

# 城市园区微网系统端对端能量交易技术 研究现状与展望

贾宏杰, 王梓博, 余晓丹, 穆云飞, 徐宪东, 王萧宇  
(天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 随着分布式能源(distributed energy resources, DERs)以及需求侧柔性资源的广泛应用, 城市园区微网系统(urban community microgrid system, UCMS)的架构、形态和运行方式将发生根本性改变, 终端用户在微网中的身份将从传统的消费者转变为兼具能量生产与消费能力的产消者。通过建立端对端(peer-to-peer, P2P)能量交易机制, 各个产消者之间可以在市场的引导下实现能量资源的协调优化, 有效提升经济效益、供需平衡以及可再生能源就地消纳等 UCMS 全局效用。为此, 分别从交易机制、运营策略以及建模分析 3 个角度, 对城市园区微网系统 P2P 能量交易技术的研究现状进行了分析, 希望能够对未来 UCMS 市场化运营提供一定的思考和借鉴。

**关键词:** 城市园区微网系统; 端对端能量交易; 交易机制; 运营策略; 市场建模

## State-of-the-art Analysis and Perspectives for Peer-to-peer Energy Trading Technology in Urban Community Microgrid System

JIA Hongjie, WANG Zibo, YU Xiaodan, MU Yunfei, XU Xiandong, WANG Xiaoyu  
(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** As massive integration of distributed energy resources (DERs) and demand-side flexible energy resources are extensively applied, the structure, form, and operation mode of the urban community microgrid system (UCMS) will be fundamentally changed. The role of end-users in the UCMS will transform from traditional consumers into prosumers with energy production and consumption capabilities. The coordination and optimization of energy resources among prosumers can be achieved by introducing the peer-to-peer (P2P) energy trading mechanism, promoting the economic benefit, energy self-sufficiency, and renewable energy self-consumption of the UCMS. Therefore, this paper analyzed the existing research of P2P energy trading technology in the UCMS from the perspectives of trading mechanism, operation strategy, and modeling methods, hoping to provide some thinking and references for the market-oriented operation of UCMS in the future.

**Key words:** urban community microgrid system; peer-to-peer energy trading; trading mechanism; operation strategy; market modeling

## 0 引言

随着城镇化进程的持续推进, 城市将成为未来社会可再生能源生产与消费最为集中的区域<sup>[1]</sup>。城市园区微网系统(urban community microgrid system, UCMS)是指汇集分布式电源、柔性负荷以及储能装置的能量产消自治系统, 通过促进用户侧灵活性资源的集成优化与协调互补, 可提升 UCMS 整体的产用能经济性、供需平衡以及可再生能源就地消纳水

平<sup>[2]</sup>。然而, 面对可再生能源比例不断提高的趋势, UCMS 的运行控制和能量管理技术也面临着诸多挑战。一方面, UCMS 配置了大量的分布式能量资源(distributed energy resources, DERs), 如分布式光伏(photovoltaic, PV)、分布式储能(distributed energy storage, DES)以及电动汽车(electric vehicle, EV)等<sup>[3-4]</sup>。虽然 DERs 可以为 UCMS 优化运行提供一定的灵活性, 但同时也将带来大量的不确定因素(例如, PV 输出功率的间歇性和随机性, EV 出行与充放电过程的不确定性等)以及双向功率流动等问题, 导致 UCMS 的协调控制更为复杂<sup>[5-6]</sup>; 另一方面, 由于 DERs 投资运营主体各异, 传统集中式运营模

基金资助项目: 国家自然科学基金(52061635103&EP/T021969/1)。  
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52061635103&EP/T021969/1).

式将难以掌握完整的能量资源配置、运行状态以及产用能计划等关键信息,无法建立有效的全局协调机制,进一步提高了 UCMS 运行调控的难度<sup>[7]</sup>。

在此背景下,用户侧分布式能源技术的推广应用,使得大量传统电力(或能源)用户,在装配一定数量的分布式发电设备后,将成为兼具能量生产与消费能力的产消者(prosumer),可进一步通过参与市场交易来获得更高的产用能收益。从管理者的角度考虑,在用户侧售电市场逐渐放开、智能设备广泛应用以及去中心化交易技术日趋完善的背景下,进一步推进市场化能量管理模式的改革,挖掘 UCMS 用户需求侧响应潜力,促进用户间能量资源的协调互补,将成为未来能源电力领域的重要发展方向<sup>[8]</sup>。

端对端(peer-to-peer, P2P)能量交易,作为市场化环境下 UCMS 能量管理的一项核心技术,近年来得到学术界和工业界广泛关注<sup>[9]</sup>。在 P2P 能量交易机制中,兼具能量生产与消费能力的终端用户(产消者),将通过参与市场交易完成能量交换,并获得相应的经济收益<sup>[10]</sup>。对于 UCMS 整体而言,借助供需相互作用、灵敏价格响应以及开放竞争等市场化资源配置方法,P2P 能量交易技术可以充分激发家庭、工商业等多元产消者之间的能量互补平衡潜力,实现能量资源的互通互济,提升系统整体的产用能经济性、供需平衡能力以及可再生能源就地消纳水平,有助于进一步推动 UCMS 向低碳清洁能源系统的过渡。与此同时,P2P 能量交易技术还有助于解决微网运营商与产消者之间信息不对称,以及由此导致的能量资源和附加价值分配不合理的问题,促进可再生能源的投资规划与运行调控由全局协调向市场引导转变。对于产消者个体而言,相比现有按照固定的价格出售或购买电能的“自发自用、余量上网”模式,P2P 能量交易技术可以进一步丰富用户购电以及可再生能源就地消纳的途径,提升终端用户的经济效益与产用能体验;在此基础上,可以充分激发用户侧灵活性资源的调控潜力,降低 UCMS 整体的运营成本,提高系统供电可靠性;此外,还可以促进可再生能源的就地消纳,降低 UCMS 扩容需求和投资成本。

为此,本文将面向 UCMS 产用能经济性提升以及可再生能源充分消纳的需求,针对用户侧 DERs 大量接入对微网系统运行调控可能产生的诸多影响,分别从交易市场结构、交易运营策略以及建模方法 3 方面入手,阐述 P2P 能量交易技术研究现状

