

基于区块链和通证经济的跨国跨洲电力市场机制设计

陈思远¹, 白昱阳¹, 张俊^{1,3}, 王飞跃^{2,3}

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072 ;

2. 中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190 ;

3. 青岛智能产业技术研究院, 山东 青岛 266071)

摘要: 全球能源互联网旨在构建以电力消费为核心的能源模式, 跨国跨洲电力交易是推动其发展的必要条件和有效途径。首先分析跨国跨洲电力交易面临的问题, 提出了基于区块链和通证经济的跨国跨洲电力市场设计思路。然后, 将跨国跨洲电力市场的组成分为5个部分, 并分别对这5个部分进行了描述与建模。最后, 利用等比例放大的IEEE 39节点系统, 对本文所提市场进行了仿真与分析。仿真结果表明, 基于区块链和通证经济的跨国跨洲电力市场可以保证跨区域、多主体电力交易的有效实施, 同时有利于激励发电商使用清洁能源参与电力市场。

关键词: 区块链; 通证经济; 低碳发展; 市场权益; 日内电力市场设计

中图分类号: TM711

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201910

Design of transnational and intercontinental electricity market with blockchain and token economics

CHEN Siyuan, BAI Yuyang, ZHANG Jun, WANG Fei-yue

1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

3. Qingdao Academy of Intelligent Industries, Qingdao 266071, China

Abstract: Transnational and intercontinental electricity trading (TIET) is a fundamental enabling component and efficient method to the development of Global Energy Internet (GEI), which aims to build an energy model centered on electricity consumption. The problems faced by TIET was analyzed, and a transnational and intercontinental electricity market (TIEM) based on blockchain and token economics was proposed. The TIEM was divided into five components, and each component was described and modeled respectively. A scale-up power grid based IEEE 39-nodes system was used to analyze the proposed market. The simulation results show that TIEM based on blockchain and token economy can ensure the effective implementation of cross-regional and multi-agent electricity transactions, and also encourage the generation companies (GENCOs) to participate in electricity market with clean energy.

Key words: blockchain, token economy, low-carbon development, market interests, intraday electricity market design

1 引言

随着社会用能需求的不断增大, 世界气候变化压力日益严峻, 近年来推动能源互补、优化资源配置、加大清洁能源使用比例已受到各国的广泛重视。全球电力市场的发展历程主要分为3个阶段: 第一阶段, 打破垂直一体化垄断模式, 引入竞争机制,

提高资源的优化配置; 第二阶段, 市场机制建设和完善, 使市场交易过程更加透明, 遏制市场力, 激励更多利益主体参与到市场中; 第三阶段, 促进清洁能源的消纳, 提升需求侧响应程度, 引导电力工业走向低碳发展。中国能源局在《关于印发配电网建设改造行动计划》中指出: “探索能源互联网平台建设, 满足新能源和分布式能源并网, 提高分布式

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-03-25

通信作者: 张俊, jun.zhang@qaii.ac.cn

发电商与配电网的协调能力，是当前电力市场发展的关键任务。”因此，在全球能源互联网的背景下，建立推送绿色用能的跨国跨洲电力市场（transnational and intercontinental electricity trading, TIEM）是加快能源转型的必要条件和有效途径。

目前的电力交易大多仅限于区域之间，欧洲部分国家开展跨国电力交易，也只是相邻国家间进行的小规模交易，若能消除参与电力交易的国家间的市场壁垒，则可实现各国电力资源互补，推动清洁能源的发展，减少化石燃料的消耗。目前，电力市场的主要结构是中心式电力市场，通过统一的交易中心进行集中交易，再由统一的调度中心进行电力的调配。中心式的电力市场能在一定程度上优化资源配置，同时也主要存在几点问题。1) 市场力监管：大型发电公司的市场力不利于电力市场的发展，美国联邦能源管理委员会（federal energy regulatory commission, FERC）在电力市场建立之初就开始研究监管市场力的有效办法。2) 交易透明与信息披露：为了构建公平公正的电力市场，交易监管和信息披露是一种有效手段。3) 市场运行效率：在大区域大规模的电力市场中，交易主体的合约、结算、偏差考核等将会给交易中心带来繁重的工作量，从而使交易效率大幅下降。电力市场机制一般根据激励相容、深度博弈、迭代优化等理论，实现高效公平的市场运行，充分调动供给侧和需求侧的积极性，减少电网购电成本，实现节能减排和削峰填谷。文献[1]结合全球能源互联网背景下电力交易的发展趋势，提出了几种不同交易场景下的跨国跨洲电力交易机制，论证了 TIEM 的可行性；文献[2]提出了一种利用激励相容理论最大化市场调节能力的日前电力市场机制，表明了拉格朗日松弛法对增加市场效益的理论作用；文献[3]基于博弈论设计了一种分布式实时电价机制，可有效激励供应商和消费者参与实时电价市场，反映了电价信号对市场成员的有效引导；文献[4]提出了一种基于电力池的电力市场机制，该机制同时满足激励相容、博弈论和优化理论的主要特性，仿真结果表明市场运行具有高效性。

跨国跨洲电力市场是一个复杂的电力市场，具有跨区域运行、交易量大、交易主体多的特点，其运行目标是在参与国家间实现能源互补和电力工业低碳化。通过大量的文献分析，本文认为 TIEM 的有效运行至少需要解决以下问题。1) 不同市场和政治实体的信任问题：不同国家的市场实体即使

有统一的市场准入机制，也仍然存在一定程度的信任问题。2) 清洁能源激励问题：若不能设置合理的激励措施，清洁能源将很难与传统火电在电力市场中竞争。目前，对清洁能源主要采取费用补贴的形式进行激励，但这并不是一种长远的解决方案。

