

基于区块链的能源互联网智能交易 与协同调度体系研究

龚钢军¹, 张桐^{1*}, 魏沛芳¹, 苏畅¹, 王慧娟¹, 吴秋新², 刘韧³, 张帅²

(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. 北京信息科技大学, 北京市 海淀区 100192; 3. 北京卓识网安技术股份有限公司, 北京市 昌平区 102206)

Research on Intelligent Trading and Cooperative Scheduling System of Energy Internet Based on Blockchain

GONG Gangjun¹, ZHANG Tong^{1*}, WEI Peifang¹, SU Chang¹, WANG Huijuan¹,
WU Qiuxin², LIU Ren³, ZHANG Shuai²

(1. Beijing Engineering Research Center of Energy Electric Power Information Security (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. Beijing Information Science & Technology University, Haidian District, Beijing 100192, China; 3. Beijing Excellent Network Security Technology Corp., Ltd., Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The Blockchain has the features of intelligent contracts, distribution decision, cooperative autonomy and tamper resistance. These characteristics make it naturally similar to the Energy Internet in running ways, topological form, bilateral trade and synergic dispatch and so on. It can finely support the construction of Energy Internet. Based on the analysis of the physical topological and the logical protocol hierarchy of the Energy Internet, this paper, from the perspective of Blockchain as well as Energy Internet, proposed the Energy Internet hierarchy model which based on Blockchain and designed the intelligent trade model of Energy Internet and trust mechanism. Beyond that, this paper also discussed the synergic scheduling model between vertical hierarchical scheduling system and multi-level substation after the decentralized of the dispatch section as well as the corresponding security check of power grid and physical constraints. It also formed an Energy Internet intelligent transaction and collaborative scheduling model, based on block chain technology, supporting the “horizontal multi-source complementary, vertical collaborative scheduling” system, and it is conducive to the perfect integration of energy flow and information flow and secure transmission.

KEY WORDS: energy internet; blockchain; intelligent contract; scheduling transaction; physical constraint

摘要: 区块链具有智能合约、分布决策、协同自治、防篡改

性等特征,在运行方式、拓扑形态、双边交易和协同调度等方面与能源互联网有天然相似之处,可以很好地支撑能源互联网建设。该文从二者技术融合的角度出发,基于能源互联网的物理拓扑结构和逻辑协议层次分析,提出了基于区块链的能源互联网层次架构模型;设计了交易完全去中心化的能源互联网智能交易模式及信任机制;探讨了在调度部分去中心化下的垂直分级调度系统和多级变电站的协同调度模式,及相应的电网安全校验与物理约束条件;形成了基于区块链技术构建的支撑“横向多源互补,纵向协同调度”体系的能源互联网智能交易与协同调度模式,有利于实现能量流和信息流的高度融合控制与安全传输。

关键词: 能源互联网; 区块链; 智能合约; 调度交易; 物理约束

0 引言

我国新能源发展已经走在了世界前列,水电、风电、太阳能发电装机已均居世界第一^[1]。为了进一步构建清洁、高效、安全、可持续的现代能源体系,国家大力推进能源互联网的试点与示范工程,积极探索支撑能源互联的新技术、新模式、新业态。能源互联网是促进我国能源转型的重要手段^[2],而特高压、云计算、大数据、物联网、区块链等被认为是能源互联网的关键支撑技术。能源互联网是能源网络和互联网深度融合的产物^[3],能源互联网集合智能电网、智能石油网、智能燃气网、智能水网等多个行业,包括二次能源的电力和产生电力的一次能源风能、太阳能、核电、生物质能等,以及传统

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).

石化能源、环保节能、排放控制、垃圾发电、余热利用等的多元互动、优化配置的能源网络^[4]。目前,由于我国能源的生产、调度、运维等属于不同行业部门,存在管理权限和利益划分等问题,致使能源互联网的研究设计与示范工程建设往往是针对局部、小范围的规模开展的,具体面临的制约因素主要体现在以下方面:1)调度交易方面的横向分布:交易完全去中心化后能源端多源互补的智能交易方式,以及清洁能源与化石能源的互备与平衡制约因素;2)调度交易方面的纵向分布:调度部分去中心化后源、网、荷、储下的协同调度模式与物理约束因素;3)网络层:能量流与信息流的路由交换与分配模式,以及不同行业的能量流物理承载网络和信息流通信网络的专网专用安全隔离体系的制约因素;4)用户层:售电侧放开后售电公司和大客户直购电、微网交易、多表合一、储能设备的充放电、基础设施的信息物理融合等模式及制约因素。

能源互联网具有“网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动”的四大特征^[5],实现了以开放为基础的对等互联式的能量交换与分享^[6],以及能量流和信息流的高度融合与智能控制。区块链作为一个分布式的数据库和去中心化的P2P对等网络,具有智能合约、分布决策、协同自治、防篡改的高安全性和公开透明性等特征,天然上在运行方式、拓扑形态、安全防护等方面与能源互联网有相似之处,可以很好的支撑能源互联体系的建设。文献[7]中提到麦肯锡研究报告(2016年7月)指出了区块链技术是继蒸汽机、电力、信息和互联网科技之后最有潜力触发第五轮颠覆性革命浪潮的核心技术。文献[8]提出了一种利用区块链技术实现能源互联网多模块系统分布式决策和协调自治的机制框架,探讨了区块链和能源互联网融合的关键技术;文献[9]提出了能源互联网中基于区块链的弱中心化管理电力交易方法,使得各市场参与者基于智能合约自发交易;文献[10]提出了一种基于区块链的去中心化的储能系统自动需求响应方案,能源互联网中各响应主体根据系统的实时运行情况及参数,按照既定准则自动调整自身功率需求;文献[11]针对能源互联网以及分散能量市场的条件下需求侧响应资源参与市场交易中存在的问题,提出了基于区块链技术的综合需求侧响应资源交易整体框架。文献[12]结合电力市场中大客户直购电的需求与特点,构建了基于区块链技术的大用户直购电交易框架,从市

场准入、交易、结算和物理约束等4个方面阐述了区块链技术在大用户直购电中的应用模式。

以上文献在电力市场交易、自动需求响应、多模块系统分布式决策和协调自治等方面阐述了能源互联网下区块链的去中心化、智能合约、分布式决策、协同自治、交易的物理约束等应用模式,但并没有完全结合现阶段我国能源互联面临的制约因素,通过将区块链的架构与节点映射到能源互联网的层次架构模型和关键功能节点,构建基于区块链的能源互联网模型,以及能源互联网在交易完全去中心化后的智能交易模式和调度部分去中心化后的垂直分级调度系统和多级变电站的协同调度模式。因此,本文针对区块链与能源互联网的相似网络拓扑形态,从区块链与能源互联网的技术融合角度出发,研究在区块链技术的区块链支撑下能源互联网的层次架构模型和关键功能节点,构建了具有“交易完全去中心化,调度部分去中心化”特点的基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度模式,力求实现能量流和信息流的安全传输与分配。

1 能源互联网网络模型与区块链应用场景模型

1.1 能源互联网网络模型

能源互联网为扁平化的能源体系结构^[13],在拓扑形态上更加接近于互联网^[14]。文献[15]借鉴开放系统互连(open system interconnection, OSI)模型,提出了由接入层、配控层、传输层、策略层和应用层等组成的能源互联网5层参考模型,用于指导任意两个能源开放系统之间的互连。

为了更好的分析能源互联网的结构特点,本文认为应从物理架构层次和逻辑协议层次2个角度分析能源互联网的层次模型。

1)物理架构层次角度:能源互联网强调各个能源体系之间的相互协调与互联互通^[16]。从能源交易层讲,能源互联网主要包括煤、石油、天然气化石能源,以及水、风、光、生物质、潮汐和核能等清洁能源;从调度传输层讲,包括电网、天然气管网、石油管网等行业网络^[17];从用户层讲,包括微网、售电公司、工商业用户、居民用户、电动汽车等具有虚拟电厂功能的储能设施。具体如图1所示。