与面临挑战,希望能够为 UCMS 市场化运营提供有益的思考和借鉴。

## 1 P2P 能量交易技术发展演化与基本特征

P2P 是一种面向分布式系统资源交换和任务分配的对等交互模型,最早应用于计算机网络系统。在 P2P 网络中,各个参与者可以共享一部分网络资源,并且在无需第三方介入引导的条件下,独立访问并获取这些资源<sup>[11]</sup>。因此,在 P2P 网络中每一个参与者既是生产者,又是网络资源的获取者和消费者。与传统信息网络相比,P2P 网络具有去中心化、可扩展性以及隐私保护等方面的优势<sup>[12]</sup>。近年来,P2P 技术在更多领域得到推广,进一步催生了包括面向商业领域的共享经济,以及面向金融领域的加密货币和数字资产等多种应用场景<sup>[13]</sup>。

在能源领域,P2P 技术的应用最早可以追溯至 2007 年<sup>[14]</sup>,早期研究重点关注 P2P 架构体系的适用场景,以及对能量生产与分配模式的影响<sup>[15]</sup>。近年来,随着分布式可再生能源以及信息与通信技术(information and communication technology, ICT)的广泛应用,UCMS 在架构、形态和运行方式等方面发生了根本性改变<sup>[16-17]</sup>,打破了传统的垄断化电能供应模式,为本地能量市场的出现和发展提供了基础<sup>[18]</sup>。与此同时,多元产消者之间的差异化产用能行为,也对 UCMS 的协调互动能力提出了更高要求。为充分利用分布式 UCMS 网络的自组织、自学习和自优化能力<sup>[19]</sup>,实现多元产消者之间灵活性能量资源的流转互通与协调互补,可以依托 UCMS 信息物理网络建立 P2P 能量交易机制<sup>[20]</sup>,如图 1 所示。

通过设计合理的市场结构,产消者可以在出售冗余发电量或本地灵活性资源获利的同时,自发促进 UCMS 功率和能量平衡,缓解运行调控中所面临的不确定性风险与供需平衡压力,从而在保证系统安全稳定运行基础上,实现产消者与 UCMS 之间的互利共赢。与传统电力零售市场相比,P2P 能量交易的特征主要包括:

- 1) 市场主体独立自治。分布式发电具有容量小、数量多、出力波动性强以及空间分布高度分散等特征,相比传统电力零售市场的集中化交易模式,P2P 能量交易技术更适合产消者独立自治的微网系统<sup>[21]</sup>,即 DERs 归属与控制权下放给各个产消者,后者将根据自身的产用能偏好进行能量资源的优化配置<sup>[22]</sup>、运行调度<sup>[23]</sup>和交易定价<sup>[24]</sup>。

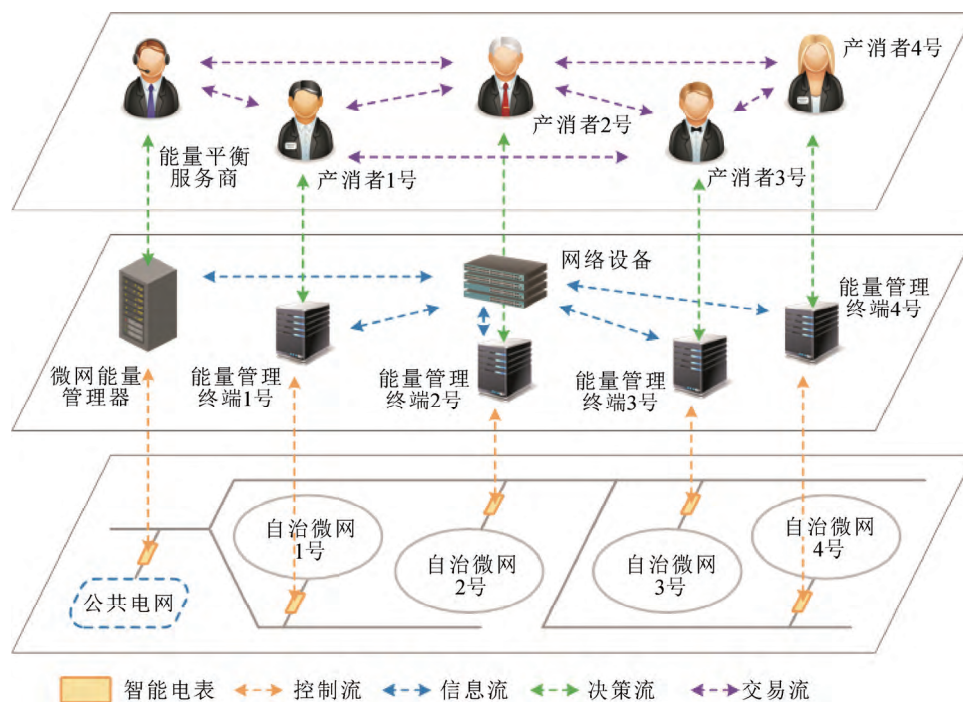


图1 P2P 能量交易市场机制

Fig.1 P2P energy trading market mechanism

2) 能量供需双向交易。传统电力零售市场的运营模式, 一般采用发电企业单向售电给终端用户<sup>[25]</sup>, 或通过价格激励手段改变终端用户用能行为的方法<sup>[26]</sup>。与之相比, P2P 市场中各个产消者身份对等, 既可以在市场中出售自身的冗余能量, 也可以向其他产消者购买能量或服务以满足自身的用能需求, 并最终借助支持双向潮流的 UCMS 微网完成能量交换。

P2P 能量交易技术作为一种有望打破能源系统“三元悖论”, 实现 UCMS “能源安全, 公平可及, 生态友好” 3 个关键要素的重要手段, 近年来在工程应用中得到广泛关注并迅速发展, 其中较为典型的应用案例包括: 欧盟地平线 2020(Horizon 2020) 计划中的 P2P-SmarTest 项目, 旨在通过市场机制来集成需求侧的灵活性, 实现功率平衡和电能质量提升; Transactive Grid 公司主导的美国纽约布鲁克林微电网项目, 其中包括居民以及工商业多元用户, 采用以太坊区块链平台发行了交易代币, 用于支持 P2P 能量交易; 除此之外, 还包括 Energy Collective (能源集合体)、EnerPort (能源端口)、NOBEL (面向相邻地区的电力中介和监测系统)、P2P Energy Trading Schemes for Sustainable Cities (可持续城市的端对端能源交易机制)、Peer Energy Cloud (端对端能源云) 以及 Street2Grid(街道电网服务) 等诸多项

