

基于联盟链技术的跨国电力交易框架设计

高志远^{1*}, 高艺², 卢文冰³, 王璐²

(1. 中国电力科学研究院(南京), 江苏省 南京市 210003; 2. 全球能源互联网发展合作组织, 北京市 西城区 100031;
3. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Framework Design of Transnational Power Trade Based on Consortium Block Chain

GAO Zhiyuan^{1*}, GAO Yi², LU Wenbing³, WANG Lu²

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu Province, China;
2. Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;
3. Institute of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

Abstract: The grid-based power transaction negotiation mode between nations cannot support all types of transnational power trade in a standardized and comprehensive manner. Because it is limited by various harsh conditions, the market, which relies heavily on the credit of operation organization and mutual trust of members, is difficult to form. The emergence of block chain technology has created a new transnational power trade mode between the above two modes. Starting from the actual demands of transnational power trade, we analyze the applicability of block chain technology, and establish a framework of transnational power centralized trade based on a consortium block chain that includes a semi-distributed network topology, a block chain data structure supporting multiple market subjects trade, and a consensus mechanism for multiple management nodes. Based on the proposed framework, a detailed trade process is designed, and the key supporting technologies, such as model and data sharing technology and security constraint clearing technology, are analyzed. We confirm the applicability of block chain technology to transnational power centralized trade. The proposed solution is a universal framework for transnational power trade.

Keywords: block chain; consortium block chain; electricity market; transnational power trade

摘要: 网对网式的国与国之间的电力协商交易模式无法全面支撑各类跨国电力交易, 严重依赖运营机构信用和成员

互信的跨国电力市场也不容易形成, 区块链技术有可能提供一种介于以上两种方式之间的跨国电力交易模式。从跨国电力交易的实际需求出发, 分析了区块链技术的适用性, 建立了一个包含半分布式网络拓扑结构、多主体交易区块链数据结构和多管理节点共识机制的基于联盟链的跨国电力交易框架, 并设计了详细的跨国电力集中交易过程, 分析了模型与数据共享、安全约束出清等关键支撑技术。研究表明, 区块链技术对于跨国电力集中交易有很高的适用性, 所提出的解决方案提供了具有通用性的跨国集中交易支撑框架。

关键词: 区块链; 联盟链; 电力市场; 跨国电力交易

0 引言

化石能源资源有限, 环境污染和气候变化问题日益严峻, 清洁能源的大规模开发利用成为发展趋势。全球清洁能源分布不均, 亚欧非85%的风、光、水能资源集中在北非、中非、西亚、中亚、蒙古、远东及西伯利亚地区, 跨国电力交易使电能跨越国界从富余、低价地区流向经济发达、需求紧缺的地区^[1-3]。

文献[1]从全球能源、环境、气候等宏观方面论证了跨国电网互联和电力交易的必然性。文献[4]在信息通信技术方面为支持跨国联网提供了调度和交易系统互联设计。文献[5]分邻国互联、跨多国互联、区域一体化互联等不同场景设计了跨国电力交易机制, 其实质包括国家之间双边协商和成立地区性跨国电力市场两种方式。文献[6]提出了一种电力市场模式下中长期交易优化模型。

双边协商方式的参与主体是两国政府或两国相邻

基金项目: 国家电网公司科技项目(面向全球能源互联网的电网调度和交易模式研究)。

Science and Technology Foundation of SGCC (Research on Grid Dispatching and Trade Mode for Global Energy Interconnection).

的电网公司，具有易于起步、便于集中处理大宗交易的优点，但存在以下不足：①交易的效率较低，主要依靠人工，多个国家之间的两两协商工作量巨大；②交易的品种有限，目前主要是长期双边合约、政府协调下的双边协商以及部分衍生交易；③交易的内容及其执行不规范，缺乏通用标准。

跨国电力市场方式能够支持发电厂、售电公司、电力用户等电能生产和消费主体参与交易，提供规范、高效、系统化的交易品种和结算机制，当前国际上主要以北美集中式电力市场^[4-5]和欧洲分散式电力市场^[7]为代表。建立跨国电力市场是一个复杂的系统问题，市场运营机构的信用以及潜在成员之间的互信是建立电力市场的基础，这涉及国家、市场运营机构、市场主体之间的复杂关系，也涉及市场运行的透明度和开放性。以欧洲统一电力市场为例，为了实现统一出清，不仅需要在欧盟法律法规层面对电网公司、交易机构、相关市场主体明确权利和义务，而且各类市场成员之间还需要签署复杂的协议^[7]。