能源互联网的物理功能架构模型应包括:能源交易层、调度传输层和用户层。其中,①能源交易层主要包括各类能源的生产模块和总体分配交易

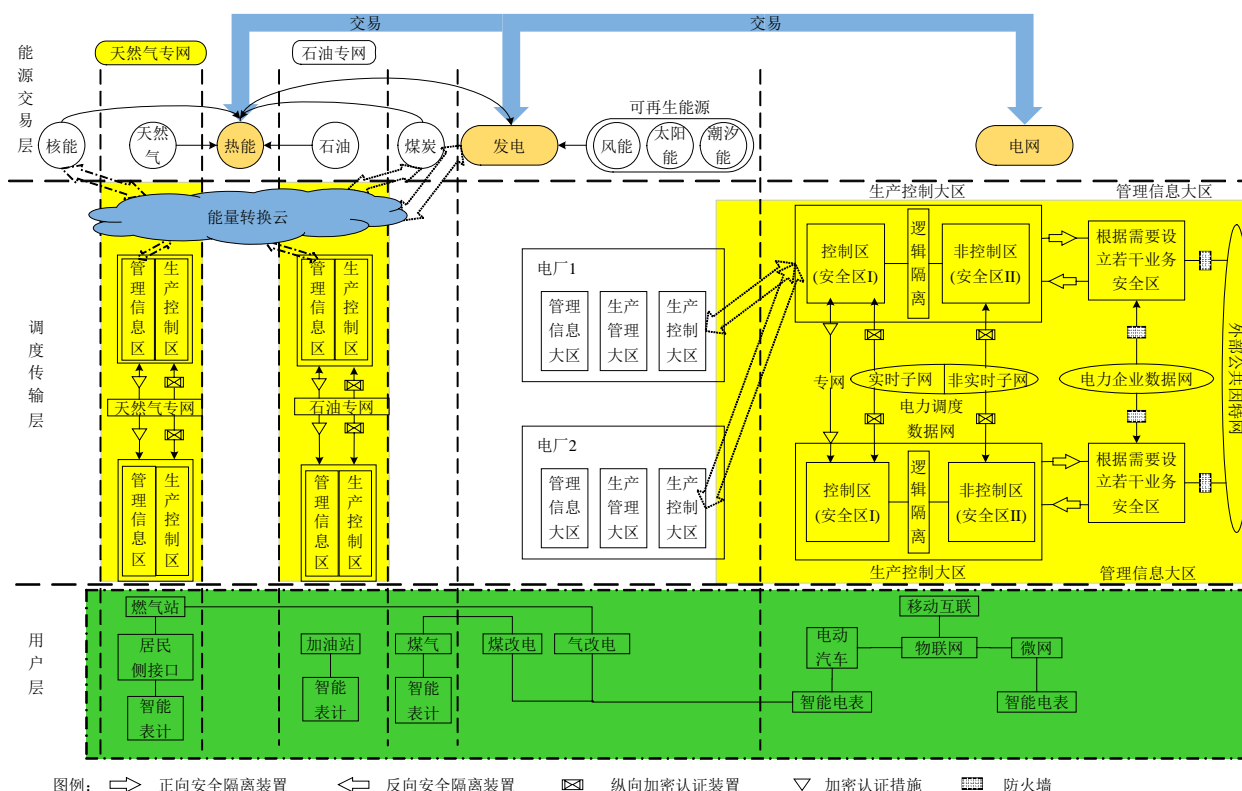


图1 能源互联网物理架构层级图

Fig. 1 Energy Internet physical architecture hierarchy

模块。能源生产模块如电力行业的各类电厂、石油行业的石油精炼厂等；分配交易模块如电网调度、石油调度、天然气调度等。各类能源在该层结构中可实现多向交易，如石油电厂、天然气电厂、石油精炼厂用电等。②调度传输层主要包括各类能源专属的传输通道，如石油行业的管道传输站、天然气供应领域的升压站以及电力行业的国调、网调、省调、市调、县调及各级变电站构成的调度传输体系。调度系统依照分配交易模块在上一层级达成的交易协议以及自身调控需求进行能源调度分配，在该层结构中，各行业能源之间实行专网隔离，传输通道和调度系统均不互相干扰，以保障能源调度传输的高效性和安全性。③用户层主要包括各类能源的消费者。消费者并非仅使用单一能源，且存在微网、储能节点等，以及开放式售电的逐步推进，故存在应用端之间的数据交互和交易。

该物理架构下的能源交易层和用户层实现了多类能源的横向互补，因此网络上互联互通的。但调度传输层需要行业专网专用，故为横向隔离的。原因在于，国家发改委颁布的《电力监控系统安全防护规定》(发改委第14号令)、《电力监控系统安全防护总体方案》等6个配套文件(国能安全[2015]36号)；工信部也颁布的《工业控制系统信息

安全防护指南》(工信软函[2016]338号)、《工业控制系统信息安全事件应急管理工作指南》(工信部信软[2017]122号)等文件均要求能源行业安全防护遵循“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的十六字方针。

因此，图1中能源互联实现了“源端横向各行业能源的互联互通、纵向相互隔离的各行业源网荷储的协同调度、用户端用户负荷的横向互联互通”的架构，即能源互联网可分别在能源交易层和用户层横向互联，而不能在调度传输层互联互通，否则违背信息安全防护要求。

2) 逻辑协议层次角度：能源互联网综合运用云计算、物联网、大数据与自动化等方面的技术，将大量由分布式能量采集与储存装置和各种类型负载所构成的新型电力网络节点互联起来，实现能量与信息双向流动的能源交易与共享^[17]。能源互联网结构上类似于互联网，强调网络体系的广泛互联与信息处理的高度智能，需要实现能量流的智能交易、协同调度、路由传输与分配等，以及信息流和业务流的路由传输与交换。因此，借鉴TCP/IP四层模型，本文认为能源互联网参考模型应由信息物理融合层、网络传输层、信息融合层、调度交易层等组成的。其中，①信息物理融合层：强调能源互

联网的发展也是遵循工业化和信息化融合的思路，为了满足能源互联网广泛互联、高度智能、开放互动的特点，信息物理融合是必须的。信息物理层涉及配用电系统涵盖的分布式光伏、分布式风电、储能装置及电动汽车等，完成分布式能源及储能设备的即插即用，电动汽车负载，并通过计算、通信以及控制技术实现了能源互联网一次系统与二次系统的深度融合，也是能源互联网的智能数据采集与控制的关键基础层。②网络传输层涉及能源路由器、汇聚能源交换机、本地能源交换机以及能源交换机通过对设备模型的自动辨识，完成电网内部电能和信息的交换和管理、网络运行的安全可靠、能源使用的高效经济。③信息融合层基于大数据分析能源互联网的海量数据，通过对典型应用建模，提取数据特征，实现智能化、精细化决策与管理，与网络传输层和信息物理融合层共同支撑应用层面的调度交易层。④调度交易层采用“互联网+”技术，实现能源互联网源端的各类能源与用户之间的中远期和实时竞价交易、能源协同调度、运营效益评估、设备状态评估和用户互动服务。

1.2 能源互联网与区块链融合点分析

能源互联网基于化石能源和清洁能源的混合互补模式，打破了传统能源产业之间的供需界限，极大程度地促进电力、石油、天然气、热等能源的互联、互通和互补^[18]。电力系统是能源传输的最主要和成本最低的首选方式，也是能源互联网的基础，但现有电力管理体制下，各电力调度部门因掌控调度权而处于行业强势地位。同时，为了确保电网的安全稳定，在电网多级调度中心的调控下承载能量流的电网与不同发电企业通过统一的电力交易平台进行电量的中长期或日前交易，不符合能源互联网“开放、对等、互联、分享”的特性^[19]。而区块链除了数字货币领域的规模化应用外，在能源交易、银行间联合贷款清算等领域的应用正处于快速发展阶段^[20]。区块链技术的分布式、智能性、市场性以及融合性与能源互联网理念不谋而合，基于区块链技术可以将能源互联网概念升级到能源互联网 2.0 时代，即能源区块链时代^[21]。区块链能够为现有能源互联网一些不能落地的问题提供有效的解决方案^[22]，具体如表 1 所示。