目, 涵盖了对市场机制、交易平台、信息物理基础设施以及政策法规等若干方面的探讨与示范应用<sup>[27]</sup>。

## 2 P2P 能量交易市场结构

与传统电力市场自上而下的结构不同, P2P 能源交易需要在分散自治以及协调互动的原则下, 兼顾用户行为决策特征以及交易流程实施条件, 建立自下而上的市场结构<sup>[28]</sup>。根据市场的集中程度, 现有研究中 P2P 能量交易市场结构可以分成集中式、分布式以及聚合式 3 类形式<sup>[9]</sup>, 如图 2 所示。

### 2.1 集中式 P2P 能量交易市场

集中式 P2P 能量交易市场采用全局利益优先的运营模式, 按照预先制定的交易规则分配各个产消者的供需配额与经济收益, 其原理如图 3 所示。其中, 微网运营商(microgrid operator, MGO) 可以获取各个产消者的能量资源配置情况以及产用能计划等信息, 进而按照市场出清原则, 选取微网系统整体效益<sup>[29]</sup>、公共电网购售电量<sup>[30]</sup>、可再生能源就地消纳<sup>[31]</sup>等全局优化目标, 进行供需匹配、系统优化和交易定价。微网运营商出清结果将决定各个产消者的供给和需求, 进而决定 DERs 运行状态。最终, 借助微网系统完成产消者之间的能量交换。

目前已有大量研究工作对集中式 P2P 能量交易市场结构的可行性及实现方法进行了论证。例如,

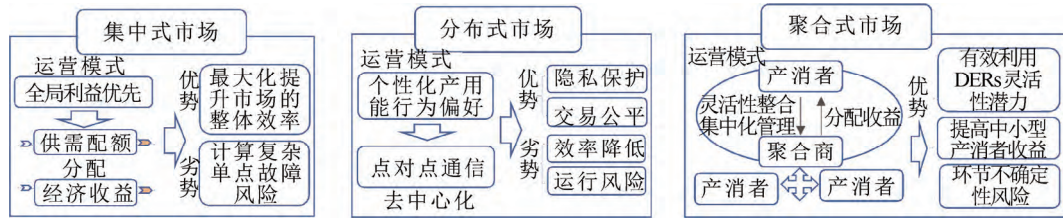


图2 P2P 能量交易市场结构示意图

Fig.2 Diagram of P2P energy trading market structure

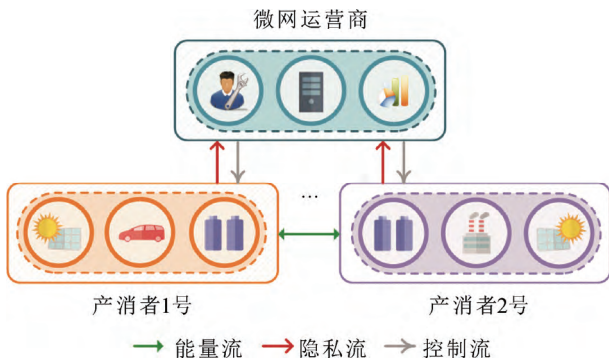


图3 集中式 P2P 能量交易市场示意图

Fig.3 Diagram of centralized P2P energy trading market

文献[32]针对采用边际定价方案的本地能量市场，建立了包含市场出清以及收益分配的双层 P2P 市场运营框架，通过促进产消者之间能量资源的协调优化，可以降低用电高峰时段的公共电网购电成本，最大限度地提高微网系统的整体效益。文献[33-35]提出在交易决策中，选取微网整体经济利益、用户参与度等经济性指标，以及功率波动、供需平衡、可再生能源就地消纳等技术性指标作为全局优化目标。考虑到全局优化可能导致部分产消者经济利益受损，文献[36]提出采用 Pareto 优化方法，保证各个产消者不会在参与 P2P 交易后承担额外的产用能成本。文献[37]针对包含大量家庭用户的 P2P 能量交易市场，建立了屋顶光伏与储能的集中式优化调度与定价策略，验证了家庭用户 DERs 参与能量交易获利的可行性。文献[38]提出一种通过两阶段聚合控制实现 P2P 能量交换的方法，其中包括全局经济调度以及基于规则的储能运行点控制。由于该方法仅需通过单向数据传输，实时追踪公共连接点的净负荷即可完成交易决策，因此可以一定程度上降低 P2P 能量交易对于传感和 ICT 基础设施带来的负担。

综上所述，集中式 P2P 能量交易市场结构的优点为架构设计相对容易，并且能够最大限度地避免单个产消者市场行为不确定性对 UCMS 整体利益

带来的影响<sup>[39]</sup>。与此同时，由于集中式市场具有统一能量管理与交易决策能力，能够更加有效地整合用户侧 DERs 参与交易，最大化提升市场的整体效率。然而，将集中式市场结构应用于 UCMS 能量交易还存在一些困难。首先，全局优化目标难以兼顾各个产消者的个性化需求<sup>[40]</sup>，并且难以保证交易的公平性<sup>[41]</sup>；其次，针对 UCMS 用户侧分布式电源与储能装置大规模接入的应用场景，集中式市场将面临 DERs 优化状态空间维数过高、优化计算过于复杂等问题<sup>[42]</sup>，显著增加了 UCMS 信息网络的通信和计算负担，并且还需要承受单点故障(single point of failure)导致市场失效的风险<sup>[43]</sup>；最后，考虑到微网运营商存在泄露敏感信息的可能性，终端用户出于隐私保护的需求，可能拒绝提供能量资源配置情况、运行状态以及产用能计划等敏感信息，导致集中式 P2P 能量交易更加难以实现<sup>[44]</sup>。