中国国内的跨省跨区交易存在上级交易和调度机构，相对较容易形成主体间的共享和支援，跨国电力交易的特殊性在于：相互间的独立和平等；缺少有强约束力的上级管理机构；由于安全和利益因素，更加缺少信任和资源共享。区块链技术创造了一种基于技术背书而保障彼此信任的可能，即建立一种基于区块链技术的跨国电力交易机制，比跨国政府间协商交易自动化程度高，可支持更多交易品种，交易行为更加规范，同时通过技术手段加强跨国电力交易过程和结果的可信度，有益于增加参与国家和市场成员间的互信，更易于实施并具有更广泛的适用性。

本文从区块链技术对解决跨国电力交易问题的适用性分析出发，构建了一种基于联盟链的跨国电力交易框架，并基于区块链ICT（information and communication technology）技术支撑详细阐述了跨国电力交易过程，分析了为保证交易的安全、高效所需要的关键技术。

1 区块链技术及其适用性

区块链技术来源于2008年密码学邮件组中的一篇倡议数字加密货币的论文，随后一种数字货币——比特币获得开源实现，其目的是构建跨越政府和银行中心化管理的数字货币，同时通过技术手段实现一般的货币功能。近年来，数字货币蓬勃发展^[8-9]，区块链技

术引起广泛关注和应用。

比特币首次展示了一种基于密码学、P2P网络、共识算法等技术的分布式数据库（账本）设计。区块链技术也不断发展，目前形成了以比特币为代表的区块链1.0、以基于智能合约的以太坊和HyperLedger等为主要代表的区块链2.0以及以可编程社会为目标的区块链3.0技术路径。

区块链技术体系具有一定的灵活性，各类数字货币和行业应用根据实际需要形成独特的技术框架。区块链典型技术内容主要包括：①在基础支撑技术上，主要包括链式区块数据结构、数字加密、分布式网络、共识算法、智能合约、默克尔树（Merkle Tree）结构和散列（Hash）函数、共识算法等^[8,10-11]；②在应用架构上，一般从下到上包括网络层、数据层、共识层、合约层、应用层等^[10]；③在技术特点上，具有分布式同步、去中心化、全程可追溯、不可篡改、兼有保密性和开放性、自动化程度高等特点。此外，区块链技术在应用安全^[12]、与人工智能技术结合^[13]等方面也逐步引起重视。本文根据跨国电力交易的需要，对相关区块链技术进行了选择和组合设计。

在建立跨国电力市场条件尚不成熟的情况下，区块链技术有助于加速互信过程、建立分布式的跨国电力交易环境。其适用性体现在以下几个方面：①区块链在多种数字货币的发展、分布式能源交易等示范应用中支持电力交易，有一定的技术基础，目前在共识算法、网络结构、加解密算法、散列函数、智能合约等实现技术上已有多种可选项；②区块链具有可追溯、不可篡改等特点，用客观化的数据记录弥补了市场权威裁判的缺失，是解决跨国电力交易互信问题的最重要技术背书；③区块链去中心化的特点，适合解决难以及时建立统一市场、缺乏共同信任的权威机构和系统的问题；④智能合约等区块链自动化技术为高效、自治的跨国电力交易提供了技术支撑。

区块链按管理责任主体可分为公有链、私有链、联盟链^[11]。公有链是无授权机制、对所有节点开放的完全去中心化的区块链；联盟链是只允许特定群体成员和有限的第三方加入、内部指定多个预选节点作为记账人的部分去中心化的区块链；私有链可以看成是只有1个管理机构的特殊联盟链。显然，如果跨国电力交易基于公有链，所有企业和个人都可以不经授权直接参与是不合适的。联盟链比较适合跨国电力交易环境，各国内部的电力交易中心或调度机构相当于联盟链的管理节点，只有经过认证的市场成员才能被授

权参与跨国电力交易。

目前电力行业已开展了多方面的区块链技术应用研究^[14],包括能源互联网^[15]、分布式电力交易^[16]、配电网和微电网电力交易^[17-18]、需求侧响应资源交易^[19],甚至大用户直购电交易^[20]等,主要集中于参与主体众多的去中心化场景^[21-22]。跨国电力交易也是一个典型的去中心化交易场景,但目前尚未见相关研究。