区块链是随着“数字加密货币”的日益普及而逐渐兴起的一种去中心化基础架构与分布式计算范式，目前已经受到政府部门、金融机构、科技企业的高度重视与广泛关注。区块链是一种可行的去中心化电力市场设计方案，通过为市场成员提供信息对等和进行金融结算，可以为市场参与者提供一个社会信任、高效的交易平台^[5]。文献[6]分析了区块链在电网数字资产管理中的发展，总结了区块链在电网中应用的适用性；文献[7]讨论了基于区块链的智能分布式能源系统，指出了区块链技术在分布式能源中的应用潜力；文献[8]分析了区块链技术在未来能源互联网运营中的应用，提出了区块链技术的去中心化与自执行性对能源互联网自治性的作用；文献[9]提出了一种本地化的点对点电力交易模型，该模型可在智能电网中对插电式混合动力汽车进行本地电力买卖，利用区块链技术极大地节省了成本且提高了效率；文献[10]针对社区内光伏发电的传统供电模式，利用区块链技术使光伏出力可以上链交易，提升了社区用户的福利。

然而，区块链只是一种底层技术，结合通证的区块链交易系统可以更有效地实施激励措施来塑造参与者的行为，例如促进清洁能源的生产。通证经济是行为管理和激励工具的系统方法，区块链与通证的结合可以实现不同价值系统间的“价值转换”与“价值转移”。本文讨论了如何将通证经济嵌入 TIEM 中，以实现一定的系统目标，例如鼓励市场参与者生产和消费清洁能源。文献[11]分析了通证经济在能源系统的激励、管理和价值导向 3 个方面的适用性，提出了通证经济可以极大地促进市场成员的良好行为，加快达到市场调节目的。

利用区块链技术构建跨国跨洲电力交易并解决所面临的问题是一种实用的思路，因此，国内外学者对基于区块链的电力交易的概念和实践进行了诸多研究。文献[12]分析了分布式电力市场中的区块链技术，提出了一种新的电力交易模式；文献[13]在一种基于物理—信息—价值三维属性的研究视角下，提出了一种能源区块链的基本框架，并分析了区块链对分布式能源市场的适用性；文献[14]提出了一种基于区块链的区域能源市场的构建思路，

实现了发电商、用户和产消者之间的直接交易；文献[15]提出了一种基于以太坊区块链技术的配网运行方法，以确保去中心化交易透明开放、信息对称，并设计了电能多边交易的智能合约来确保交易系统的自治性。文献[16]提出了一个基于多代理和区块链的分布式电力交易系统，实现产消者之间的点对点直接交易，减少各主体购电成本，促进区域供需平衡。尽管国内外学者对区块链在电力交易中的应用已经做过不少尝试，但对于市场架构和机制的设计还需要进行更详细的研究。

本文主要研究基于区块链技术和通证经济学的 TIEM 设计，主要贡献如下：

- 将区块链技术应用在跨国跨洲电力交易中，建立了一个去中心化、可信任、完全自治的电力市场；
- 将通证经济系统应用在电力交易区块链中，通过经济手段对市场供能模式进行调节，促进电力工业低碳化；
- 通过仿真分析验证了基于区块链和通证经济的跨国跨洲电力市场运行的可行性和有效性。

2 TIEM 设计

本文旨在利用区块链和通证经济为 TIEM 提供一个可行的解决方案，如图 1 所示，TIEM 可分为 5 个组成部分。第 1 个部分（C1）为市场架构，即 TIEM 的基础设施；第 2 个部分（C2）为电力交易信息系统，即电力交易的信息采集和通信工具；第 3 个部分（C3）是市场机制，即市场运行的规则；第 4 个部分（C4）是价格机制，即形成市场价格的出清理论；第 5 个部分（C5）是激励与考核机制，即奖惩与结算的规则。本文仅对 TIEM 机制进行研究，不考虑市场政策法规相关的问题^[17]。TIEM 的 5 个组成部分将在下文中进行详细描述。

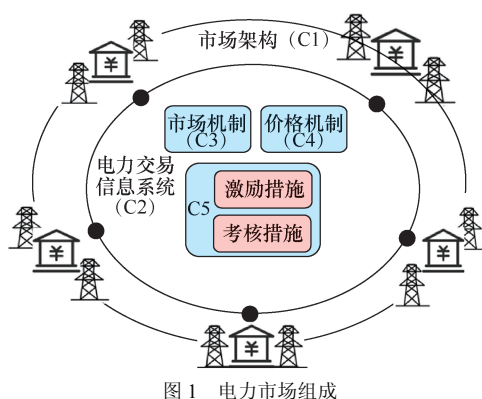


图 1 电力市场组成

2.1 市场架构 (C1)

从严格意义上来说，跨国跨洲电力市场是由多个国家或区域组成的一个区域联合电力市场。市场的主体是各国区域电网中的发电商和大用户，在电力交易信息系统（power trading information system, PTIS）中分别有对应的节点，市场架构如图 2 所示。

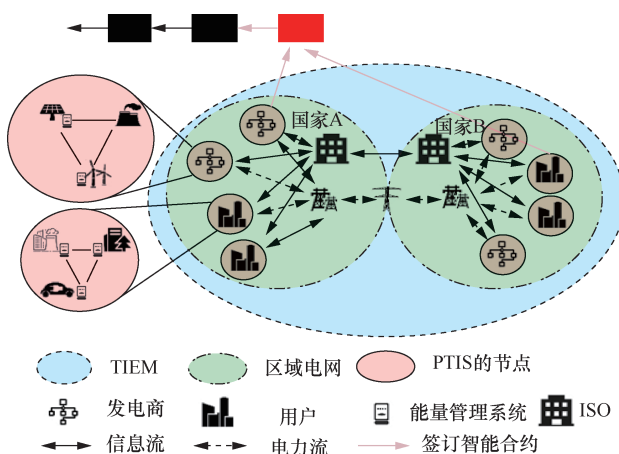


图 2 跨国跨洲电力市场架构

在本文所提出的市场构架中，市场内各主体通过过去中心化的分散决策来制订自身报价策略^[18]。在 TIEM 中，不同的国家将会有自己的独立系统运营商（ISO），本国或地区市场主体信任自己的 ISO 并向其上传申报数据，市场主体与 ISO 间的信息流动是双向的。另外，发电商和消费者可从附近的 ISO 获取市场信息，而 ISO 将帮助发电商和消费者在市场中竞价，匹配他们的交易目标。市场的出清结果由所有国家的 ISO 进行联合优化而得到，所有的 ISO 都会连入区块链网络中。

