需要引入“数字身份认证服务”,提供不同种类的数值身份认证服务,另外也需要政策的保障和监管,保证区块链主体的合法性和合理性。

除区块链内生性短板,能源互联网本身的特点也使得区块链技术在能源互联网中应用面临不同方面的挑战:

1) 区块链技术的能源互联网实践经验较少。区块链技术的问世至今只有8年时间,虽然最近几年产业界对区块链的重视程度逐渐提高,但总体而言其投资规模仍然不是很大,较为成功的区块链系统应用仍然局限在金融领域。能源行业目前还相对保守,特别是我国售电侧也才初步放开,目前推进的阻力相对较大,对区块链系统在能源互联网中潜在的问题,人们往往缺乏相应的技术解决方案和管理应对措施。把区块链系统从金融领域迁移至能源互联网领域,仍然存在巨大的壁垒和不确定性,需要不断的实践经验积累。

2) 能源互联网垄断性对区块链信息安全性产生威胁。比特币系统中参与全网计算的矿工力量分散,组成一个庞大的整体对网络进行数据篡改的成本远大于收益,因此对比特币网络发动51%攻击的可能性趋近于0^[3]。但是在能源互联网中,网络中

超过 51% 的计算资源很有可能被同一利益集团所掌握, 此时区块链的安全性将受到巨大威胁。能源系统关乎国计民生, 信息安全很重要的角度需要一起充分重视。另外, 能源行业目前集中度还较高, 出现垄断现象的可能性也较大。所以需要在参与主体准入、数据保密性、数据的防攻击能力方面需要投入更多的研究。

3) 能源系统内在复杂性与物理规律带来的挑战。区块链应用于货币、支付和银行方面, 其物理系统相对简单, 涉及到的往往是数值上的平衡, 本质是信息的交换。而能源系统是个复杂的物理系统, 要面临测量坏数据、不同类型复杂物理量之间的关系建模, 系统运行实时性等要求, 区块链技术的应用需要充分考虑能源系统的物理规律, 使信息系统能够与物理系统充分协同。

4) 区块链法律与监管有待完善。区块链技术对个人信息的完全隐匿可能导致违法犯罪活动能够逃避监管的视野。能源是关系国计民生的重要领域, 能源的交易与运行仍然需要严格的监管, 然而目前如何在区块链技术中纳入监管体系仍然缺乏研究。

5 结论

能源互联网是多能源融合、信息物理融合和多市场融合的产物, 将深刻影响未来的能源生产、传输、存储和消费各个环节, 促进产能用能的高效化和清洁化。能源互联网的建设少不了新技术的引入和新思维的渗透。区块链技术作为一种新的数据库技术, 因其去中心化、公开、透明等特性与能源互联网的理念相符, 在未来能源互联网中具有广泛的应用潜力。本文从区块链技术本身出发, 剖析了区块链技术的特点及其对能源互联网理念的体现; 然后介绍了若干区块链技术在能源互联网中已有的实践; 并从功能维度、对象维度和属性维度等对区块链在能源互联网中的潜在应用进行了归纳总结。在此基础上, 对碳排放权认证、信息物理系统安全、虚拟发电资源交易以及去中心化的多能源协同 4 个典型应用案例进行了深入的分析。最后, 总结了未来区块链技术在能源互联网中可能遇到的挑战。现阶段区块链技术在能源互联网应用方兴未艾, 希望本文能够为能源互联网研究者对区块链技术及其应用的研究提供参考。