2 基于联盟链的跨国电力交易框架

以各国电力交易中心(或类似的管理机构)为联盟链的管理节点,设计了如图1所示的跨国电力交易网络拓扑结构。

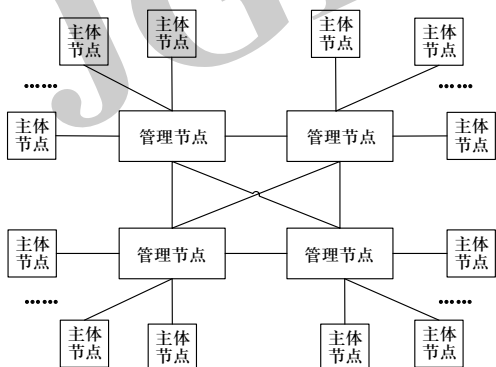


图1 基于联盟链的跨国电力交易网络拓扑

Fig. 1 Network topology of transnational power trade based on consortium block chain

图1中主体节点是指参与跨国电力交易的各类市场主体,管理节点对直接连接的主体节点具有允许接入、接受交易申报信息、通知市场交易出清结果、接受主体节点申诉的权利。所有主体节点必须且只能选择连接1个管理节点,所有管理节点之间两两连接。

实际的管理节点应该具有各国国内电力交易组织和电网调度的职能,具备这2种职能的机构组织形式在各国有区别,有合一的(例如美国),有分开的(例如欧洲),也有相对独立的(例如中国现在的情况)。所有跨国电力交易过程中的准入、注册、交易组织、出清乃至事后的结算都需要基于管理节点的去中心化(实际是多中心化)管理,形成如图2所示的基于联盟链的跨国电力交易框架,各个管理节点相互平等,没有具备强制约束力的上级管理机构。

图2中框架的具体实现主要包括以下内容。

1) 网络组织。

网络层总体采用典型的半分布式拓扑,市场主体

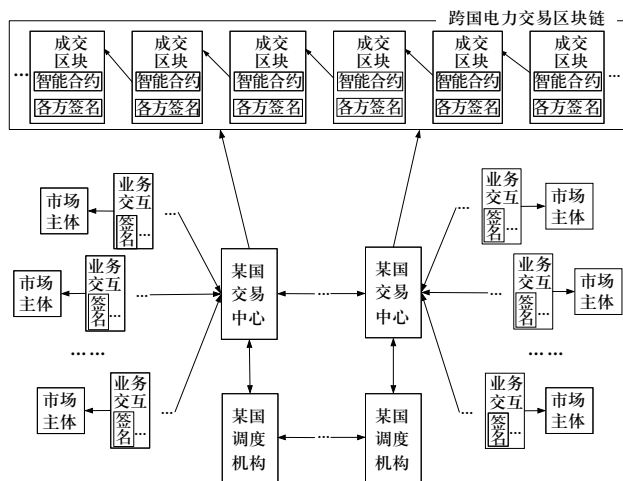


图2 基于联盟链的跨国电力交易框架

Fig. 2 Framework of transnational power trade based on consortium block chain

与本国管理节点之间一般采用互联网方式;本国管理节点内部不同机构之间的网络,依照该国原来的传统方式;各国管理节点作为跨国电力交易网络的超级节点,其间的通信网络需要根据物理分布和业务量变化情况,灵活建立分布式网络,典型的例如租用电信专网等。

2) 数据结构。

图2中的业务信息可分为业务交互信息和最终的成交信息2类。前期业务交互信息的核心是在市场主体和管理节点之间、管理节点相互之间采用事先约定的可解析的数据结构,可以采用但不是必须采用区块链结构。最终的交易成交信息作为执行和结算的凭证,应采用区块链数据结构,形成不可篡改、可追溯的公共凭证。

图3展示了一种可能的成交区块链数据结构。Hash值指区块中所有交易的Merkle树根的散列函数计算值;交易数据包含交易时间、量、价等信息,根据中长期和实时交易、物理合约和金融合约的不同,还可进一步区分;数据区块中还包含买卖双方、所涉及的各国管理节点的签名、时间戳等信息。根据交易买卖双方的物理位置,可能需要若干个管理节点的共同签名才有效。