1.3 基于区块链的能源互联网模型

区块链与能源互联网具有相似网络拓扑形态，可从区块链与能源互联网的技术融合角度出发，将区块链架构与节点映射到能源互联网的层次架构

表 1 能源互联网与区块链融合功能表

Tab. 1 Energy Internet and Blockchain fusion function list

融合点	功能
可信交互	区块链支撑能源互联网的源-网-荷-储-调度等各类节点间的可信交互机制；
	区块链支撑能源互联网在交易完全去中心化下各售电公司、大用户与源端各互补能源节点、用户端各微网节点之间的自主智能交易；
智能交易	区块链支撑能源互联网在调度部分去中心化下源-网-荷-储各节点主动参与能量流的分布决策、协同调度与潮流分配；
协同调度	区块链支撑能源互联网的各类数据的防篡改性、不可否认性、可追溯性和机密性。
安全监管	

模型和关键功能节点，构建了具有“交易完全去中心化，调度部分去中心化”特点的基于区块链的能源互联网模型(如图 2 所示)。

首先，针对区块链技术在运行方式、拓扑形态与能源互联网有天然相似之处，该模型借鉴了区块链技术明确能源互联网节点的功能与类型。区块链技术旨在确保网络中每一个节点都参与数据交互及记录管理等工作，以此实现去中心化的特点及节点间的相互信任。然而，节点之间不可避免地存在算力差异，不能要求所有节点都能提供等量的算力资源，故节点类型分为以下两类：

1) 全节点：传统意义上的区块链节点，包含有完整的区块链数据，支持全部区块链节点的功能^[23-25]；

2) 轻型节点：依靠全节点而存在的节点，无需为区块链网络提供算力，仅需保留区块链的部分数据，参与对交易数据的验证^[26-27]。

因此，该模型参照区块链节点类型，并依据能源互联网中源-网-荷-储-调度等各节点的计算能力、交易特性、调度特性和数据重要性等特点，将能源互联网各节点作如下分类：1) 能源端节点、各类售电公司节点定位为交易类全节点，该类节点计算和存储能力最强，具有计费 and 结算、保存完整区块、路由、查询和验证等完整功能；2) 能源传输网络中各级调度、各级变电站、天然气调压站、石油泵站等定位为调度类全节点，该类节点在计算和存储能力上与交易类全节点类似，同样具有保存完整区块、计费和结算、路由、查询和验证等完整的区块链功能；此外该类节点又独有协同调度功能，因此与交易类全节点分开命名以示区分；3) 用户侧常规的用能节点，如居民用户、商业用

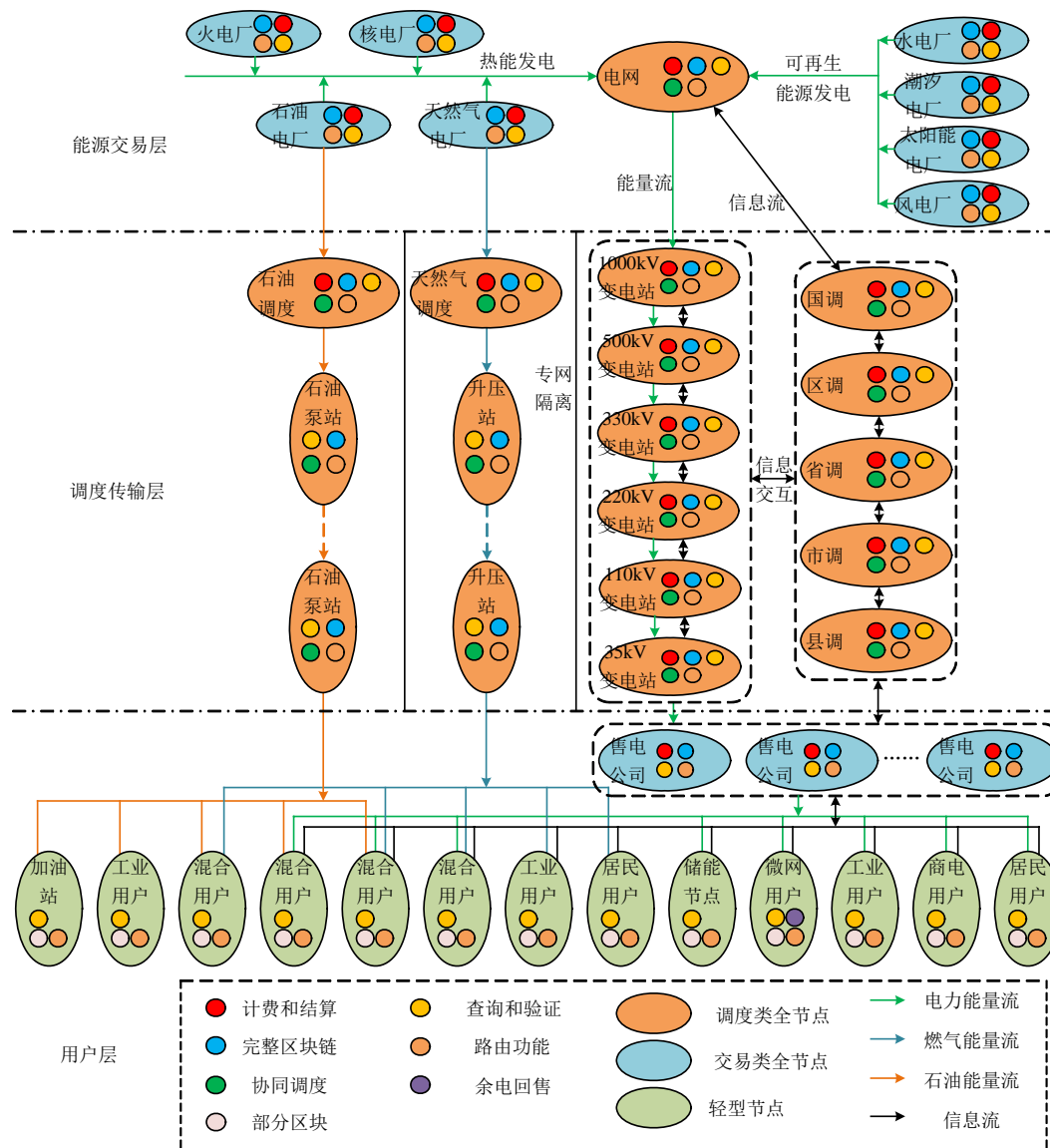


图2 基于区块链的能源互联网模型

Fig. 2 Energy Internet model based on Blockchain

户、工业用户、混合用能用户、加油站、液化气站、微网节点、储能节点等定位为轻节点，该类节点算力输出十分有限，且存储空间不足以保留完整区块链，因此仅具有保存数个月内区块链、路由、查询及验证等基础功能^[28-29]。

其次，针对区块链作为一个分布式的数据库和去中心化的点对点网络的特点，该模型基于区块链技术实现交易的完全去中心化，并以智能合约的方式部署在区块链上，实现不依赖任何中心机构自动化地代表各签署方执行合约进行交易，具有自治、去中心化等特点。目前，电力市场的中长期交易和日前交易属于非实时性交易操作，因此完全可通过区块链技术构建基于信任机制的能源互联网售电公司与源端间的完全去中心化的交易模式。交易完全去中心化有利于使源-售两端沟通协商更加

便捷，提升交易时效性和需求匹配性。

最后，针对电能作为一种特殊的商品形式，必然要受到调度管控限制的特点，该模型基于分布式决策和协同自治模式，突破现有垂直多级集中式调度的约束，通过区块链技术实现源-网-荷-储等各类节点共同参与系统调度，使电力系统具备大规模分布式实时协同自治的能力，将从广域协同调度模式过渡到集群智能，有利于解决大规模分布式节点的实时调度优化问题。同时，考虑到电网安全性的保障是首要前提，因此在实践中尚不能完全放弃调度机构，不可仿照交易的完全去中心化模式，只能开放部分权限，实现调度部分去中心化。调度对于电网安全运行的保障主要体现在对物理条件的约束与阻塞管理，相对于石油和天然气而言，电能只能实时传输、尚不能实现大容量和高效存储，电能