### 2.2 分布式 P2P 能量交易市场

集中式 P2P 能量交易市场虽然可实现电气意义上的能量交换，但整个过程依赖微网运营商的汇总和出清，未能实现各个产消者之间的信息交互和协调决策，无法充分发挥分布式 UCMS 网络的自组织和自优化能力。近年来，随着双边合约<sup>[45]</sup>、共识机制<sup>[46]</sup>以及区块链<sup>[47]</sup>等去中心化交易支撑技术的不断成熟，分布式 P2P 能量交易市场开始得到越来越多的关注<sup>[48]</sup>，其原理如图 4 所示。与集中式市场结构相比，分布式 P2P 能量交易市场采用产消者独立自治的运营模式，各个产消者可以根据个性化产用能行为偏好进行能量管理和交易决策<sup>[31]</sup>，进而采用点对点通信完成供需信息交互，并最终根据交易结果进行能量交换。

分布式 P2P 能量交易本质上是一种基于产消者双边合约体系的去中心化市场模式<sup>[45]</sup>，其中能量资源的分配主要依靠价格引导、供求平衡以及开放竞争等市场化资源协调机制，无需额外引入微网运营商来协调各个独立产消者的市场行为。因此，在分



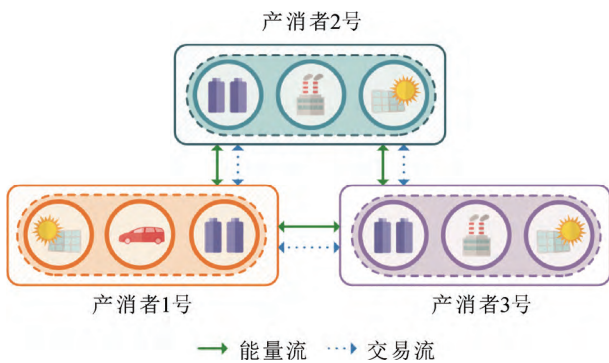


图4 分布式P2P能量交易市场示意图

Fig.4 Diagram of distributed P2P energy trading market

布式 P2P 能量交易过程中, 用户侧 DERs 的所有权和控制权可以下放给各个独立产消者, 从而降低全局优化所带来的 ICT 负担, 并可避免泄露用户的敏感信息<sup>[49]</sup>。然而, 分布式交易也存在一些不足, 例如, 由于缺少全局协调机制, 各个产消者追求自身利益最大化的交易策略, 可能会导致市场整体效率降低<sup>[50]</sup>, 在经济学中一般采用最坏均衡与最佳解比 (price of anarchy, PoA) 来定量描述市场均衡效率相比全局最优效率的损失<sup>[51]</sup>; 与此同时, 由于部分产消者交易决策能力有限, 市场中可能出现非理性交易<sup>[52]</sup>以及恶意操纵市场价格的行为<sup>[53]</sup>, 进而导致市场效率进一步降低。为避免出现损害全局利益或者导致系统运行风险的情况, 可以在分布式 P2P 市场中引入交易监管机构, 对交易进行约束或者削减<sup>[54]</sup>。

现有针对分布式 P2P 交易的研究涉及很多内容, 主要思路在于依托双边合约网络、共识机制、区块链以及多代理等去中心化交易技术, 建立 P2P 市场支撑框架, 进而在此基础上部署分布式市场出清机制, 在保证各个用户独立自主与隐私保护的前提下, 求解能量资源优化分配策略。其中: (1) 在分布式市场机制建立方面, 文献[55]对现有分布式交易技术加以整合, 建立了基于 C2C(consumer-to-consumer)商业模型的四层标准化分布式 P2P 能量交易市场框架。文献[56]建立了包含交易匹配、交易决策以及能量管理三层结构的去中心化能量交易市场, 实现了家庭用户储能系统与柔性负荷的经济最优调度。文献[57]建立了去中心化的 P2P 零售市场区块链通用框架, 并引入智能合约机制来实现无人值守的自动化交易结算, 确保交易的安全性与公平性。文献[58]通过建立集成区块链技术和智能合约技术的混合 P2P 能量交易市场, 实现了用能成本削减以及削峰填谷。文献[59]提出了一种区块链能

量交易市场代币通胀机制, 通过鼓励代币消费来促进各个产消者在 DERs 能量资源充裕时段进行能量交换。上述研究建立了分布式 P2P 能量交易市场的基本框架, 并且通过整合区块链以及智能合约网络等技术, 进一步促进 P2P 能量交易的公平性。(2) 在分布式交易出清算法方面, 文献[60]基于对独立自治产消者价格响应特性的分析, 建立了面向去中心化 P2P 现货市场的动态迭代优化定价方法, 促进了可再生能源的充分利用与就地消纳。文献[61]建立了面向高渗透率 DERs 微网系统的去中心化双边 P2P 能量交易市场机制, 提出了基于原始对偶梯度 (primal-dual gradient method) 的分布式市场出清算法, 实现在无需集中监管的情况下利用价格信号对潮流施加约束, 避免出现线路过载或阻塞。文献[62]提出一种去中心化的两阶段本地能量市场交易算法, 可以通过各个产消者之间的邻接信息交换, 实现全局福利最大化以及微网电压管理。文献[63]建立了基于池式拍卖 (pool-structured auction) 的短期 P2P 能量交易市场, 采用去中心化的蚁群优化方法实现交易出清, 可以在有效保护用户隐私的前提下获取近似最优的有效市场解。文献[64]基于 Lagrange 对偶分解原理以及次梯度法, 构建了协调多个产消者之间能量交换的分布式凸优化问题, 在保护用户隐私的情况下实现了能量资源的优化分配。文献[65]建立了满足自主性和匿名性要求的去中心化 P2P 能量交易市场, 其中各个产消者通过求解基于交替方向乘子法 (alternating direction method of multipliers, ADMM) 的分布式优化任务子目标, 可以得到满足网络约束以及市场均衡条件的最优 P2P 交易策略。文献[66]采用 Wasserstein 度量 (Wasserstein metric) 构造不确定性概率分布的模糊集, 并在此基础上提出了分布式 P2P 交易鲁棒优化定价方法。