3) 形成共识。

共识层的核心任务在于提供一种机制,支持形成最终的跨国电力交易区块链,提供必要的效率保障,避免数据的不一致并实现拜占庭容错。当前主流的区块链共识算法往往比较复杂^[11],主要由于:①硬软件故障,例如信道失误、网络延迟、系统宕机;②人为作弊。

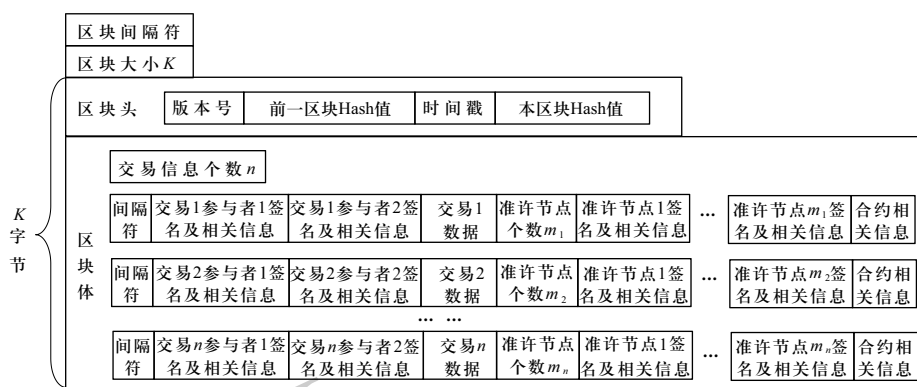


图3 成交区块数据结构

Fig. 3 Data structure of transaction block

跨国电力交易环境具有特殊性，有助于避免共识算法的复杂性，主要包括：①管理节点具有一定的信用度。各国市场成员的信用度不能保证，但其都受管理节点的管理，而管理节点通常是由各国政府授权的电力调度和交易机构，有一定的信用度。②有限的管理节点间的协商一致有保证。各国管理节点平等协作产生市场交易结果，虽然同一笔交易只能有一个负责记账的管理节点，该交易也必须经过其他相关管理节点的同意。如果产生异议，那么背后就是管理节点间的协商。区块链技术不可篡改、可追溯的特点，为这种协商提供了充分的事实依据，而管理节点个数有限，这种协商并不必须完全是线上自动化完成，这些条件为有限的管理节点间的协商一致提供了保证。作为对比，在数字货币的情况下如果数据链出现分歧，只能通过工作量证明PoW或者权益证明PoS等算法强行保持一致。

基于图1和图2的框架，设计跨国电力交易共识机制：①选择记账管理节点：各国按约定的周期，轮流由各管理节点作为主管理节点，负责汇总和登记，接受其他各管理节点的监视；②造区块：在记账周期内，主管理节点根据事先商定的原则，产生出清结果，构造区块并通知其他管理节点；③其他管理节点验证：收到区块的其他管理节点对出清结果进行验证，如有异议，则与主管理节点协商，并最终达成一致；④加入区块链：主管理节点把达成一致的区块加入区块链，并同步到所有管理节点。

欧洲统一电力市场的日前市场耦合通过7个电力交易机构轮值出清得以实现^[7]，正是采用的这种轮流主管理节点方式。这种共识机制的根本特点在于各管理节点相互独立平等，在没有更高层级强制管理的情况下，能够确保形成无歧义的共识。

3 跨国电力交易实现过程

基于联盟链的典型跨国电力交易过程如图4所示，包括：

1) 构建如图1所示的基于联盟链的分布式能源交易网络。各国相关管理机构作为管理节点，所有要参与跨国电力交易的市场成员申请准入后成为市场主体节点。

2) 选择主管理节点。所有管理节点按照周期（例如月）轮流作为主管理节点，负责出清、记账和发布；若某一个管理节点由于故障不能成为主管理节点，自动由下一个管理节点作为主管理节点。

3) 汇集交易申报信息到主管理节点。

①交易开始后，主体节点根据交易品种确定信息约定格式，并及时向连接的管理节点申报交易信息。利用管理节点公钥将信息加密，使用统一约定的散列函数进行Hash计算形成摘要，打上时间戳，利用自身私钥进行签名发送。