在完成交易目标匹配之后，每个市场成员都会生成并签署相应的智能合约，签订的智能合约将被写入区块链中，并在满足某些条件时执行。智能合约将在执行时通过其写入的结算方式实现发电商和消费者之间的金融交付，结算过程如图 3 所示。

2.2 电力交易信息系统 (C2)

在 TIEM 中，电力交易信息系统提供交易平台、合约、金融交付、市场准入和市场运行监管等功能。该系统可采集发电和用电数据，上传至区块链，最终根据采集的数据在区块链中判断智能合约是否触发。

基于智能合约的区块链系统作为去中心化的交易平台，不需要中心权限就可满足安全性、可

信性和公平性的要求^[19]，且可让各节点进行可信的信息交换和财务交付。如 2.1 节中所述，各国市场 ISO 都会作为节点连入区块链网络，各国的市场成员也会成为区块链网络中的节点，信息系统中区块链网络的每个节点对应着市场成员和 ISO。当市场参与者进行智能合约结算时，区块链网络中的所有节点都将使用预设的共识机制对交易进行验证。

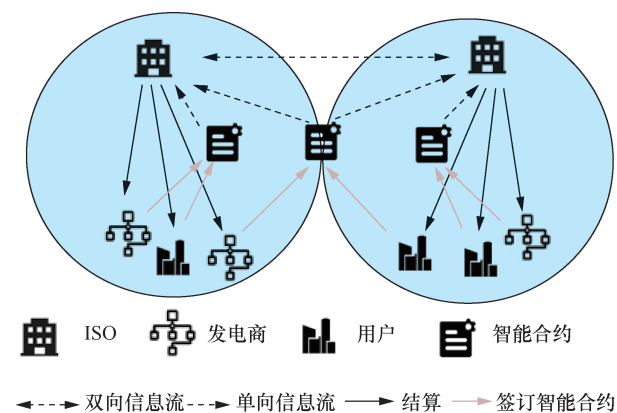


图3 TIEM的结算过程

2.3 市场机制（C3）

跨国跨洲电力市场是一个包含多主体和多品类电力交易的市场，市场机制建立在信息系统之上，市场出清目标是减少市场购电成本和促进清洁能源消纳的联合优化结果^[20-22]。市场交易周期为15min，每个时段对下一个周期的电力交易进行出清，市场机制如图4所示。具体流程如下。

- 双向申报环节：发电商上传这一交易时段

的“需求—价格”曲线至信息系统中，用户上传这一交易时段的需求量至信息系统中，利用市场中各成员需求与运行约束进行市场出清。

- 交易匹配环节^[23]：中标的发电商按照价格从低到高排列，用户按照需求量从高到低排列，价格低的发电商优先与需求量高的用户匹配，匹配成功的供需双方依次出清。

- 签订智能合约：匹配的交易双方签订“点对点”的智能合约，并上传至信息系统中进行全网共识。值得注意的是，同一发电商可能与多个用户签订合约。

- 市场结算：智能合约的执行条件会根据信息系统中上传的量测数据来判断。当满足智能合约的触发条件时，该智能合约将被触发并自动执行以解决相应的事务。例如，若发电商的发电偏差不超过其设定的阈值，则在结算时将自动执行相关的智能合约，发电商将收到预期的收益。

2.4 价格机制（C4）

TIEM 的定价机制是根据市场边际出清得出的最优结果，以反映真实的电量价格和阻塞价格^[18]。市场根据发电商和消费者的申报情况进行有约束的出清，并得出区域边际电价（DLMP）。不失一般性，本文假设市场成员的报价函数均为有功出力的二次凸函数，可以表示为

$$F(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (1)$$

其中， $P_{i,t}$ 为发电商 i 在时段 t 的有功出力， $a_i (> 0)$ 、 b_i 和 c_i 分别为发电商 i 的报价函数系数。任一时段 t

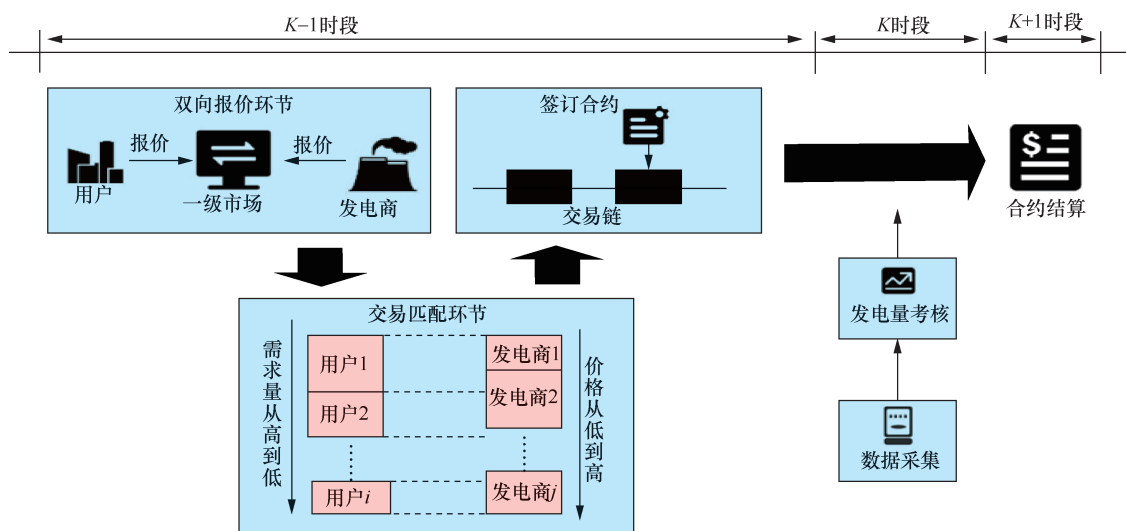


图4 一个交易周期内市场出清示意

内电力市场出清目标函数的简化数学描述为^[24]

$$\min \sum_i^N (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } (\lambda), \sum_i^N P_{i,t} - \sum_j^M D_{j,t} = 0 \quad (3)$$

$$(\mu_l), \sum_i^N \alpha_{i,l} P_{i,t} - \sum_j^M \alpha_{j,l} D_{j,t} \leq P_l^{\max} \quad (4)$$

$$(\mu_L), \sum_{l \in L} (\sum_i^N \alpha_{i,l} P_{i,t} - \sum_j^M \alpha_{j,l} D_{j,t}) \leq P_L^{\max} \quad (5)$$

$$(\tau_i^{\max}, \tau_i^{\min}), P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (6)$$