综上所述, 现有研究给出了 P2P 能量交易市场出清机制的分布式实现方法, 在确保产消者独立自主以及隐私保护的同时, 通过促进产消者之间的供需协调, 进一步提高市场整体效率。与集中式机制相比, 分布式 P2P 能量交易市场无需建立全局协调机制, 可以充分利用市场机制本身的资源分配能力, 在确保交易公平以及隐私保护的前提下, 获得近似最优的市场出清结果。

### 2.3 聚合式 P2P 能量交易市场

在分布式市场中, 部分决策能力有限的小型

产消者,难以建立有效的能量管理与交易策略,可能导致个体经济利益甚至市场整体效率受损<sup>[67]</sup>。为此,可以进一步引入需求侧响应<sup>[68]</sup>、虚拟能效电厂<sup>[69]</sup>等集成管理和运营主体,作为中小型产消者的交易托管聚合商(aggregator)<sup>[70]</sup>,形成聚合式 P2P 能量交易市场。

聚合式市场可在一定程度上整合集中式市场的全局协调优化能力以及分布式市场的去中心化特征,形成多层次嵌套的 P2P 能量交易市场结构<sup>[71]</sup>,其原理如图 5 所示。在图中左侧的内层结构中,聚合商对各个参与用户的能量资源进行集中化管理与灵活性整合<sup>[72]</sup>,聚合商与产消者之间涉及产用能行为、DERs 运行状态,以及优化调控策略等信息的互动(故左侧的产消者称为聚合产消者,以便与独立参与市场交易的产消者进行区分);在外层结构中,聚合商以产消者的身份参与市场交易,并根据内层产消者对本次交易的贡献度分配收益<sup>[73]</sup>。由于聚合商往往具有更加丰富的能量管理与交易决策经验,聚合式市场结构一方面可以更加有效地利用 DERs 的灵活性潜力<sup>[74]</sup>;另一方面可以提高中小型产消者的交易收益<sup>[75]</sup>,并缓解 P2P 市场所面临的不确定性风险<sup>[76]</sup>。

目前已有许多研究对聚合式 P2P 能源交易市场结构和实现方法进行了探讨。其中:(1)在聚合式市场机制建立方面,文献<sup>[77]</sup>提出依托 P2P 能量交易机制构建联合电厂(federated power plant, FPP),不仅可以在微网内部实现自下而上的用户侧能量管理,还可以对外提供辅助服务,支撑上级电网的安全可靠运行。文献<sup>[78]</sup>提出各个产消者以签约的方式参与聚合商的 P2P 能量交易,后者负责用户间的交易匹配。文献<sup>[79]</sup>提出可以在市场中引入多个聚合商供产消者选择,在充分竞争的市场环境中,确保聚合商能够兼顾自身以及产消者的利益。文献<sup>[80]</sup>进一步建立了聚合商与配电网运营商(distribution system operator, DSO)之间的 Stackelberg 竞争博弈模型,并采用信息差决策理论(information gap decision theory, IGDT)对可再生能源出力的多重不确定性进行建模。博弈均衡结果表明,每一个聚合商都可以通过参与 P2P 能量交易实现收益最大化。上述研究给出了聚合式市场的基本实现方法,同时分析了市场竞争对聚合式市场效率带来的影响。(2)在聚合商交易决策方面,为了提升分布式储能用户参与市场交易的经济效益与便利性,文献<sup>[81]</sup>建立

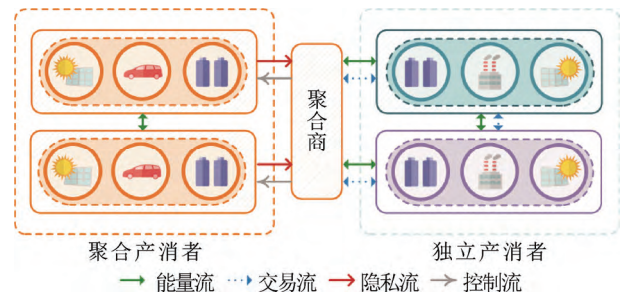


图 5 聚合式 P2P 能量交易市场示意图

Fig.5 Diagram of aggregated P2P energy trading market

了兼具能量资源外部共享与内部协调优化的储能聚合商运营策略,通过区块链以及智能合约技术实现自动化交易匹配,并在此基础上建立了交易违约惩罚与被违约补偿机制。文献<sup>[82]</sup>提出,对于出力随机波动的可再生能源,可通过分布式能源聚合商(distributed energy resource aggregator, DERA)参与 P2P 市场交易。为此,建立了包含 DERA 内部能量管理以及上层实时 P2P 市场出清的双层交易决策模型,并采用条件风险值(conditional value at risk, CVaR)来刻画可再生能源出力的随机特性。文献<sup>[83]</sup>同时考虑了可再生能源以及需求侧响应能力的双重不确定性,提出了基于鲁棒优化的日前能量管理与交易竞价模型,进一步提升了聚合商的运营收益。文献<sup>[84]</sup>建立了兼顾聚合商运营收益与 DSO 维护成本的产消者能量资源非线性双层优化调度模型,并通过 KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件以及大 M 法(big M method)将其转化为线性单层优化问题求解。总体来看,面对可再生能源出力以及用能行为的多重不确定性,现有研究通过建立基于随机规划的聚合商能量管理与交易决策方法,可以较好地保障聚合产消者的经济利益。

综上所述,聚合式 P2P 能量交易市场作为集中式和分布式市场的折中方案,通过建立合理的收益分配体系,可以有效兼顾全局利益与产消者个性化产用能需求。由于聚合商通常具备更为先进的能量管理与交易决策方法,因此能够更有效地挖掘用户侧 DERs 灵活性资源的交易潜力,抑制多重不确定性因素所导致的交易风险,有效缓解中小型产消者交易决策能力受限所导致的经济利益损失。