②管理节点收到申报信息后，利用自身私钥解密信息，进行签名验证和篡改验证；然后汇总所有交易申报信息；如果本节点不是主管理节点，就利用主管理节点公钥对汇总的申报信息进行加密，进行Hash计算形成摘要，打上时间戳，利用自身私钥进行签名发送给主管理节点。

③主管理节点收到其他管理节点发来的打包申报信息后，利用自身私钥解密信息，进行签名验证和篡改验证，并汇总所有交易申报信息。

4) 交易出清并分发出清结果。

①主管理节点按照预定规则进行安全校核、阻塞管理、出清计算等市场交易出清过程。

②主管理节点把交易出清结果及相关过程数据，

向其他管理节点分发（发送时进行非对称加密，加盖时间戳，进行摘要计算并签名）。

③所有管理节点，向市场主体提供交易出清结果以及相关过程数据的查询服务。

5) 归集异议并处理。

①主体节点若对市场交易出清结果有异议，则按照2)和3)中的顺序和过程，向所连接的管理节点发送异议信息，并最终汇总到主管理节点。

②主管理节点若收到异议，则对照市场规则对异议进行处理，重新进入4)。

③主管理节点若没有收到异议，则直接进入下一步骤。

6) 形成新的区块，上链并分发。

①主管理节点把本次集中交易所有出清结果，及相关过程数据，形成新的区块，链接到区块链中并发布。

②其他管理节点核查新区块信息，更新本地区块链，同时对与其直接连接的所有主体节点提供区块链同步服务，主体节点可以自己选择本地区块链是否保留所有或部分区块链信息。

以上交易过程基于区块链技术具有的全程不可篡改和可追溯的特点，各管理节点平等协商，能够适应各种不同程度的信息和资源共享环境。

4 关键支撑技术

不同于一般的电力市场集中交易，基于联盟链的跨国电力交易需要特别关注以下关键技术。

1) 区块链基础支撑技术。

区块链技术本身就是非对称加密、Hash摘要等一组ICT技术的组合应用，并且目前还处在迅猛发展阶段。跨国电力交易也需要综合应用以上技术实现交易过程中的加密、签名、数据区块链结构组建和维护、共识等功能。基于已有的开源区块链平台并按需改进，也是可选的技术方案。这些技术的组合应用使所有过程和结果数据无法篡改并且可追溯，在没有具备强制约束力的上级管理机构的情况下，为参与跨国交易的各类市场成员间的可信度提供了技术背书。

智能合约作为以数字化方式自动执行合约的技术，未来在跨国电力交易的实际结算中也有广阔的应用空间。但需要平台支撑、模型和数据共享、数据采集和监控系统、智能电表等应用的支撑和紧密配合。

2) 基于联盟链的统一平台或支撑协议。

正如图1所示的网络拓扑，全连接的管理节点之间必须具有统一的联盟链处理机制，可以安装统一的技术支持平台，核心在于管理节点之间需要遵循统一的区块处理规则和信息交互协议。管理节点和市场主体之间通常采用移动客户端和网站服务的方式，不需要统一的平台。

3) 支撑联盟链运行的模型与数据共享技术。

主管理节点为了充分理解所提交的申报信息并进行出清计算，需要一定程度的模型和数据共享。正如美国独立系统运营商之间、欧洲统一电力市场不同参与国之间的情形，模型和数据的共享程度依赖于参与方的协商情况，也影响到具体的市场规则。

基于IEC 61970、IEC62325、IEC61968的CIM模型是实现电网和电力市场模型共享的重要基础。在具体实现时，CIM/XML、CIM/E、CIM/SVG、CIM/G的功能都是可选的图模共享格式，离线交互是主要的交