其中, $D_{j,t}$ 表示用户 j 的需求量; $P_l^{\max}$ 为线路 l 的有功传输容量上限; $P_L^{\max}$ 为跨国断面 L 的有功传输容量上限; $\alpha_{i,l}$ 为发电商 i 对线路 l 的转移分布因子; $\alpha_{j,l}$ 为发电商 j 对线路 l 的转移分布因子; $P_i^{\max}$ 和 $P_i^{\min}$ 分别是发电商 i 出力的上、下限; λ 、 μ 、 $\tau_i^{\max}$ 和 $\tau_i^{\min}$ 分别为相应约束对应的拉格朗日算子, 即为约束的影子价格。式 (2) 是目标函数, 式 (3) 是功率平衡约束, 式 (4) 和式 (5) 分别为线路潮流约束和跨国断面潮流约束, 式 (6) 是发电商出力约束。

考虑用户侧为刚性需求时, 用户需求量将不再作为变量考虑。构造市场出清优化问题的拉格朗日函数, 可表示为

$$\begin{aligned} L(P_{i,t}, \lambda_t, \mu_t, \tau_{i,t}^{\max}, \tau_{i,t}^{\min}) = & \sum_{i=1}^N (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + \\ & \lambda_{i,t} (\sum_{j=1}^M D_{j,t} - \sum_{i=1}^N P_{i,t}) + \\ & \mu_{l,t} [(\sum_{i=1}^N \alpha_{i,l} P_{i,t} - \sum_{j=1}^M \alpha_{j,l} D_{j,t}) - P_l^{\max}] + \\ & \mu_{L,t} [\sum_{l \in L} (\sum_{i=1}^N \alpha_{i,l} P_{i,t} - \sum_{j=1}^M \alpha_{j,l} D_{j,t}) - P_L^{\max}] + \\ & \sum_{i=1}^N [\tau_i^{\max} (P_{i,t} - P_i^{\max}) + \tau_i^{\min} (P_i^{\min} - P_{i,t})] \end{aligned} \quad (7)$$

将式 (7) 对 $P_{i,t}$ 求偏导有

$$\begin{aligned} \frac{\partial L(P_{i,t}, \lambda_t, \mu_t)}{\partial P_{i,t}} = & 2a_i P_{i,t} + b_i - \lambda + \mu_{l,t} \alpha_{i,l} + \mu_{L,t} \sum_{l \in L} \alpha_{i,l} + \tau_i^{\max} - \tau_i^{\min} \end{aligned} \quad (8)$$

考虑到运行的机组一般不会处于极限出力状态, 令互补松弛因子 $\tau_{i,t}^{\max}$ 和 $\tau_{i,t}^{\min}$ 为 0。根据拉格朗日优化理论, 由式 (8) 可以得出

$$2a_i P_{i,t} + b_i = \lambda - \mu_{l,t} \alpha_{i,l} - \mu_{L,t} \sum_{l \in L} \alpha_{i,l} \quad (9)$$

式 (9) 的左边部分为发电商的边际成本, 右边部分为 DLMP, 其中 λ 为功率平衡约束的影子价格, 即为能量价格, $-\mu_{l,t} \alpha_{i,l} - \mu_{L,t} \sum_{l \in L} \alpha_{i,l}$ 为潮流约束的影子价格, 即为阻塞价格。

2.5 激励和考核机制 (C5)

2.5.1 激励机制

传统的电力市场机制以发电量和可靠性为结算依据, 出力稳定且装机容量大的火电机组有着天然的优势, 清洁能源由于其出力不确定性, 一般只用于实时平衡市场和辅助服务市场。在本文所建议的跨国跨洲电力市场中, 发电商作为一个电源聚合商, 可以自行决定有功出力的组成, 通过超短期的清洁能源出力精准预测, 使用火电与清洁能源配合的方式执行所签订的智能合约。考虑到清洁能源相比于火电的经济劣势, 本文提出了一种基于通证经济的激励机制以鼓励发电商使用清洁能源进行上网供电。

国内外对清洁能源的市场激励手段进行了不少研究, 欧、美有国家采用了基于碳价的碳市场机制^[25]来进行激励, 我国也采用绿证、碳价等方式来进行激励, 但效果均不够显著。除了清洁能源供能占比低以外, 碳价信号相比于电价信号影响过小是主要原因。为真正促进清洁能源机组的使用, 应给予清洁能源商更多权益, 本文利用建立在区块链上的通证经济来达到目标。

本文设计了一种通过奖励通证化利益来激励清洁能源生产和消费行为的系统强化机制, 通过建立“良好行为—增强物—后援增强物”的兑换关系来激励发电商的市场期望行为。市场的激励力度根据发电商的清洁能源出力值不同而不同, 发电商碳清洁能源发电量与可获取通证数量的关系式为

$$T_i = \begin{cases} m_1 P_{c,i} + \max\{0, m_2 (\xi P_{c,i} - P_0)\}, & P_{c,i} \geq 0 \\ 0, & P_{c,i} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, T_i 为发电商 i 可获得的通证数量, $P_{c,i}$ 为发电