商品的生产和消费大多是以具有一定持续时间的“能量块”的形式进行^[30]。基于区块链的能源互联网在交易完全去中心化后,源-网-荷-储等各节点基于智能合约达成的中长期交易和日前交易的顺利执行必须满足能源传输网络的物理约束条件,方能避免能量流的阻塞。电力系统中物理约束条件有功率约束、商业收益约束、网损约束等^[31],功率平衡在潮流方程中为电力系统运行的主要物理约束^[32-33]。因此,基于区块链的能源互联网在实现智能交易时,必须遵循源-网-荷-储-调度等各节点协同调度的物理约束条件,方能有效保证能量流的高效、合理、有序的路由传输与交换分配。

2 基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度模型

在现有区块链分类体系下,比特币和以太坊是公共链,区块链联盟 R3 和超级账本(Hyperledger)是联盟链,而专注于为企业提供区块链服务的CoinScience 和 Eris Industries 是私有链^[34]。能源互联网中横向多源互补、配电侧售电公司和大用户与

能源端的纵向交易,以及与微网的横向交易、电网的纵向协同调度、用户端的能源替代等具有不同的特点,采用单一的区块链模式进行搭建,无法满足模型的正常运作,应根据需求分别采用联盟链、私有链或公共链进行模型的搭建。图2中基于区块链的能源互联网模型将区块链架构与节点映射到能源互联网的层次架构模型和关键功能节点,有助于进一步探讨能源互联网在交易完全去中心化后的智能交易模式和调度部分去中心化后的垂直分级调度系统和多级变电站的协同调度模式,以及相应的电网安全校核与物理约束条件。因此,结合基于区块链的能源互联网模型,本文构建了基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度模型,形成了包含源-售交易链(BC1)、变电站自治链(BC2)、电网调度链(BC3)、石油调度链(BC4)、燃气调度链(BC5)和用户交易链(BC6)的体系结构,具体如图3所示。

1) 为满足交易完全去中心化的要求,能源交易层的各类能源模块不仅需要与调度对接,更需要与各类售电公司在可信的环境下形成点对点的直接电能交易,因此需要以各类能源模块和售电公司

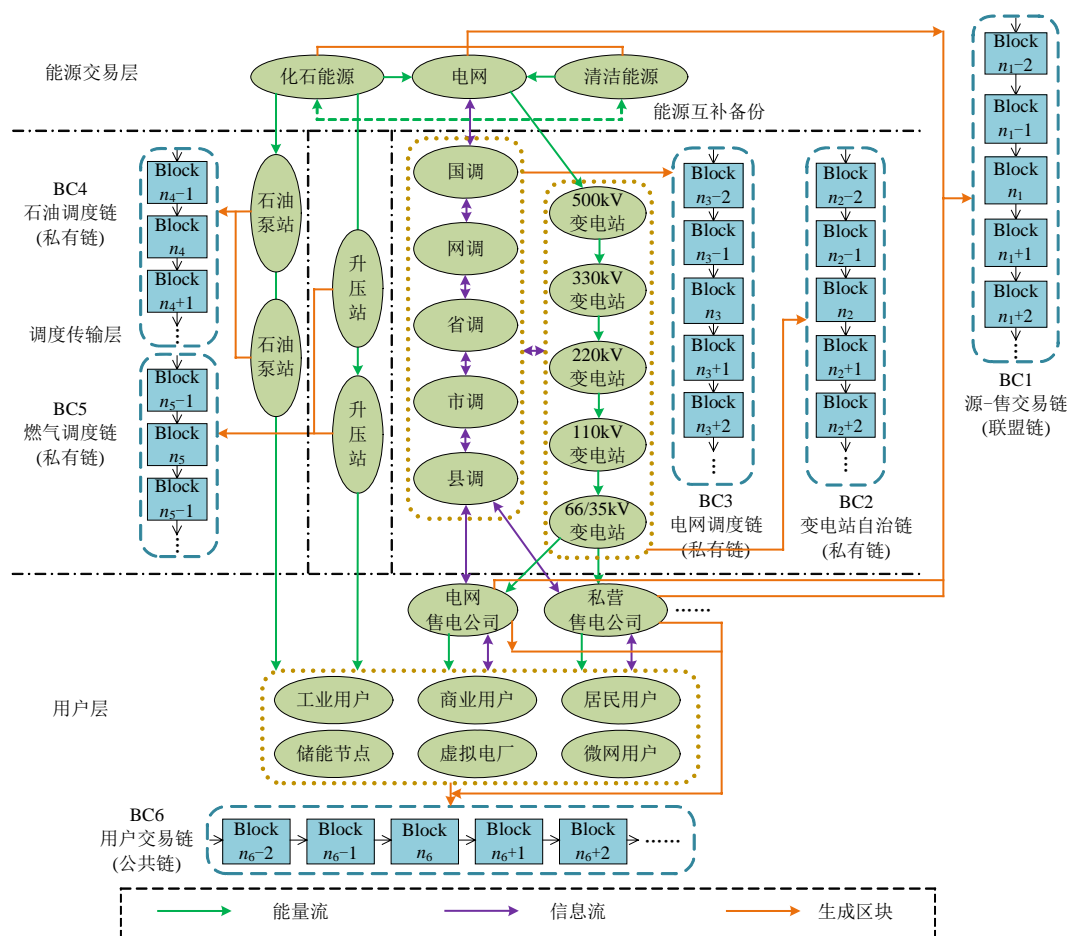


图3 基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度模型结构图

Fig. 3 Intelligent transaction and cooperative scheduling model framework of Energy Internet based on Blockchain

为网络节点,搭建源-售交易链(BC1)。该区块链负责各类能源节点和售电公司节点的身份验证与注册、点对点交易和分布式决策,并以智能合约方式存储和管理由源-售双边交易方案和数据,构建完全去中心化下的可信交易环境;此外,通过对前一区块数据的分析,可指导下一阶段能源互补的分配和点对点交易方案的形成。源-售交易链(BC1)中涉及能源模块和售电公司两类节点,不同节点分属不同企业,该区块链的类型定义为联盟链。源-售交易链(BC1)需要保障节点之间有足够时间形成交易方案,可依照实际运行环境及具体实时性要求预设区块生成时间间隔(如:数小时、天、月、季)。

2) 能源各行业“安全分区、网络专用”的安全要求致使调度传输层无法实现由一条区块链涵盖整层数据储备,原则上每类能源分配一条区块链,视实际需求可酌情添加或合并。例如电力行业可分设变电站自治链和电网调度链。其中,①变电站自治链(BC2)的节点由各级变电站组成,对生产数据的管理、分析以及对交易的核准通过等工作也由变电站自治链完成,各级调度负责数据传输、汇总、备份,以及指导变电站自治等工作;②电网调度链(BC3)的节点由各级调度中心组成,在该链运作状态下,变电站主要负责提供生产数据,参与部分运算和校验,决定权仍在调度。以电网调度为例,其各级调度均具备全节点所需的算力水平、存储性能等综合属性,所以各级调度均可视为全节点。但在现有体系下,国调、网调、省调在算力等属性上很明显高于市调、县调,故电网调度链(BC3)在制定决策、生成区块等工作的算力分配问题上,不会以传统区块链记账权竞争的方式进行分配,而是会视实际调度节点等级而有所侧重。此外,由于专网隔离的实际需求,调度传输层的区块链均为私有链,所以,石油调度链(BC4)和燃气调度链(BC5)的主营业务都是化石能源,但由于调度建制不同,依然需要视为两个网络分设管理。

3) 用户层存在多种角色,居民用户、商业用户、工业用户等一般不存在售电行为,而储能节点、虚拟电厂、微网用户既是购电方也是售电方。而且该层级涉及用户数量庞大,交易实时性更强,交易密度也更高,因此采取公共链的构建方式更为科学。用户交易链(BC6)中所有节点均可自行选择是否参与记账权竞争,无需预先设定。售电公司等拥有服务器集群的大型节点具备该层级最高的算力及存储能力,一般作为全节点运作,负责输出算力

等各类工作;而用户拥有的平板电脑、手机、PC等终端设备不具备与大型服务器集群竞争的算力性能,故绝大多数作为轻型节点使用,仅参与校验等工作。其中,售电公司有其特殊性,既需要参与用户交易链(BC6)的构成,又需要与能源交易层的源端节点构成源-售交易链(BC1)。用户交易链不仅实现网络内交易信息记录,防止恶意篡改和违约,同时能为售电公司提供数据参考,辅助售电公司制定未来的购电计划。