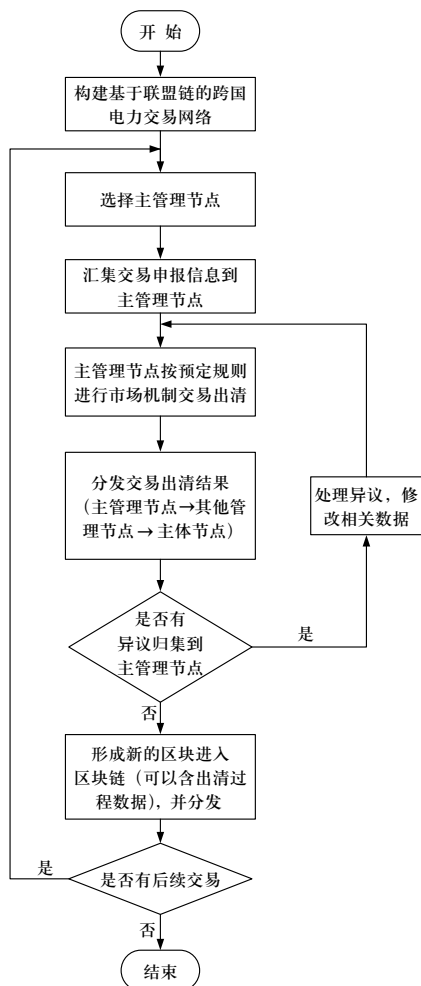


图4 基于联盟链的跨国电力交易典型过程

Fig. 4 Typical process of transnational power trade based on consortium block chain

互方式，在线交互难度较大。可选文件格式包括CIM/E文件、XML文件或约定的其他格式；也可以在管理节点之间建立数据通道进行基于点表的数据传送（例如IEC 60870-5 104规约的情况）或者结合模型的数据传送（例如IEC 61850协议的情况）。

4) 联盟链框架下的安全约束出清技术。

虽然区块链技术具有去中心化的特点，但并不表示“无中心”，联盟链相当于有多个管理节点“中心”。本方案将主管理节点作为记账中心，具有集中出清的管理职能。

集中出清的影响因素包括：①交易品种：例如中长期物理合约、现货或金融性合约；②交易方式：例如可以是双方或多方直接提报协商交易结果，可以采用挂牌交易方式，也可以采用所有市场成员报价报量、集中竞价的方式；③出清规则：例如集中竞价可以按报价高低匹配撮合出清、统一边际电价出清、集中优化后按照节点边际电价出清等；④电网模型和数据共享：出清计算中安全校核、节点电价、阻塞管理等很多内容都依赖于此，但由于安全原因实现难度很大。

图5展示了一种中长期、双边协商、集中出清的规则下，在无法深度共享模型和数据情况下的出清过

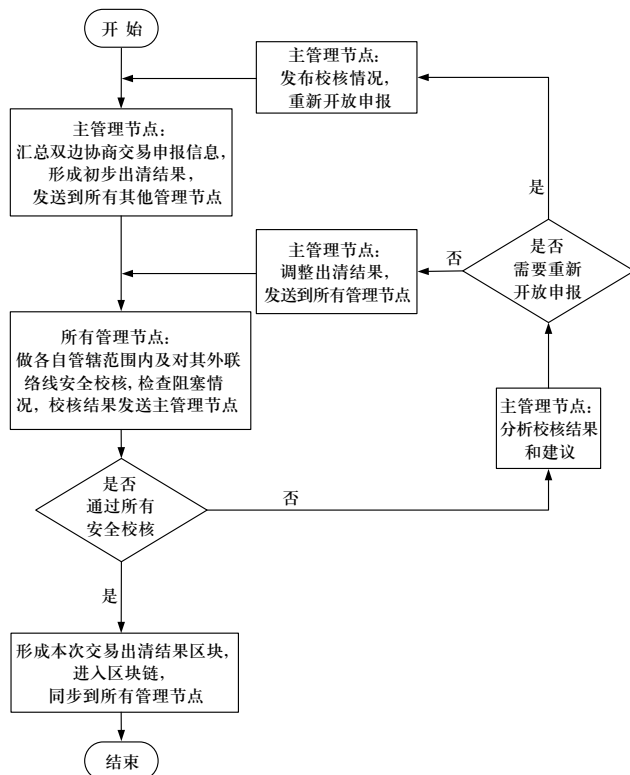


图5 一种中长期协商型集中出清过程

Fig. 5 Medium- to long-term negotiation-type centralized clearing process

程。主管理节点把初步出清结果发给所有管理节点，通过管理节点做各自管辖范围内及其对外联络线的安全校核（包括核查阻塞情况）。如果没有通过校核，则需要根据校核结果，考虑直接调整部分出清结果（例如根据申报先后顺序，取消后申报的部分交易），或者在取消部分出清结果的基础上，根据联络线通道余量重新开放申报，直到出清结果通过所有管理节点的安全校核。