参考文献

- [1] Satoshi Nakamoto S. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[J]. Consulted, 2009.
- [2] Melanie Swan M. Blockchain: blueprint for a new economy[M]. USA: O'Reilly, 2015.
- [3] 谭磊, 陈刚. 区块链 2.0[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [4] 隐藏在数字货币身后的力量——浅析区块链技术应用场景[EB/OL]. (2015-11-12). <http://mingin.baijia.baidu.com/article/228350>.
- [5] Richard Dennis R, Gareth Owen G. Rep on the block: a next generation reputation system based on the blockchain[C]//Proceedings of the 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST). London, Britain: IEEE, December 2015.
- [6] Guy Zyskind G, Oz Nathan O, Alex'Sandy'Pentland A S. Decentralizing privacy: using blockchain to protect personal data[C]//Proceedings of the Security and Privacy Workshops (SPW). San Jose, USA: IEEE, 2015.
- [7] 赵赫, 李晓风, 占礼葵, 等. 基于区块链技术的采样机器人数据保护方法[J]. 华中科技大学学报, 2015, 10(43): 216-219.
Zhao He, Li Xiaofeng, Zhan Likui, et al. Data integrity protection method for microorganism sampling robots based on blockchain technology[J]. Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, 10(43): 216-219(in Chinese).
- [8] 龚鸣. 简单谈谈究竟什么是“区块链”技术[EB/OL]. (2015-10-23). <http://mt.sohu.com/20151023/n424005566.shtml>.
- [9] 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).
- [10] 李经纬, 贾春福, 刘哲理, 等. 可搜索加密技术研究综述[J]. 软件学报, 2015, 26(1): 109-128.
Li Jingwei, Jia Chunfu, Liu Zheli, et al. Survey on the searchable encryption[J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 109-128(in Chinese).
- [11] Nguyen C. An indie, off-the-grid, blockchain-traded solar power market comes to brooklyn[EB/OL]. (2016-03-18). <http://motherboard.vice.com/read/the-plan-to-power-brooklyn-with-a-blockchain-based-microgrid-transactive-solar>.
- [12] Tapscott D, Tapscott A. How blockchain technology can reinvent the power grid[EB/OL]. (2016-05-15). <http://fortune.com/2016/05/15/blockchain-reinvents-power-grid/>.
- [13] Prisco C. An energy blockchain for European prosumers

- [EB/OL]. (2016-05-02). <https://bitcoinmag-azine.com/articles/an-energy-blockchain-for-european-prosumers-1462218142>.
- [14] Acheson N. Blockchain electricity[EB/OL]. (2016-05-12). <http://www.fintechblue.com/2016/05/blockchain-electricity/>.
- [15] 陈启鑫, 康重庆, 夏清. 碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 22-28.
Chen Qixin, Kang Chongqing, Xia Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 22-28(in Chinese).
- [16] 张晓辉, 闫鹏达, 钟嘉庆, 等. 可再生能源激励制度下的低碳经济电源规划[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 655-662.
Zhang Xiaohui, Yan Pengda, Zhong Jiaqing, et al. Research on generation expansion planning in low-carbon economy environment under incentive mechanism of renewable energy sources[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 655-662(in Chinese).
- [17] Kang Chongqing, Zhou Tianrui, Chen Qixin, et al. Carbon emission flow in networks[J]. Scientific Reports, 2012, 2(2): 479219-226.
- [18] 刘东, 盛万兴, 王云, 等. 电网信息物理系统的关键技术及其进展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3522-3531.
Liu Dong, Sheng Wanxing, Wang Yun, et al. Key technologies and trends of cyber physical system for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3522-3531(in Chinese).
- [19] 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(in Chinese).
- [20] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
Wang Yi, Zhang Ning, Kang Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681(in Chinese).



张宁

收稿日期: 2016-06-08。

作者简介:

张宁(1985), 男, 讲师, 主要从事新能源、电力系统规划及运行、多能源系统的研究工作, ningzhang@tsinghua.edu.cn;

王毅(1992), 男, 博士研究生, 主要从事大数据、能源互联网、负荷预测的研究工作, wangyi14@mails.tsinghua.edu.cn;

康重庆(1969), 男, 教授, 研究方向为电力规划与运行、可再生能源、负荷预测、低碳电力技术等, cqkang@tsinghua.edu.cn。

程将南(1995), 男, 主要从事负荷预测的研究工作, cjn861@sina.com。

(责任编辑 李婧妍)