3 基于区块链的能源互联网物理约束管控策略研究

基于区块链技术的双边智能交易极大地提升了电力交易的自由度和实时响应效率,但在基于区块链构建的交易完全去中心化和调度部分去中心化的智能交易与协同调度模型中,交易的达成必须经过调度系统的安全校核,其中包括有功功率、无功功率、线损等约束条件。因此,如何在尽量满足用户交易需求的同时,对物理约束限制带来的风险进行有效管控,保障电网安全稳定高效运行,成为了必不可少的研究内容。基于此,本文提出了一种基于区块链的变电站自治与调度监管协同作用的能源互联网物理约束管控策略。

3.1 变电站自治的物理约束管控策略

当用户A(售电公司或大型企业)和电厂B以双边交易的方式,基于智能合约达成交易共识后,源-售交易链(BC1)会结合该笔交易的相关信息,先对该交易方案的可行性进行初步解析,分析内容包括方案已提交次数、距首次被驳回的时间(若方案为首次提交则跳过该步骤)。为提升交易成功率,减少不必要的算力支出,每套交易方案仅允许在单次交易申请周期 Δt 内提交3次,若超过3次或在 Δt 内未能形成满足物理约束的方案,则该方案作废,方案所涉及的源、售端节点将不能于本时段再次申请交易。该步骤起到了约束各节点慎重提交交易方案的作用,相对低频但高效的申请状态有利于提升模型整体的运作效率,同时能在一定程度上预防潜在的DDoS攻击风险。在调度约束的许可范围之内,交易申请周期 Δt 可依据实际应用环境进行自定义。此外,在保障调度有足够的算力和资源维持电网安全稳定运行的前提下,为了满足交易频次要求较高的现货市场的交易需求,可将交易申请周期 Δt 缩短至小时级别,减少因交易方案未能及时通过带来的经济损失。

在源-售交易链(BC1)完成初步验证后,变电站自治链(BC2)会为该笔交易规划可使用的电网线路方案,并监测该线路负载状态,若该笔交易提交的需求功率 $P_{\text{需求}}$ 与线路原有的规划功率 $P_{\text{原}}$ 的总合,在用户提交的传输时间内不会超过线路设计总功率 P_{max} , 即 $P_{\text{需求}} + P_{\text{原}} < P_{\text{max}}$, 则交易通过审核;若交易功率与原规划功率之和等于或超过线路设计总功率,即 $P_{\text{需求}} + P_{\text{原}} \geq P_{\text{max}}$, 则该笔交易不予通过,校核流程如图4所示。

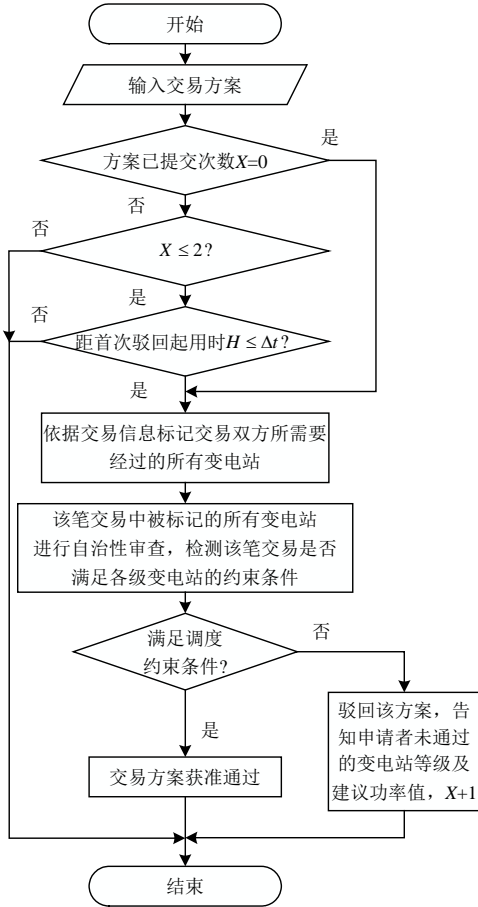


图4 变电站自治物理约束管控流程图

Fig. 4 Flow chart of physical constraint management and control based on substation autonomy

变电站自治链(BC2)会首先判断该方案已提交次数 X 是否为 0, 若 $X=0$, 则跳过时间监测步骤, 直接提取交易双方的地址信息(A 和 B)进行线路规划; 若 $X \neq 0$, 则进一步判断 $X \leq 2$ 是否成立。若 $X \leq 2$ 的判断条件不成立, 则直接作废该笔交易方案, 并向所涉及的节点发送消息, 告知其本时段申请次数已达上限; 若 $X \leq 2$ 的判断条件成立, 则进行交易时间监测。若该笔交易距本时段首次被驳回起用时 $H \leq \Delta t$, 则验证通过, 并执行线路规划; 否则作废该笔交易方案, 并向所涉及的节点发送消息, 告知其本时段交易申请已超时。

以线路中最高等级变电站为 1000kV 为例, 对于通过了初步验证的交易方案, 变电站自治链(BC2)依照所提交的地址信息, 会自动识别本笔交易所要涉及的最高变电站等级:

$$f(A, B) = n, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (1)$$

式中: 1 代表 35kV 变电站; 2 代表 110kV 变电站; 3 代表 220kV 变电站; 4 代表 330kV 变电站; 5 代表 500kV 变电站; 6 代表 1000kV 变电站。

同样的, 分别输入购电方(A)和售电方(B)的信息, 变电站自治链(BC2)会自动识别与购(售)电方直连的变电站等级:

$$f(A) = m, \quad m = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (2)$$

$$f(B) = u, \quad u = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (3)$$

于是, 总计需要经过 N 级变电站:

$$N = 2n - m - u + 1 \quad (4)$$

由上传的交易数据可知该笔交易在某一变电站申请使用的功率 $P_{A_i}^k$ 和 $P_{B_j}^h$ (即有功功率); 通过区块链网络中相关数据的可知该变电站在该笔交易申请时段内功率负载值 $P_{A_i, \text{load}}^k$ 、 $P_{B_j, \text{load}}^h$ 和功率最大值 $P_{A_i, \text{max}}^k$ 、 $P_{B_j, \text{max}}^h$, 计算该时段可用功率 $P_{A_i, \text{ava}}^k$ 、 $P_{B_j, \text{ava}}^h$, 如下:

$$P_{A_i, \text{ava}}^k = P_{A_i, \text{max}}^k - P_{A_i, \text{load}}^k \quad (5)$$

$$P_{B_j, \text{ava}}^h = P_{B_j, \text{max}}^h - P_{B_j, \text{load}}^h \quad (6)$$

式中: $k \in [1, n-m+1]$; $i \in [m, n]$; $h \in [n-m, N]$; $j \in [u, n]$ 。

该笔交易在该时段内某级变电站的所需的总功率:

$$P_{A_i, \text{总}}^k = P_{A_i}^k + P_{A_i, L}^k \quad (7)$$

$$P_{B_j, \text{总}}^h = P_{B_j}^h + P_{B_j, L}^h \quad (8)$$

$P_{A_i, \text{总}}^k$ 和 $P_{B_j, \text{总}}^h$ 表示在购电方(A)或售电方(B)到最高级调度之间的每级调度上, 该方案申请使用的总功率值, $P_{A_i}^k$ 和 $P_{B_j}^h$ 表示其有功功率, $P_{A_i, L}^k$ 和 $P_{B_j, L}^h$ 表示线路损耗等其他因素导致的有功功率消耗。

各级变电站所能提供的无功补偿最大值为 $Q_{A_i, \text{max}}^k$ 和 $Q_{B_j, \text{max}}^h$, 无功功率备用值为

$$Q_{A_i, \text{res}}^k = Q_{A_i, \text{GC}}^k - Q_{A_i, \text{LD}}^k - Q_{A_i, L}^k \quad (9)$$

$$Q_{B_j, \text{res}}^h = Q_{B_j, \text{GC}}^h - Q_{B_j, \text{LD}}^h - Q_{B_j, L}^h \quad (10)$$