5 技术特点分析

1) 相比于以比特币为代表的区块链应用。

比特币采用的PoW共识算法，具有开创性的启发意义，但是“挖矿”计算消耗了大量资源，并严重制约了效率和应用价值，其可靠性如式（1）所示。

$$p_z = \sum_{k=0}^z \left[\frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \times \left(\frac{q}{p} \right)^{(z-k)} \right] + \sum_{k=z+1}^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (1)$$

式中： q 表示伪造者伪造出下一个节点的概率； p 表示诚实矿工计算出下一个节点的概率； p_z 表示伪造者在落后 z 块区块的情况下最终追上合规区块链的概率； $\lambda = zq/p$ 。最先挖矿成功的节点成为记账节点，同时利用挖矿计算的难度和时间性限制达到防止篡改的目标。

本方案通过事先约定直接确定了每一个时段的主管理节点（记账节点），避免浪费计算资源和效率，同时具有一旦篡改、立即引发异议的特点：①由于不同时段有不同的主管理节点，伪造节点只可能篡改本节点当时的数据；②已发布历史区块一旦篡改，立刻会在相关区块的默克尔树根、摘要、签名及块间链接等处反映出来，并且原有历史区块包含交易结果和过程信息，其他管理节点会立刻发现；③正常出清的结果区块，入链之前都需要经过各管理节点的确认。

2) 相比于当前的各类跨国电力交易方式。

作为一种跨国电力交易系统的技术实现方案具有以下明显特点：①更容易实现潜在市场成员间的互信。作为公共账本的区块链，实际上是在各类已有信用的基础上，通过技术手段提供了一种更长效、更可靠的信用基础。②增强了跨国电力交易的透明度。这是由区块链可追溯、不可篡改、分布式一致的特点决定的。③随着各类区块链技术的迅猛发展，本方案具有潜在的更高自动化水平和开放性。④设计了底层支撑框架，未规定具体的交易周期、交易品种、交易方式和出清规则，具有一定的通用性。

6 结语

基于区块链的跨国电力交易方式,弥补了政府间协商交易方式的不足,相对于区域电力市场更易于促进互信和落地实施,预期在全球能源互联网的建设发展中有一定应用空间。本文分析了区块链技术的适用性,设计了一个基于联盟链的通用型跨国电力集中交易框架,并分析了其关键支撑技术。

作为初探,本文主要是给出了该方案的技术脉络,实际的交易品种、交易周期、出清算法等则依赖于能够实现的模型和数据共享程度,更依赖于参与交易的各国管理机构和市场主体商定的市场准入、申报、出清、结算、监管等协议和规则。管理节点的确定也是一个核心问题,在机构职能之外,未来也可以考虑综合历史信用、保证金等情况来确定。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 王益民. 全球能源互联网理念及前景展望[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 1-5.
WANG Yimin. Concept and prospect of global energy interconnection[J]. Electric Power, 2016, 49(3): 1-5(in Chinese).
- [3] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网发展战略白皮书[R/OL]. (2017-02-22)[2018-06-20]. <https://www.geidco.org/research/strategic/2019/921.shtml>.
- [4] 高志远, 黄海峰, 孙芊, 等. 跨国调度与交易系统互联的信息通信支撑研究[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 40-47.
GAO Zhiyuan, HUANG Haifeng, SUN Qian, et al. Research on information and communication support for transnational interconnection of power dispatching and trading systems[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 40-47(in Chinese).
- [5] 黄琨, 周原冰, 曲昊源, 等. 跨国跨洲电力交易机制研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(增刊1): 234-241.
HUANG Kun, ZHOU Yuanbing, QU Haoyuan, et al. The study on cross-border and cross-continent electricity trading mechanisms[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(Supplement 1): 234-241(in Chinese).
- [6] 曹阳, 丁涛, 侯云婷, 等. 全球能源互联网背景下跨国电力市场长期交易模式的设计与仿真[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(增刊1): 242-248.
CAO Yang, DING Tao, HOU Yunting, et al. Design and simulation for long-term transnational power transaction model in global energy interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(Supplement 1): 242-248(in Chinese).
- [7] 李竹, 庞博, 李国栋, 等. 欧洲统一电力市场建设及对 中国电力市场模式的启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 2-9.
LI Zhu, PANG Bo, LI Guodong, et al. Development of unified European electricity market and its implications for China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 2-9(in Chinese).
- [8] SATOSHI Nakamoto. Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system[R/OL]. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
- [9] SWAN M. Blockchain: blueprint for a new economy[M]. USA: O'Reilly Media Inc., 2015.
- [10] 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).
- [11] 袁勇, 倪晓春, 曾帅, 等. 区块链共识算法的发展现状与展望[J]. 自动化学报, 2018, 44(11): 2011-2022.
YUAN Yong, NI Xiaochun, ZENG Shuai, et al. Blockchain consensus algorithms: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(11): 2011-2022(in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 潘吉飞, 黄德才. 区块链技术对人工智能的影响[J]. 计算机科学, 2018, 45(S2): 53-57.
PAN Jifei, HUANG Decai. Impact of blockchain technology on AI[J]. Computer Science, 2018, 45(S2): 53-57(in Chinese).
- [14] 尚舵. 区块链技术在能源行业的应用前景[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(2): 1-8.
SHANG Duo. Blockchain technology and its application prospect in energy industry[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(2): 1-8(in Chinese).
- [15] 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.
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(in Chinese).
- [16] 李彬, 覃秋悦, 祁兵, 等. 基于区块链的分布式能源交易方案设计综述[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 961-972.
LI Bin, QIN Qiuyue, QI Bing, et al. Design of distributed energy trading scheme based on blockchain[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 961-972(in Chinese).
- [17] 朱文广, 熊宁, 钟士元, 等. 基于区块链的配电网电力交易方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 165-172.
ZHU Wenguang, XIONG Ning, ZHONG Shiyuan, et al. Power trading method for distribution network based on blockchain[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 165-172(in Chinese).