Blockchain Technique in the Energy Internet: Preliminary Research Framework and Typical Applications

ZHANG Ning¹, WANG Yi¹, KANG Chongqing¹, CHENG Jiangnan¹, HE Dawei²

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments (Tsinghua University);

2. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute)

KEY WORDS: energy internet; distributed energy resources; multiple energy systems; cyber-physical system; blockchain; carbon emission right

Blockchain, as a distributed sharing database technology, has been applied to various fields, such as transactions, intelligent contract, and notarization. Energy Internet is the product of energy and information. It is believed that the blockchain technique has a great potential to contribute to the effective and efficient implementation of Energy Internet. This paper tries to provide preliminary research framework of blockchain technique in the Energy Internet and some typical applications.

In this paper, the basic principle and characteristics of blockchain technique are firstly introduced. The blockchain consists of blocks that hold timestamped batches of valid transactions. Each block includes the hash of the prior block, linking the blocks together. The linked blocks form a chain, with each additional block reinforcing those before it to make it trackable. The characteristics of blockchain technique, including decentralization, transparency, fairness, and openness, are consistent with the spirit of Energy Internet. Few companies abroad such as LO3 Energy, Filament in the US and Scanergy in Europe, have tried to applied blockchain techniques into renewable energy transaction, power system operation, and bicorn based electrical vehicle charging.

There may exist various applications in different part of Energy Internet for different purposes, such as electric power market transaction in the demand side. The transparency and traceability of blockchain make it dependable and does not need third-party trust. It is very important for the measurement and authentication, trading, coordinating, and financing in Energy Internet. With the penetration of storage and distributed renewable energy, the boundaries among source, network, load, and storage become much more blurred in Energy Internet. Decentralization of blockchain will provide key support for their challenges and developments of their operation and transaction mechanism. In addition, as a distributed database technology, blockchain can store not only “value” such as bicorn, but also the record of registration, certification, traceability, transaction or

sharing. Energy, information, and value are the three main parts of the Energy Internet. Thus, the authors would like to summarize these application of blockchain in Energy Internet from three dimensions - function, entity and property, as shown in Fig. 1. The function dimension includes four aspects: the measurement and authentication, trading, coordinating, and financing. The entity dimension in the Energy Internet includes four parts: generation, transmission, consumption and storage. The property dimension includes three aspects: energy, information and value. On this basis, four specific scenarios are designed to further illustrate its application, including authentication of carbon emission right, securing cyber-physical system, trading virtual power resources, and coordinating multi-energy system.

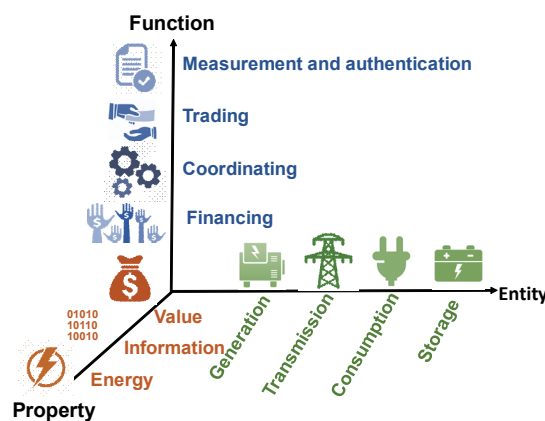


Fig. 1 The applications of blockchain in energy internet

Finally, the challenges of blockchain technique faced by the Energy Internet are summarized from two aspects. In the perspective of blockchain, the challenges include the computing power and response speed of blockchain, fault tolerance of asynchronous consensus network, and the lack of the main responsibility of intelligent contract. In the perspective of the combination of blockchain and Energy Internet, the challenges include the lack of practical experience, cyber security brought by monopoly, inherent complexity and physical law of energy system, and law and regulation for blockchain in Energy Internet.