式中: $Q_{A_i, \text{res}}^k$ 和 $Q_{B_j, \text{res}}^h$ 为无功功率备用值; $Q_{A_i, \text{GC}}^k$ 和 $Q_{B_j, \text{GC}}^h$ 为源端供应的无功功率; $Q_{A_i, \text{LD}}^k$ 和 $Q_{B_j, \text{LD}}^h$ 为无功

负荷; $Q_{A,L}^k$ 和 $Q_{B,L}^h$ 为网络无功功率的损耗。

利用符号函数判断在各级变电站申请使用的总功率值 $P_{A,总}^k$ 、 $P_{B,总}^h$ 是否小于相应的可用有功功率值 $P_{A,ava}^k$ 、 $P_{B,ava}^h$; 以及 $Q_{A,res}^k$ 和 $Q_{B,res}^h$ 是否小于对应调度能提供的最大无功功率值 $Q_{A,max}^k$ 和 $Q_{B,max}^h$:

$$\omega_{pk} = \text{sgn}[\text{sgn}(P_{A,ava}^k - P_{A,总}^k) - 1] + 1 \quad (11)$$

$$\omega_{ph} = \text{sgn}[\text{sgn}(P_{B,ava}^h - P_{B,总}^h) - 1] + 1 \quad (12)$$

$$\omega_{Qk} = \text{sgn}[\text{sgn}(Q_{A,max}^k - Q_{A,res}^k) - 1] + 1 \quad (13)$$

$$\omega_{Qh} = \text{sgn}[\text{sgn}(Q_{B,max}^h - Q_{B,res}^h) - 1] + 1 \quad (14)$$

最后, 计算是否线路中所有变电站全部满足功率要求:

$$\varphi_1 = \prod_{k=1}^{n-m+1} [(2^{\omega_{pk}} - 1)(2^{\omega_{Qk}} - 1)] \prod_{h=n-m}^N [(2^{\omega_{ph}} - 1)(2^{\omega_{Qh}} - 1)] \quad (15)$$

若 $\varphi_1=1$, 则线路上所有变电站均满足功率要求, 该笔交易可以被通过; 若 $\varphi_1=0$, 则线路上存在某一或某几个变电站未满足功率要求, 该笔交易未获准通过。

对于已获准通过的交易方案, 变电站自治链(BC2)向源-售交易链(BC1)发送交易已通过的信息, 并按该方案进行能量交易与传输。对于未获准通过的交易, 变电站自治链(BC2)会对其已申请次数 X 做+1 处理, 并向源-售交易链(BC1)返回该方案的相关信息, 如: X 值、方案未通过的原因(如变电站功率限制、线损超标等)、以及建议修改措施等(如降低申请功率值、推迟交易时段等)。

3.2 变电站自治与调度监管协同作用的物理约束管控策略

由变电站对交易进行核对和判断的监管方式, 从理论上和算力支撑上固然是可行的, 但考虑到目前电网公司体系架构以调度为中心的实际情况、且为了进一步体现“交易完全去中心化, 调度部分去中心化”的弱中心化思想, 增强模型的鲁棒性, 本文又引入了调度参与比对的管理模式, 校核流程如图5所示。

将交易双方的地址信息(A和B)输入源-售交易链(BC1), 自动识别和计算本笔交易所要涉及的最高级变电站等级、与购(售)电方直连的调度等级, 如下:

$$g(A, B) = \alpha, \quad \alpha = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (16)$$

$$g(A) = \beta, \quad \beta = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (17)$$

$$g(B) = \gamma, \quad \gamma = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (18)$$

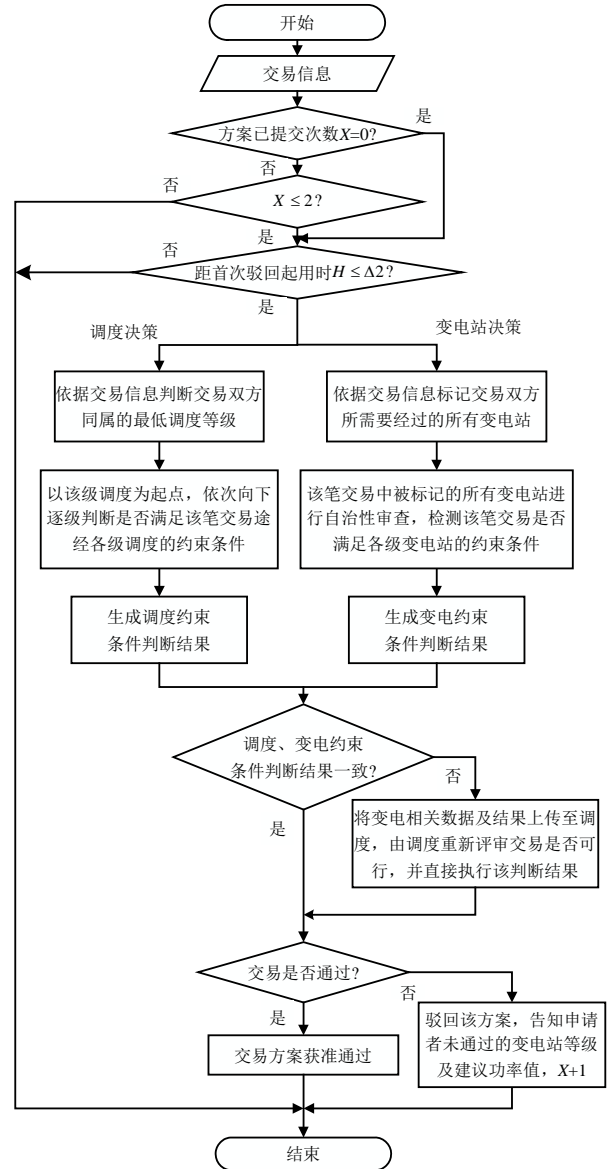


图5 变电站自治与调度监管协同作用的物理约束管控流程图

Fig. 5 Flow chart of physical constraint management and control based on the synergistic effect of substation autonomy and dispatch supervision

式中: 1 代表县级调度; 2 代表市级调度; 3 代表省级调度; 4 代表网级调度; 5 代表国级调度。

于是有总计需要经过 δ 级调度:

$$\delta = 2\alpha - \beta - \gamma + 1 \quad (19)$$

理同变电站计算过程, 可知该时段该笔交易在某一调度级的可用功率 $P_{A,ava}^x$ 、 $P_{B,ava}^y$ 为

$$P_{A,ava}^x = P_{A,max}^x - P_{A,load}^x \quad (20)$$

$$P_{B,ava}^y = P_{B,max}^y - P_{B,load}^y \quad (21)$$

式中: $P_{A,ava}^x$ 为从购电方(A)到最高级调度之间的各级调度的可用功率值; $P_{A,max}^x$ 为其最大功率值;

$P_{A_{load}}^x$ 为其当前负载值, 其中 $x \in [1, \alpha - \beta + 1], i \in [\beta, \alpha]$;
 $P_{B_{j,ava}}^y$ 为从售电方(B)到最高级调度之间的各级调度的可用功率值; $P_{B_{j,max}}^y$ 表示其最大功率值; $P_{B_{j,load}}^y$ 表示其当前负载值, $y \in [\alpha - \beta, \delta], j \in [\gamma - \alpha]$ 。

该笔交易在该时段内某一调度级的所需的总功率如下:

$$P_{A_{总}}^x = P_{A_i}^x + P_{A_{iL}}^x \quad (22)$$

$$P_{B_{j总}}^y = P_{B_j}^y + P_{B_{jL}}^y \quad (23)$$

式中: $P_{A_{总}}^x$ 和 $P_{B_{j总}}^y$ 为在购电方(A)或售电方(B)到最高级调度之间的每级调度上, 该方案申请使用的总功率值; $P_{A_i}^x$ 和 $P_{B_j}^y$ 为其有功功率; $P_{A_{iL}}^x$ 和 $P_{B_{jL}}^y$ 为线路损耗等其他因素导致的有功功率消耗。