### 3 P2P 能量交易运营策略

与传统微电网相比,UCMS 在覆盖规模、DERs 分布、运行模式以及优化目标等方面存在一定差异,



如表 1 所示。首先, 传统微电网一般面向单个用户及其部分相邻区域进行部署, DERs 的空间分布相对集中且规模较为有限, 具备独立的能量生产和分配功能, 可以有效实现微网内部能量资源的集中管理和优化调度; 其次, 传统微电网的规划部署与运行调控一般采用“自发自用, 余量上网”的模式, 优先考虑用户自身的供电可靠性和经济利益, 并在必要时通过提供辅助服务或参与需求侧响应来支撑外部电网的优化运行。与之相比, UCMS 涵盖城市园区范围内大量的家庭、工商业等独立自治产消者, 传统的集中式运行框架难以协调不同产消者之间的差异化产用能偏好与利益诉求; 此外, 用户侧 DERs 还存在空间布局高度分散以及归属主体复杂多元等特征, 难以建立有效的全局 DERs 优化调度机制。为此, UCMS 应采用自主能量管理与产消者间协调优化相结合的运行模式, 兼顾全局以及产消者个体利益。

P2P 能量交易作为一种自下而上的能量资源协调优化机制, 为各个参与主体建立有效的市场策略, 是提高市场整体产用能经济性、实现供需平衡与能效提升等目标的前提保证。P2P 能量交易运营策略应能够充分挖掘用户侧 DERs 的灵活性调控潜力, 并且兼顾可再生能源随机波动<sup>[85]</sup>以及多方利益博弈<sup>[86]</sup>等因素带来的影响, 从而最大化提升市场参与主体的交易收益。P2P 能量交易策略一般包含能量管理与市场定价两个方面<sup>[87]</sup>, 如图 6 所示。本章将分别对其研究现状进行分析。

### 3.1 面向 P2P 交易的能量管理策略

在面向 P2P 交易的能量管理策略中, 一般采用混合整数线性规划的方法, 选取最大利润<sup>[88]</sup>、最小成本<sup>[89]</sup>或社会福利<sup>[90]</sup>作为优化目标, 同时兼顾多方面因素, 包括: (1)用户侧 DERs 存在的大量不确定性, 涉及各类负荷以及可再生能源出力的随机波动等, 使得面向 P2P 交易的能量管理成为一个求解难度较高的随机优化决策问题<sup>[91]</sup>; (2)面对 UCMS 分散自治特征, 需要考虑不同产消者之间多方利益博弈对优化结果的影响, 尤其是在博弈过程中可能存在信息不对称的情况。

在能量管理优化目标选取方面, 文献[92]指出住宅产消者更关注能效提升和产用能经济性, 而智能楼宇产消者更关注减少碳排放与降低能耗。文献[93-94]探讨了家庭用户的经济用能模型, 指出家庭用户更关注用能经济性以及舒适度, 而能量服务商

表 1 UCMS 与传统微网系统的比较

对比特征	城市园区微网系统	传统微网系统
覆盖规模	包含城市园区内部大量独立自治产消者	单个用户及其相邻区域
DERs 分布	高度分散, 归属主体复杂多元	集中分布, 归属单一主体
运行模式	自主能量管理与协调优化相结合, 兼顾产消者个性化产用能偏好与整体效益	全局协调优化, 面向供电可靠性和经济利益
优化目标	促进多元产消者间能量资源共享	高效利用自身能量资源

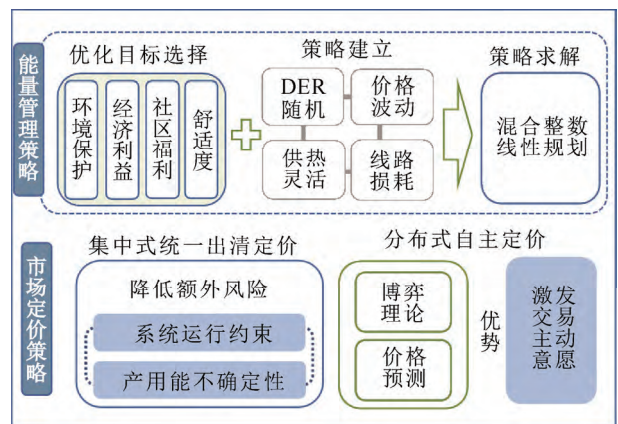


图 6 P2P 能量交易运营策略示意图

Fig.6 Diagram of operational strategies for P2P energy trading

则更关注能量网络的服务质量。文献[95]针对产消者差异化产用能需求(包括经济利益优先、环境优先、社会福利优先、慈善赠与等), 将来自不同类型发电设备的能量资源视作异质产品, 进而建立了多类型能量管理模式, 其中考虑了发电成本、能量资源调度成本以及产消者个人偏好附加值。

在能量管理策略的建立与求解方面, 针对集中式 P2P 能量交易机制, 文献[96]针对配有光储系统的并网产消者, 建立了面向 P2P 交易的能量管理策略, 通过最大限度地利用住宅和商业用户之间的互补特性来减少公共电网购电量, 从而显著降低产消者运营成本。文献[97]采用两阶段随机规划方法, 建立了考虑现货市场价格不确定性的用户侧可再生能源调度序贯决策方法, 通过协调住宅区用户的产用能行为, 参与日前/日内电力批发市场实现获利。针对分布式 P2P 能量交易机制, 文献[98]建立了以配电网整体运行成本最小为目标的产消者日前优化调度策略, 其中光伏发电的随机性成本采用截断通用模型进行描述, 并采用 ADMM 方法对优化问题进行分布式求解。文献[99]首先给出包含热阻-热容

的建筑热平衡模型,进而建立了考虑供热灵活性的产消者自治调度模型,与传统单一温度调节方式的调度策略相比,可以显著降低用能成本。文献[100]以分布式 P2P 能量交易市场主体全局福利最大化为目标,在考虑能量传输损耗以及影子价格的情况下,建立了包含供暖、通风、空调、电池储能以及电动汽车等多种灵活性 DERs 的智能住宅能量管理策略。文献[101]进一步针对包含可再生能源发电、抽水蓄能以及电池储能的多能混合系统,建立了适用于 P2P 交易的能量管理策略,在实现削峰填谷的同时显著降低了公共电网电量交换水平。