商 i 的清洁能源出力, P_0 为碳排放量配额; m_1 和 m_2 为通证奖励系数, 且 $m_2\xi > m_1$; ξ 为单位火电出力的碳排放量系数。

在电力市场中, 发电商最为关心的是市场出清与输电权的问题, 若是能在市场中优先出清, 或者拥有输电权, 发电商将会获得更多的利润。本文暂时仅考虑将优先出清与输电权作为后援增强物。

(1) 与市场优先出清相关的权益兑换设计

市场在进行出清准备时, 会将一部分电量视作优先出清电量, 发电商可使用通证来交换一定的优先出清电量, 从而在 TIEM 中获得更多收益。在市场出清前, 兑换机制可表示为

$$P_{pr} = \vartheta T \quad (11)$$

其中, P_{pr} 为优先出清电量, ϑ 为优先出清电量兑换率, T 表示发电商支付的通证数量。

(2) 与输电权相关的权益兑换设计

发电商在市场出清前利用通证购买输电权, 再将输电权卖回市场以获取更多收益, 可表示为

$$P_{con} = \varsigma T \quad (12)$$

其中, P_{con} 表示购买的输电权容量, ς 为输电权容量兑换率。

2.5.2 考核机制

电力市场是一个预出清的市场, 即在实际发电与消费前就进行市场出清, 故需要采取必要的考核机制, 确保发电商能如约履行自己的发电计划。在广东省电力市场中^[26], 发电缺额的惩罚价格为该结算区间电价的 3 倍, 可表示为

$$S_{pun} = 3\lambda \cdot \Delta P \quad (13)$$

其中, S_{pun} 为缺额电量考核费用, ΔP 为缺额功率。

3 仿真结果

3.1 发电商决策分析

发电商通过清洁能源出力获取通证, 并可采用两种策略来提高其收益: 用通证换取优先出清电量, 增加自身的中标电量, 同时也会改变市场的边际出清价格; 用通证换取输电权, 可以进行输电权出售从而获得高额的输电费用。因此, 在跨国跨洲电力市场中, 采用清洁能源发电可提升发电商的收益, 但在实际发电过程中, 出力不确定性也可能给

发电商带来潜在的风险。发电商在进行出力决策时应确定清洁能源在其总能源生产中所占的比例, 通证经济在新一维度扩充了该决策空间, 将在下文中讨论。

3.2 算例分析

本文假设 IEEE 39 节点系统中的 3 个潮流断面包含的区域分别为 A、B、C 3 个国家, 如图 5 所示。将系统中的 10 台发电机视作 10 个发电商, 利用 MATPOWER 软件对系统进行仿真^[27]。发电商参数见表 1, 消费者需求情况见表 2, 假设断面 1 和断面 2 的有功传输容量限制分别为 1500 MW 和 1000 MW。

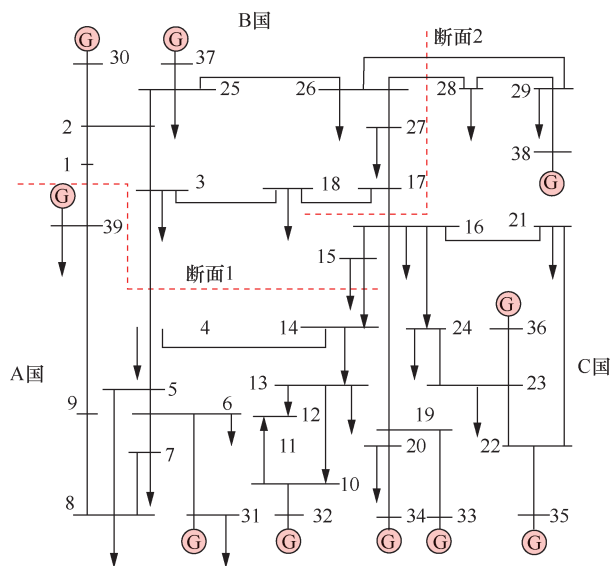


图 5 系统接线

表 1 发电商竞价参数

机组节点编号	$a \times 10^{-3}$ (元/MW)	$b \times 10^{-3}$ (元/MW)	c (元)	出力上限 (MW)	出力下限 (MW)
30	0.2	2	50	1040	0
31	0.175	1.75	30	646	0
32	0.625	1	10	725	0
33	0.834	3.25	10	652	0
34	0.25	3	20	508	0
35	0.25	3	20	687	0
36	0.46	2.5	30	580	0
37	0.53	2.76	30	564	0
38	0.63	1.57	40	865	0
39	0.45	2.15	40	1100	0

表2 系统节点负荷需求情况

区域	用户编号	负荷节点编号	需求量 (MW)
A 国	A1	4	500
	A2	7	234
	A3	8	522
B 国	B1	1	98
	B2	3	322
	B3	18	158
	B4	25	224
	B5	26	139
	B6	27	281
C 国	C1	15	320
	C2	16	329
	C3	20	680
	C4	21	274
	C5	23	247
	C6	24	309
	C7	28	206
	C8	29	283

3.3 市场出清结果

在本文 2.4 节提出的价格机制下, 对应的市场出清结果见表 3。能量价格为 $\lambda=64.36$ MW/元 (即容量电价), 输电阻塞发生在节点 2 与节点 25 之间的线路和节点 14 与节点 15 之间的线路, 阻塞价格分别为 14.78 元/MW 和 71.04 元/MW。根据上述的系统参数, 则 A 国的 DLMP 为 64.36 元/MW, B 国的 DLMP 为 79.14 元/MW, C 国的 DLMP 为 135.40 元/MW。

表3 市场出清结果

区域	发电商	所在节点	报价 (元/MW)	中标出力 (MW)
B 国	A	30	228.92	941
A 国	B	31	104.16	646
A 国	C	32	163.79	500
C 国	D	33	25.23	131
C 国	E	34	50.49	345
C 国	F	35	140.05	687
C 国	G	36	119.79	438
B 国	H	37	118.89	403
C 国	I	38	111.89	342
A 国	J	39	260.61	693