各级调度下辖机构所能提供的无功补偿最大值为: $Q_{A_{max}}^x$ 和 $Q_{B_{j,max}}^y$, 无功功率备用值为

$$Q_{A_{res}}^x = Q_{A_{GC}}^x - Q_{A_{LD}}^x - Q_{A_{iL}}^x \quad (24)$$

$$Q_{B_{j,res}}^y = Q_{B_{jGC}}^y - Q_{B_{jLD}}^y - Q_{B_{jL}}^y \quad (25)$$

式中: $Q_{A_{res}}^x$ 和 $Q_{B_{j,res}}^y$ 为无功功率备用值; $Q_{A_{GC}}^x$ 和 $Q_{B_{jGC}}^y$ 为源端供应的无功功率; $Q_{A_{LD}}^x$ 和 $Q_{B_{jLD}}^y$ 为无功负荷; $Q_{A_{iL}}^x$ 和 $Q_{B_{jL}}^y$ 为网络无功功率的损耗。

利用符号函数判断在各级调度上申请使用的总功率值 $P_{A_{总}}^x$ 和 $P_{B_{j总}}^y$ 是否小于相应的可用有功功率值 $P_{A_{ava}}^x$ 和 $P_{B_{j,ava}}^y$; 以及 $Q_{A_{res}}^x$ 和 $Q_{B_{j,res}}^y$ 是否小于对应调度能提供的最大无功功率值 $Q_{A_{max}}^x$ 和 $Q_{B_{j,max}}^y$:

$$\omega_{Px} = \text{sgn}[\text{sgn}(P_{A_{ava}}^x - P_{A_{总}}^x) - 1] + 1 \quad (26)$$

$$\omega_{Py} = \text{sgn}[\text{sgn}(P_{B_{j,ava}}^y - P_{B_{j总}}^y) - 1] + 1 \quad (27)$$

$$\omega_{Qx} = \text{sgn}[\text{sgn}(Q_{A_{max}}^x - Q_{A_{res}}^x) - 1] + 1 \quad (28)$$

$$\omega_{Qy} = \text{sgn}[\text{sgn}(Q_{B_{j,max}}^y - Q_{B_{j,res}}^y) - 1] + 1 \quad (29)$$

最后, 计算线路中所有调度级是否满足全部功率要求:

$$\varphi_2 = \prod_{x=1}^{a-b+1} [(2^{\omega_{Px}} - 1)(2^{\omega_{Qx}} - 1)] \prod_{y=a-b}^N [(2^{\omega_{Py}} - 1)(2^{\omega_{Qy}} - 1)] \quad (30)$$

若 $\varphi_2=1$, 则线路上所有调度级均满足要求; 若 $\varphi_2=0$, 则线路上存在某一或某几个调度级未满足要求。此时调度体系和变电站体系会各自生成一组结果, 即 φ_1 和 φ_2 , 令:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (31)$$

①若 $\varphi=0$, 即 $\varphi_1=0$ 且 $\varphi_2=0$, 调度和变电两个体

系均判断交易无法执行, 则直接输出结果, 交易未获准通过。

②若 $\varphi=2$, 即 $\varphi_1=1$ 且 $\varphi_2=1$, 调度和变电两个体系均判断交易可以执行, 则直接输出结果, 交易获准通过。

③若 $\varphi=1$, 即 $\varphi_1=0$ 且 $\varphi_2=1$, 或 $\varphi_1=1$ 且 $\varphi_2=0$, 调度和变电两个体系有且仅有一方判断交易可以执行, 此时将变电站用于计算的相关数据提交调度审核, 由调度重新计算结果, 调度担任弱中心化架构的中心决策角色, 并直接执行其二次计算结果。

线路规划的前置步骤, 及已获准和未获准通过方案的处理操作均同 3.1 节, 故本节不再赘述。

4 结论

能源互联网融合了多种能源、多类信息, 是今后能源行业发展的必然趋势; 而区块链技术因其独特的去中心化、防篡改、去信任等特性, 在应用于能源互联网建设的问题上, 具备天然的适应性和契合性。本文在简要概括了这一特性的基础上, 提出了基于区块链技术的能源互联网物理层次架构和逻辑协议层模型; 设计了能源互联网在交易完全去中心化后的智能交易模式; 探讨了在调度部分去中心化后, 基于区块链的垂直分级调度系统和多级变电站的协同调度模式; 定义了该模式下各级调度、电厂、变电站、售电公司与各类用户的节点属性和任务职能, 以及处在不同层级、由不同节点所构成的各区块链的类型; 探究了变电站自治与调度监管申请协同作用的物理约束管控及电网安全校核策略; 最后, 形成了以“交易完全去中心化, 调度部分去中心化”为特点, 基于区块链技术构建的智能交易与协同调度模式, 为实现能源互联网高效安全运行贡献了方案及思路。目前针对区块链和能源互联网的研究尚处于初级阶段, 望本文能对相关技术领域的发展起到积极地推进作用。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 《国家电网公司促进新能源发展白皮书(2016)》[R]. 北京: 国家电网公司, 2016.
State Grid Corporation. White paper of new energy development promotion[R]. Beijing: State Grid Corporation, 2016(in Chinese).
- [2] 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.
Yang Dechang, Zhao Xiaoyu, Xu Zixiao, et al. Application status analysis and prospect of blockchain

- in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3664-3671(in Chinese).
- [3] 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. Sun Hongbin, Guo Qinglai, Pan Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and prospect[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013(in Chinese).
- [4] 张屹. 中国能源安全与全球治理模式反思——以中国能源战略为视角[J]. 山东行政学院学报, 2017(2): 76-81. Zhang Yi. Review of China's energy security and global governance model: from the perspective of China's energy strategy[J]. Journal of Shandong Academy of Governance, 2017(2): 76-81(in Chinese).
- [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. Sun Hongbin, Guo Qingcai, Pan Shaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8(in Chinese).
- [6] 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): 4011-4022. 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): 4011-4022(in Chinese).
- [7] 沈鑫, 裴庆祺, 刘雪峰. 区块链技术综述[J]. 网络与信息安全学报, 2016, 2(11): 11-20. Shen Xin, Pei Qingqi, Liu Xuefeng. Overview of blockchain technique[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2016, 2(11): 11-20(in Chinese).
- [8] 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. Research on multi module collaborative autonomous mode of energy internet based on blockchain framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3672-3681(in Chinese).
- [9] 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办法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638. Tai Xue, Sun Hongbin, Guo Qinglai. Measures for power trading and congestion management based on blockchain in the energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638(in Chinese).
- [10] 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. Automatic demand response of energy storage system in energy local area network based on blockchain technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3703-3716(in Chinese).
- [11] 武庚, 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 application model of blockchain technique in integrated demand side response resource transaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3717-3728(in Chinese).
- [12] 欧阳旭, 朱向前, 叶伦, 等. 区块链技术在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. Ouyang Xu, Zhu Xiangqian, Ye Lun, et al. Application of blockchain technique in direct purchase of large consumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745 (in Chinese).
- [13] 李柏青, 刘道伟, 秦晓辉, 等. 信息驱动的大电网全景安全防御概念及理论框架[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5796-5805. Li Baiqing, Liu Daowei, Qin Xiaohui, et al. Concept and theory framework of panoramic security defense for buck power system driven by information[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5796-5805(in Chinese).
- [14] 高昆仑, 王志皓, 安宁钰, 等. 基于可信计算技术构建电力监测控制系统网络安全免疫系统[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 28-35. Gao Kuncun, Wang Zhihao, An Ningyu, et al. Construction of the immune system of cyber security for electric power supervise and control system based on trusted computing[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2017, 49(2): 28-35(in Chinese).
- [15] 曾之明. 颠覆未来的黑科技: 区块链的世界你懂不懂[J]. 金融经济: 市场版, 2017(4): 36-37. Zeng Zhiming. Black technology to subvert the future: Do you understand the world of block chains[J]. Finance & Economy: Market Edition, 2017(4): 36-37(in Chinese).
- [16] Salahuddin M, Alam K. Internet usage, electricity consumption and economic growth in Australia: a time series evidence[J]. Telematics and Informatics, 2015, 32(4): 862-878.
- [17] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124. Zeng Ming, Yang Yongqi, Liu Dunnan, et al. Energy internet “source-network-load-storage” coordination and optimization of operation modes and key technologies [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124(in