- [18] 王健, 周念成, 王强钢, 等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5072-5084.
WANG Jian, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Electricity direct transaction mode and strategy in microgrid based on blockchain and continuous double auction mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5072-5084(in Chinese).
- [19] 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).
- [20] 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. Preliminary applications of blockchain technique in large consumers direct power trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3737-3745(in Chinese).
- [21] 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方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3630-3638.
TAI Xue, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Electricity transactions and congestion management based on blockchain in energy Internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3630-3638(in Chinese).
- [22] 周鑫, 邓莉荣, 王彬, 等. 基于联盟链的去中心化能源交易系统[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6): 556-565.
ZHOU Xin, DENG Lirong, WANG Bin, et al. Decentralized energy trading system based on consortium blockchain[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 556-565(in Chinese).

收稿日期: 2019-12-05; 修回日期: 2020-02-04。



高志远

作者简介:

高志远 (1972), 男, 教授级高工, 研究方向为智能电网、厂站自动化系统。通信作者, E-mail: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn

高艺 (1973), 女, 教授级高工, 研究方向为电网规划和电力系统可靠性分析, E-mail: gao-yi@geidco.org。

卢文冰 (1969), 男, 副教授, 研究方向为电力系统通信与电机运行控制。

王璐 (1991), 女, 工程师, 研究方向为智能电网、电力系统规划, E-mail: lu-wang@geidco.org。

(责任编辑 张宇)

“能源战略与能源互联网”专题征稿启事

能源互联网是以电为核心, 利用可再生能源发电技术、信息技术, 融合电力网络、天然气网络、供热/冷网络等多能源网以及电气交通网形成的能源互联共享网络。能源互联网是互联网思维及技术与智慧能源系统的有机交融, 是促进可再生能源消纳, 提高能源使用效率的重要途径。为促进能源互联网优秀成果广泛传播, 本刊特邀清华大学孙宏斌教授、河海大学卫志农教授和清华大学郭庆来副教授共同担任特约主编, 组织《全球能源互联网》“能源战略与能源互联网”专题。

专题征稿范围 (包括但不限于)

- 1) 能源互联网的商业模式及市场;
- 2) 能源互联网规划与建模仿真;
- 3) 能源互联网核心设备研发及应用;
- 4) 能源互联网优化运行与评价;
- 5) 信息物理系统及其在能源互联网中的应用;
- 6) 能源互联网与其他行业融合技术及应用;
- 7) 能源互联网其他相关技术。

投稿截止日期: 2020年7月10日

专题出版日期: 2020年11月25日

详细征稿信息及投稿方式请前往期刊官网 www.gei-journal.com/cn 查看, 真诚欢迎国内外专家学者和科研人员积极投稿。