按照本文 2.3 节所建议的市场机制进行撮合成交, 将发电商按照价格从低到高进行排序, 消费者按照需求从高到低进行排序, 依次匹配用户。匹配成功的交易双方在区块链中签订智能合约并进行记录, 智能合约将在满足触发条件时自动执行。

3.4 发电商决策

若发电商在时段 k 使用清洁能源, 将在时段 $k+1$ 获得通证奖励, 即使用清洁能源带来的收益是远期的。发电商可以根据自身和电网情况采用各种通证策略, 比如考虑自己和其他发电商长期的清洁能源产出和网络阻塞情况等, 由此甚至导致通证博弈和通证市场的产生, 在后续研究中会做专门的研究。本文假设每个发电商都会使用以下简单通证策略: 每个发电商预测并提前使用 $k+1$ 时段将要获得的通证, 并在 k 时段用这些通证换取优先出清电量和输电权, 由式 (14) 描述。

$$T_{i,k} = \begin{cases} m_1 \alpha_i P_{i,k} + \max \{0, m_2 (\xi \alpha_i P_{i,k} - P_{i,k}^0)\}, & P_{i,k} \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中, α_i 为发电商 i 出力的清洁能源占比, $P_{i,k}$ 为发电商 i 在时段 k 的发电量, $P_{i,k}^0$ 为发电商 i 在时段 k 的碳排放额, $T_{i,k}$ 为发电商 i 在时段 k 所使用的通证数。一般情况下, 单位电量的 CO_2 排放量为 0.88~1.21 t/MW·h, 单位电量的碳排放配额为 0.80 t/MW·h, 在本文所取交易周期为 15 min 的情况下, ξ 取 4.8 t/MW, $P_{i,k}^0=3.2P_{i,k}$ 。因此, 可以发现, 在发电商清洁能源出力比例不大时, 通证的奖励系数比清洁能源出力较大时的奖励系数小。

为比较不同决策下的收益, 将优先出清电量的兑换率与输电权兑换率设置相同数值, 市场激励与考核机制的相关参数见表 4。

表4 市场激励和考核机制参数

参数	取值
m_1	2
m_2	0.8
ξ	4.8
ρ	2
ς	2

为了对比分析本文所提机制对使用清洁能源的发电商带来的收益, 本节算例假设市场中每次只

有一个发电商进行清洁能源出力，清洁能源的波动范围为 $\pm 10\%$ ，并设置3种场景对发电商的策略进行分析：场景1，发电商不使用清洁能源；场景2，发电商使用清洁能源，通证用于兑换优先出清电量；场景3，发电商使用清洁能源，通证用于兑换输电权。

(1) 场景1

在不使用清洁能源时，发电商不能获得通证，其收益仅为电力市场中的售电收益，机组的收益见表5。场景1作为传统电力市场出清场景，作为基准情况与场景2和场景3进行对比。

表5 场景1下发电商收益情况

发电商	收益(万元)
A	6.056
B	4.157
C	3.218
D	0.843
E	2.220
F	4.422
G	2.819
H	2.594
I	2.201
J	4.460

(2) 场景2

由于优先出清电量不参与市场竞价，发电商用通证换取优先出清电量后会改变自身在市场中的出力约束条件，从而改变中标电量和出清电价。考虑到清洁能源出力的不确定性，如果出现发电缺口，发电商将需要支付罚款。本节中取清洁能源出力最差的情况（即清洁能源实际出力为预测值的90%）来对比发电商获利情况。发电商的收益随 α_i 变化的曲线如图6和图7所示。

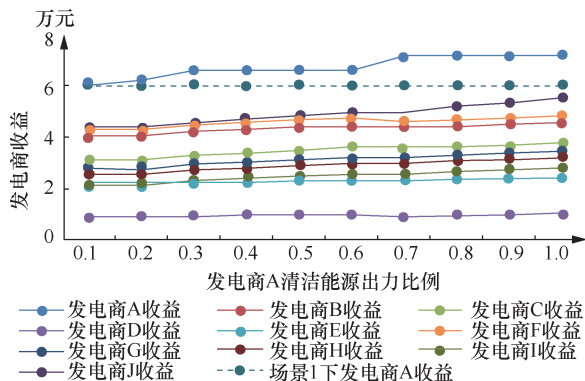


图6 场景2下发电商A单独使用清洁能源时各发电商收益

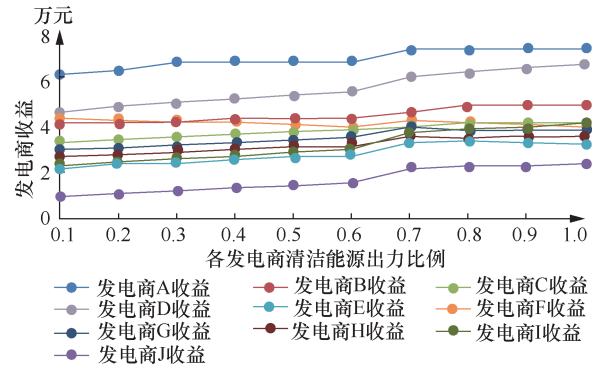


图7 场景2下不同发电商单独使用清洁能源时自身收益趋势

从图6中可以看出，随着发电商A清洁能源出力的提高，所有发电商的收益都在增加，这是因为发电商A减少了市场竞争电量空间，市场出清价格随之增加。当清洁能源出力比例足够大时，通证的奖励系数也会增大，从图中可以看出，当出力比例为0.7时，各发电商的收益会有一个小幅激增，这样的奖励函数会鼓励发电商进行更大比例的清洁能源出力。然而，从图7中可以看出，发电商F与其他发电商存在较大差异，其利润随 α_i 的增加而减少。这是因为本文所设置的新能源出力仅为计划值的90%，发电商F支付了较大的考核费用。考虑到发电商F在市场竞争中具有较大优势，使用通证兑换优先出清电量的策略并不是最优策略。因此，发电商需要根据自身的运行特性来决定是否使用通证。