- Chinese).
- [18] Huang A Q, Crow M C, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [19] 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: 31-33.
- Zou Yun, Zhang Haining, Tang Yi, et al. Blockchain technique guidelines[M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 31-33(in Chinese).
- [20] 曹寅. 能源区块链与能源互联网[J]. 风能, 2016(5): 14-15.
- Cao Yan. Energy blockchain and energy internet[J]. Wind Energy, 2016(5): 14-15(in Chinese).
- [21] 王安平, 范金刚, 郭艳来. 区块链在能源互联网中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2016(9): 1-6.
- Wang Anping, Fan Jingang, Guo Yanlai. Application of blockchain in energy internet[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2016(9): 1-6 (in Chinese).
- [22] 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.
- Yan Yong, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. Blockchain in energy systems: concepts, applications and perspectives[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(2): 12-20(in Chinese).
- [23] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5103-5110.
- Liu Zhenya. Research of global clean energy resource and power grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5103-5110(in Chinese).
- [24] Zyskind G, Nathan O, Pentland A. Decentralizing privacy: using blockchain to protect personal data[C]//IEEE Security and Privacy Workshops. San Jose, CA, USA: IEEE Computer Society, 2015: 180-184.
- [25] 刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未来综合配电系统形态展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3023-3034.
- Liu Dichen, Peng Sicheng, Liao Qingfen, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3023-3034(in Chinese).
- [26] 赵阔, 邢永恒. 区块链技术驱动下的物联网安全研究综述[J]. 信息网络安全, 2017(5): 1-6.
- Zhao Kuo, Xing Yongheng. Security survey of internet of things driven by block chain technology[J]. NETINFO SECURITY, 2017(5): 1-6(in Chinese).
- [27] Smith S B. Method and system to use a block chain infrastructure and Smart Contracts to monetize data transactions involving changes to data included into a data supply chain, US 20150379510 A1[P]. 2015.
- [28] Azaria A, Ekblaw A, Vieira T, et al. MedRec: using blockchain for medical data access and permission management[C]//International Conference on Open and Big Data. Vienna, Austria: IEEE, 2016: 25-30.
- [29] Kaneko I. Lightweight security framework for media internet of things using probabilistic multilateral security model and block chain[J]. IEEE Transactions on Electronics Information & Systems, 2017, 137(6): 796-801.
- [30] 杨方, 白翠粉, 张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3495-3502.
- Yang Fang, Bai Cuifen, Zhang Yibin. Research on the value and implementation framework of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 4011-4022(in Chinese).
- [31] 李彬, 张洁, 祁兵, 等. 区块链: 需求侧资源参与电网互动的支撑技术[J]. 电力建设, 2017, 38(3): 1-8.
- Li Bin, Zhang Jie, Qi Bing, et al. Blockchain: supporting technology of demand side resources participating in grid interaction[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(3): 1-8(in Chinese).
- [32] 张向宏, 苏禹. 能源互联网及其安全防护体系建设研究[J]. 微型机与应用, 2015, 34(9): 5-11.
- Zhang Xianghong, Su Yu. Research on energy internet and its security protection system construction [J]. Microcomputer & Its Applications, 2015, 34(9): 5-11(in Chinese).
- [33] Lewenberg Y, Sompolinsky Y, Zohar A. Inclusive block chain protocols[M]. Springer Berlin Heidelberg: Financial Cryptography and Data Security, 2015: 528-547.
- [34] 姚建国, 高志远, 杨胜春. 能源互联网的认识和展望[J]. 电力系统自动化, 2015(23): 9-14.
- Yao Jianguo, Gao Zhiyuan, Yang Shengchun. Understanding and prospects of energy internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(23): 9-14(in Chinese).

收稿日期: 2017-10-19。

作者简介:

龚钢军(1974), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为能源互联网、电力系统通信与资源分配、能源电力信息安全, gong@ncepu.edu.cn;

*通信作者: 张桐(1992), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区块链在能源互联网中的应用、能源电力信息安全, Zhangtong0804@126.com。

(责任编辑 吕鲜艳)



龚钢军

Research on Intelligent Trading and Cooperative Scheduling System of Energy Internet Based on Blockchain

GONG Gangjun¹, ZHANG Tong¹, WEI Peifang¹, SU Chang¹, WANG Huijuan¹,
WU Qiuxin², LIU Ren³, ZHANG Shuai²

(1. North China Electric Power University; 2. Beijing Information Science & Technology University;
3. Beijing Excellent Network Security Technology Corp.,Ltd)

KEY WORDS: energy internet; blockchain; intelligent contract; scheduling transaction; physical constraint

The Blockchain has the features of intelligent contracts, distribution decision, cooperative autonomy, tamper resistance and transparency. These characteristics make it naturally similar to the Energy Internet in running ways, topological form, bilateral trade, synergic dispatch and etc. It can finely support the construction of Energy Internet. Based on the analysis of the physical topological and the logical protocol hierarchy of the Energy Internet, this paper, from the perspective of Blockchain as well as Energy Internet, proposes the Energy Internet hierarchy model based on Blockchain and designs the intelligent trade model of Energy Internet and trust mechanism. Beyond that, this paper also discusses the synergic scheduling model between vertical hierarchical scheduling systems and multi-level substations after decentralizing the dispatch section as well as the corresponding security check of power grid and physical constraints. After Energy Internet is partly decentralized, an intelligent transaction, synergic dispatch, which is supported by "Blockchain technique" is formed, and it is conducive to the perfect integration of energy flow and information flow and secure transmission.

Considering the actual situation of the Power Grid Corporation architecture with dispatch as the center, in order to further realize the weak-center thinking that "completely decentralization of transactions and partial decentralization of the dispatch part", and enhance the robustness of the model, in this paper, the management mode which scheduling participates comparison is introduced.

$$\delta = 2\alpha - \beta - \gamma + 1 \quad (1)$$

$$P_{A_i \text{ava}}^x = P_{A_i \text{max}}^x - P_{A_i \text{load}}^x \quad (2)$$

$$P_{A_i \text{total}}^x = P_{A_i}^x + P_{A_i L}^x \quad (3)$$

$$Q_{A_i \text{res}}^x = Q_{A_i \text{GC}}^x - Q_{A_i \text{LD}}^x - Q_{A_i L}^x \quad (4)$$

$$\omega_{P_x} = \text{sgn}[\text{sgn}(P_{A_i \text{ava}}^x - P_{A_i \text{total}}^x) - 1] + 1 \quad (5)$$

$$\phi_2 = \prod_{x=1}^{a-b+1} [(2^{\omega_{P_x}} - 1)(2^{\omega_{Q_x}} - 1)] \prod_{y=a-b}^N [(2^{\omega_{P_y}} - 1)(2^{\omega_{Q_y}} - 1)] \quad (5)$$

The Energy Internet has integrated a variety of energy and multiple types of information, which is the inevitable trend of the development of energy industry in the future. In the application of energy Internet construction, block chaining technology has natural adaptability and compatibility, because of its unique centralization, tamper-proof, distrust and so on. On the basis of a brief summary of this feature, this paper proposes an energy internet physical hierarchy structure and a logical protocol layer model based on block chain technology. This paper also designs the intelligent transaction mode of the energy internet after the transaction is completely decentralized. The cooperative scheduling model based on block chain vertical hierarchical scheduling system and multi-stage substation after the decentralization of the scheduling part is discussed. In addition, this paper defines the node attributes and task functions of all levels of dispatching, power plants, substations, power companies and all kinds of users, as well as the types of block chains that are at different levels and are composed of different nodes. This paper probes the physical constraint control and the grid safety checking strategy of the substation autonomy and the dispatching monitoring application. Finally, an intelligent transaction and collaborative scheduling mode based on block chain technology, which is characterized by "completely decentralization of transactions and partial decentralization of the dispatch part" is formed. What's more, it contributes to the realization of energy efficient and safe operation of the energy Internet. At present, the research on block chain and energy Internet is still in the primary stage. This paper is expected to play a positive role in the development of relevant technical fields.