### 3.2 面向 P2P 交易的市场定价策略

通过建立合理的 P2P 交易市场定价策略,可以有效发挥价格引导、开放竞争等市场化资源配置机制在用户侧 DERs 协调优化中的作用,进一步促进系统的供需平衡与能效提升。与此同时,市场整体效率改善还可以进一步提高产消者的经济利益,反过来将吸引更多用户参与交易。在此过程中,各个参与用户将持续优化自身产用能行为,有助于形成 P2P 能量交易市场长期稳定运行的良性循环<sup>[102]</sup>。因此,面向 P2P 交易市场定价策略的研究具有较为重要的意义。

集中式和聚合式 P2P 能量交易中,一般采用统一价格出清的定价方式,按照一定的规则实现产消者之间能量资源和经济利益的分配<sup>[103]</sup>。例如,文献[104]提出可在市场定价中采用成本均摊(bill-sharing, BS)、中间价(mid-market rate, MMR)以及拍卖竞价(auction-based pricing strategy, APS) 3种定价模式,并分别验证了上述模式在社区级微网系统 P2P 交易中的适用性。文献[105]考虑了负荷与可再生能源不确定性对交易决策的影响,提出了基于供需比(supply and demand ratio, SDR)的分布式交易定价方法,并采用了兼顾产消者经济成本与参与意愿的等效成本模型。文献[106]建立了考虑能量传输阻塞的 P2P 能量交易市场定价方法,通过价格激励措施引导用户遵循网络传输约束的限制。文献[107]进一步考虑了能量传输过程中产生的网络损耗,引导供需双方选取电气距离更近的产消者进行能量交易。

在分布式 P2P 能量交易市场环境下,现有研究一般在博弈理论以及价格预测的基础上建立产消者定价策略<sup>[108]</sup>,其中:(1)在博弈理论方面,文献[109]面向完全竞争的 P2P 能量交易市场,提出一种基于 Stackelberg 博弈的实时定价方法。在该方法中,产

消者作为主从博弈的领导者,将依据供求定律(law of demand and supply)以及能量资源优化调度结果,构建与其能量供需差额相关的线性报价函数,进而向消费者发布价格信号;消费者作为主从博弈的跟随者,将依据产消者报价信息调整产用能行为,并向产消者发起购电交易。文献[110]面向插电式混合动力车储能电量灵活调配的分布式 P2P 能量交易市场,建立了基于双向拍卖(double auction)机制的迭代定价策略,并通过联盟区块链实现了无需依赖可信第三方机构的自主交易。面对 P2P 交易中信息安全以及隐私保护方面的挑战,文献[111]建立了基于联盟链(consortium blockchain)的可信交易中介平台,并在此基础上提出一种基于 Stackelberg 博弈以及信用贷款(credit-based loans)的定价策略,有效减少了由于区块链交易确认延迟导致的交易限制。文献[112]构建了完全竞争的双向拍卖 P2P 市场机制,其中各个产消者在每一轮迭代报价中,将根据自身产用能需求以及市场实时价格,调整其交易量与交易价格,以获取最大化的交易利润。(2)在价格预测方面,文献[113]考虑了价格的不确定与间歇性能源的不确定性,建立了三层优化定价模型;针对能量平衡市场,文献[114]采用价格预测方法对 P2P 能量供需进行定价,并且对比了多种时间序列模型的价格预测效果。文献[115]综合考虑市场供需以及定价策略对市场出清的影响,建立了基于人工神经网络的市场出清价格预测方法。文献[116]从供需关系、交易偏好以及用能特性 3 个角度对历史场景进行聚类,并采用历史场景平均价格作为预测价格。

综上所述,目前学术界已经对面向 P2P 交易的能量管理以及定价策略进行了较为充分的研究。在能量管理策略方面,一般选取经济性或技术性指标作为目标建立优化调度模型,其中兼顾了通过参与能量交易可以产生的额外成本或收益;在市场定价策略方面,现有研究针对集中式和分布式市场结构,分别采用统一出清定价以及用户自主定价模式,其中前者能够更好地应对系统运行约束以及产用能不确定性所带来的额外风险,而后者能够充分兼顾用户个体的产用能偏好,激发用户参与 P2P 交易的主动意愿。在价格信号以及经济利益的驱动下,产消者之间通过进行能量交换,可以有效解决可再生能源出力间歇性以及用能行为不确定性所导致的供需平衡问题,从而在一定程度上提升 UCMS 整体的经济效益,降低传输损耗与联络线扩容需求。



## 4 P2P 能量交易建模方法

P2P 能量交易市场具有参与主体多元、分散决策以及层次复杂等特征, 传统电力市场模型难以支撑其优化设计<sup>[108]</sup>。针对上述问题, 通过研究 P2P 能量交易市场建模方法, 有助于进一步完善市场结构和交易规则, 促进产消者之间的充分竞争, 实现 UCMS 能量资源的优化分配<sup>[117]</sup>。目前 P2P 能量交易建模方法大致可以分为博弈论框架模型和计算经济学模型两类, 如图 7 所示。本章将分别对其研究现状进行分析。

### 4.1 P2P 能量交易的博弈论框架模型

博弈论是指在包含特定条件约束的对局中, 多个参与者彼此之间根据对手的预期行为来制定自身应对策略的方法论<sup>[118]</sup>。博弈论框架模型可以模拟利益冲突对局中各个参与者的决策过程, 激励各个参与者在竞争或合作的过程中达成一定的全局目标<sup>[119]</sup>。博弈论框架具体可以分为非合作博弈、主从博弈和合作博弈, 分别适用于不同类型 P2P 能量交易应用场景的评价与改进<sup>[120]</sup>。

在非合作博弈中, 各个参与者的利益存在部分或完全冲突, 因此各个参与者将在没有任何沟通协调的情况下独立制定决策。非合作博弈模型在现有研究中得到了广泛的关注, 例如文献<sup>[121]</sup>提出了面向 UCMS 产消者 P2P 能量交易的博弈论建模方法, 其中售电产消者之间的竞价过程被构建为非合作博弈模型, 并依据纳什均衡存在性定理<sup>[122]</sup>证明了非合作博弈均衡的存在性和唯一性。文献<sup>[123]</sup>针对包含高渗透率可再生能源的微网系统, 建立了产消者之间的非合作博弈模型, 并采用 Nikaido-Isoda 松弛算法迭代求解, 最终在无监管市场机制中获得满足网络约束的纳什均衡出清价格。文献<sup>[124]</sup>采用非合作博弈出清机制, 构建了集中式 P2P 能量交易市场模型, 提高了主动配电网中家庭用户的能量交互参与度与产用能经济性。文献<sup>[125]</sup>从行为经济学的角度出发, 建立了基于广义非合作博弈模型以及有效动机心理学框架(effective motivational psychology framework)的能量资源协调优化与定价方法, 可以有效提高用户的产用能经济性和市场参与度。文献<sup>[126]</sup>建立了基于线性通用供需函数的产消者交易决策与市场出清方法, 进而通过构造 P2P 能量交易非合作博弈模型及其等效凸优化问题, 证明了纳什均衡存在性, 并得出充分竞争可以改善产消者经济