(3) 场景3

在本场景下，发电商选择兑换输电权前将预测自身所在国家或者区域的输电阻塞情况，阻塞严重时通过转售输电权可获得较大的利益。与兑换优先出清电量不同的是，发电商兑换输电权不会影响自身的出力约束和市场报价，本节仍然考虑清洁能源出力最差的情况，发电商收益随 α_i 变化的曲线如图8所示。

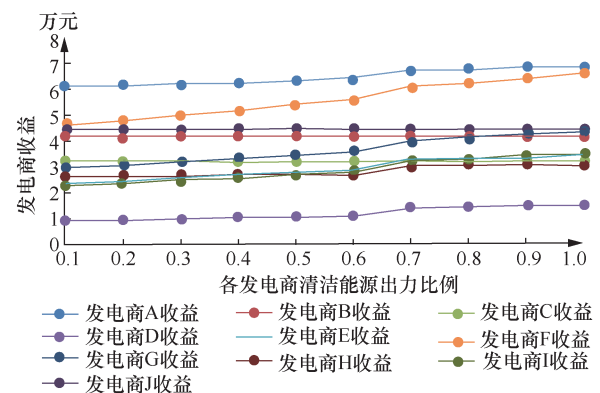


图8 场景3下各发电商单独使用清洁能源收益

从图8可以看出，A国在该出清时段不存在输

电阻塞,因此 A 国的发电商无法通过输电权获得额外的收益,而 B 国和 C 国发电商可以利用输电权以较高的输电阻塞价格获得较大收益。与场景 1 相比,发电商 F 的收益变为原来的 1.5 倍,发电商 G 的收益增长为原来的近 2 倍。同样地,从图中可以看出,当出力比例为 0.7 时,各发电商的收益会有一个小幅激增,这是由于清洁能源出力比例增大使通证奖励系数增大了。对比图 7 和图 8 可以发现,发电商 J 利用通证兑换优先出清电量获利较多,而发电商 F 则利用通证兑换输电权获利较多。由此可见,不同的发电商会根据自身的运行环境做出不同的决策,也说明了对应多种权益的通证在促进发电商使用清洁能源发电方面的稳定激励作用。

3.5 跨国跨洲电力区块链的应用实例

电力交易匹配结果如图 9 所示,以发电商 A 的交易为例,发电商 A 向用户 C3 出售 680 MW 电量,向用户 A3 出售 261 MW 电量,因此发电商 A 需分别单独与用户 C3 和用户 A3 签订智能合约。假设某天 12:00 发电商 A 的新能源出力比例为 0.1(即 94.1 MW),在 30 min 之后,通过考核的发电商所签订的智能合约将会自动执行,它将获得用户 C3 支付的 43 764.8 元和用户 A3 支付的 16 797.96 元,同时还会获得电力区块链奖励的 3.764 个通证。发电商 A 的交易信息见表 6。

4 结束语

当前,全球能源互联网的建设需要创新性的市场

基础设施和新的商业模式来保障多个国家之间的可信任交易。本文设计了一种基于区块链和通证经济的跨国跨洲电力市场,使各国发电商能自由地进行交易与决策,并保证了交易的安全可靠与自动执行。利用通证经济,激励发电商实施“期望行为”来获得和使用通证化收益,以期在电网运行中换取更多的权益和收益。本文在全球能源互联网背景下提出了一种具有创新性的激励机制,也为发电商和消费者在能源生产和消费策略方面提供了更为丰富的选择。

参考文献:

- [1] 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(S1): 234-241.
HUANG K, ZHOU Y B, QU H Y, et al. Research on cross-continental power trading mechanism[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(S1): 234-241.
- [2] 舒畅,钟海旺,夏清. 基于优化理论市场化的日前电力市场机制设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 55-62.
SHU C, ZHONG H W, XIA Q. Design of day-to-day power market mechanism based on marketization of optimization theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 55-62.
- [3] NAMERIKAWA T, OKUBO N, SATO R, et al. Real-time pricing mechanism for electricity market with built-in incentive for participation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(6): 2714-2724.
- [4] ZOU P, CHEN Q, XIA Q, et al. Incentive compatible pool-based electricity market design and implementation: a Bayesian mechanism design approach[J]. Applied Energy, 2015, 158: 508-518.
- [5] 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 R, WANG F Y. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(4): 481-494.
- [6] 张俊,王飞跃. 基于区块链的电网大数据数字资产管理架构[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(8): 1-7.
ZHANG J, WANG F Y. Block big chain digital asset management ar-

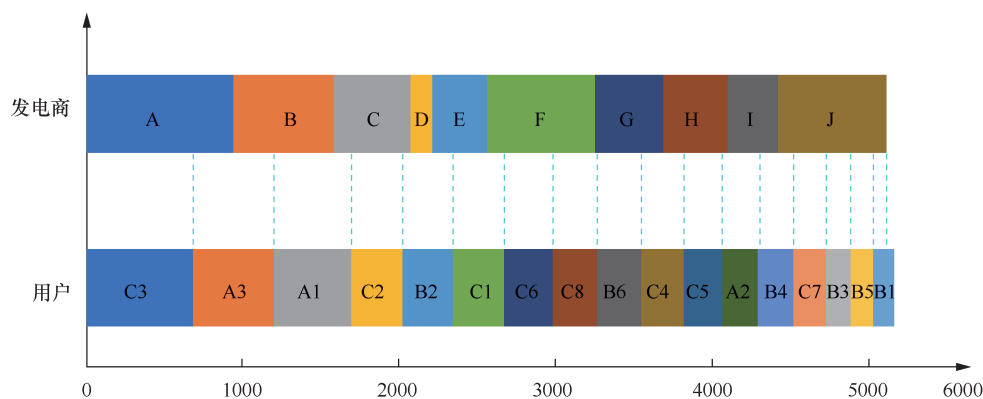


图 9 发电商与用户交易匹配结果

表 6

发电商 A 交易信息

智能合约 ID	发电商地址	用户地址	交易电量 (MW)	购电费用 (元)	奖励通证 (个)	结算时间
7e09	0x02	0x04	680	43 764.8	3.764	12:30
b23c	0x02	0x07	261	16 797.96	0	12:30

- chitecture based on blockchain[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(8): 1-7.
- [7] 张俊, 高文忠, 张应晨, 等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统: 需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报, 2017, 43(9): 1544-1554.
- ZHANG J, GAO W Z, ZHANG Y C, et al. Blockchain based intelligent distributed electrical energy systems: needs, concepts, approaches and vision[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(9): 1544-1554.
- [8] YANG T, GUO Q, TAI X, et al. Applying blockchain technology to decentralized operation in future energy internet[C]//Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2017 IEEE Conference on. IEEE, 2017: 1-5.
- [9] KANG J, YU R, HUANG X, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3154-3164.
- [10] GAO C, JI Y, WANG J, et al. Application of blockchain technology in peer-to-peer transaction of photovoltaic power generation[C]//2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). IEEE, 2018: 2289-2293.
- [11] IVY J W, MEINDL J N, OVERLEY E, et al. Token economy: a systematic review of procedural descriptions[J]. Behavior Modification, 2017, 41(5): 708-737.
- [12] ZHANG J, WANG F Y, CHEN S Y. Token economics in energy systems: concept, functionality and applications[J]. EprintarXiv: 1808.01261, 2018.
- [13] 宁晓静, 张毅, 林湘宁, 等. 基于物理-信息-价值的能源区块链分析[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2312-2323.
- NING X J, ZHANG Y, LIN X N, et al. Energy blockchain analysis based on physics-information-value[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2312-2323.
- [14] MENGELKAMP E. A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets[J]. Computer Science-Research and Development, 2018, 33(1-2): 207-214.
- [15] 平健, 陈思捷, 张宁, 等. 基于智能合约的配电网去中心化交易机制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3682-3690.
- PING J, CHEN S J, ZHANG N, et al. Decentralized trading mechanism of distribution network based on smart contract[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3682-3690.
- [16] LUO F, DONG Z Y, LIANG G, et al. A distributed electricity trading system in active distribution networks based on multi-agent coalition and blockchain[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018.
- [17] MENGELKAMP E, GÄRTTNER J, ROCKK, et al. Designing microgrid energy markets: a case study: the Brooklyn microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 210: 870-880.
- [18] ZHANG C, WANG Q, WANG J, et al. Trading strategies for distribution company with stochastic distributed energy resources[J]. Applied Energy, 2016, 177: 625-635.
- [19] AITZHAN N Z, SVETINOVIC D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2018, 15(5): 840-852.
- [20] SEDGHI M, AHMADIAN A, ALIAKBAR-GOLKAR M. Optimal storage planning in active distribution network considering uncertainty of wind power distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 304-316.
- [21] AFSHAR K, GHIAVAND F S, BIGDELI N. Optimal bidding strategy of wind power producers in pay-as-bid power markets[J]. Renewable Energy, 2018, 127: 575-586.
- [22] AIEN M, FOTUHI-FIRUZABAD M. Probabilistic GENCOs bidding strategy in restructured two-side auction power markets[J]. 2017.
- [23] 陈思远, 王波, 王佳丽, 等. 基于价差返还机制的月度集中市场模拟及参数影响分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 111-118+235.
- CHEN S Y, WANG B, WANG J L, et al. Monthly concentrated market simulation and parameter impact analysis based on price difference return mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 111-118+235.
- [24] ZHANG X P. Restructured electric power systems: analysis of electricity markets with equilibrium models[M]. IEEE Press, 2016.
- [25] ZHANG Y J, SUN Y F. The dynamic volatility spillover between European carbon trading market and fossil energy market[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 2654-2663.
- [26] 广东电力市场结算实施细则(修编版)[S]. 2018.
- Guangdong Power Market Settlement Implementation Rules(Revised edition)[S]. 2018.
- [27] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SANCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power System, 2011, 26(1): 12-19.

[作者简介]



陈思远(1993—), 男, 湖北天门人, 博士, 主要研究方向为能源系统、电力市场。



白昱阳(1997—), 男, 江西南昌人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为区块链、能源系统。



张俊(1981—), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为智能系统、人工智能、知识自动化。



王飞跃(1961—), 男, 博士, 教授, 高级研究员, 主要研究方向为智能系统、复杂系统研究。

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology

Vol.1 No.1 March 2019

Contents

Comprehensive Reviews

- The new era of artificial intelligence ZHENG Nanning (1)
- Artificial intelligence is entering the post deep-learning era ZHANG Bo (4)

Papers

- Social energy: mining energy from the society ZHANG Jun, WANG Fei-yue, FANG Zhou (7)
- Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control
..... LV Yisheng, CHEN Yuanyuan, JIN Junchen, LI Zhenjiang, YE Peijun, ZHU Fenghua (21)
- Parallel loading and unloading: smart technology toward intelligent logistics
..... SHEN Dayong, WANG Xiao, LIU Sheng (34)
- Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving
..... LIU Teng, WANG Xiao, XING Yang, GAO Yu, TIAN Bin, CHEN Long (40)
- Dynamical modeling and intelligent control of space soft manipulator
..... ZHANG Xiang, LIU Hongwei, LIU Zhuoqun, YAN Zhenguo, CHEN Xiaoqian, HUANG Yiyong (52)
- A dynamic object tracking system of industrial robots based on visual servoing technology MAO Yichao, LU Qi (62)
- Three-dimensional reconstruction cloud studio based on semi-supervised generative adversarial networks
..... YU Chong (70)
- Formation control of mobile robots with UWB localization technology
..... ZHENG Yajun, XUE Lei, DONG Lu, WANG Qingling (83)
- Algorithm design for food-picking combining deep learning and biometrics recognition
..... CHEN Niya, RUAN Jiayang, HUANG Jinmiao, YANG Wei (88)
- Design of transnational and intercontinental electricity market with blockchain and token economics
..... CHEN Siyuan, BAI Yuyang, ZHANG Jun, WANG Fei-yue (96)