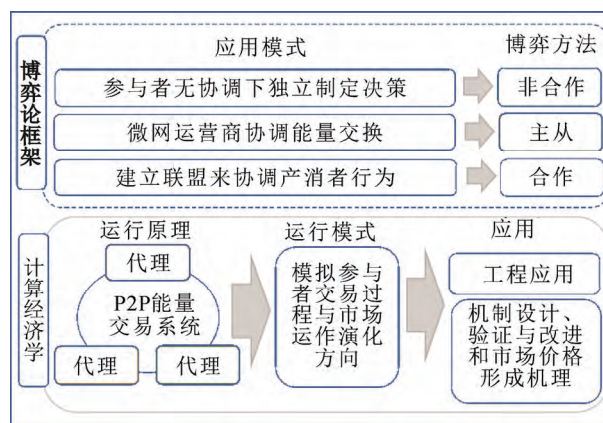


图 7 P2P 能量交易建模方法示意图

Fig.7 Diagram of modeling methods for P2P energy trading

利益以及市场整体福利等推论。

主从博弈是一类特殊的两阶段非合作博弈理论<sup>[127]</sup>, 其中最具代表性的是 Stackelberg 博弈模型<sup>[128]</sup>。在主从博弈中, 率先做出决策的一方称为领导者, 根据领导者的决策随后做出决策的一方称为跟随者。主从博弈一般应用于 P2P 能量交易分层优化问题的求解, 例如文献<sup>[129-130]</sup>建立了售电产消者主导市场竞争的多微网系统 P2P 能量交易机制, 进而通过构建售电与购电产消者之间的多领导者-多跟随者 Stackelberg 博弈模型, 论证了上述交易机制在提高经济效益以及可再生能源利用率方面的优势。文献<sup>[131]</sup>首先面向综合能源系统多能交易问题, 建立了分层 Stackelberg 博弈模型, 其中能源站作为领导者决定能量交易单价, 多能用户作为跟随者依据价格确定自身的交易量; 随后证明了上述 Stackelberg 博弈模型中纳什均衡的存在性和唯一性, 并验证了市场规模以及外源性参数对于市场均衡带来的影响。文献<sup>[132]</sup>针对需求侧响应零售商动态定价问题, 通过构建 Stackelberg 博弈模型, 实现了零售商利润与消费者剩余之间的权衡。文献<sup>[133]</sup>面向主动配电网分布式 P2P 能量交易市场, 通过建立售电与购电产消者之间的 Stackelberg 博弈模型, 实现对阻塞的有效管理。文献<sup>[134]</sup>建立了光伏产消者与微网运营商之间的 Stackelberg 博弈模型。其中, 微网运营商作为领导者, 将按照一定的供需价格向产消者购买或出售能量; 光伏产消者作为跟随者, 将根据市场价格调整自身光储系统的产用能行为。所提方法从微网运营商的角度出发, 通过协调各个产消者之间的能量交换, 来提高微网运营商以及各个产消者的交易收益。

在合作博弈中,多个参与者之间可以建立联盟,通过协调彼此行动来增加各个参与者以及联盟整体的利益。合作博弈一般用于分析 P2P 能量交易市场的稳定性,或优化产消者联盟内部的利益分配机制。例如,文献[135-136]建立了基于合作博弈的 P2P 能量交易方法。其中,各个产消者的 DERs 接受代理商的统一优化调度并参与市场交易。在交易结算阶段,代理商将根据各个产消者的边际贡献分配交易收益,确保了合作博弈中利益分配的公平性。文献[137]验证了基于经典合作博弈(canonical coalition game, CCG)方法构建产消者联盟的可行性,通过采用中间价(mid-market rate, MMR)作为交易定价机制,可以为参与合作的产消者带来额外利益,从而确保合作联盟能够长期稳定存在。文献[138]基于合作博弈理论,建立了储能产消者联盟,通过对各个产消者的储能系统进行统一优化调度,来提高产消者的运营收益。文献[139]建立了小型售电商与终端用户之间的生产-消费者联盟,并通过合作博弈理论,证明了基于渐进 Shapley 值的利益分配方案可以确保联盟参与者获得合理收益,有效促进合作联盟的稳定性。与之相比,文献[140]则通过建立与激励相容的触发-惩罚机制(trigger-and-punishment mechanism),避免联盟内部出现非合作竞争行为。

#### 4.2 P2P 能量交易的计算经济学模型

P2P 能量交易的各个环节包含了大量涉及用户主观意愿的市场竞争与供需互动行为,常规的理论分析方法一般难以涵盖多元主体之间的复杂博弈过程以及大量不确定性因素<sup>[141]</sup>。因此,单纯采用博弈论方法,在针对 P2P 市场机制进行整体评估和预测指导时,将存在一定局限性。近年来,计算经济学(agent-based computational economics, ACE)模型在电力市场仿真验证和工程应用中,得到了学术界的广泛关注<sup>[142]</sup>,其本质原理是将大量具有独立决策以及信息交换能力的代理(agent)组成进化系统,从而实现经济系统的建模、仿真与运行控制<sup>[143]</sup>。

ACE 方法对于 P2P 能量交易市场机制的设计、验证与改进,以及解释市场价格形成机理等方面具有重要作用<sup>[144]</sup>。文献[145]建立了基于代理(agent-based modeling, ABM)的 P2P 能量交易实证建模框架,验证了 RENew Nexus 等多种市场框架在居民用户 P2P 交易中的适用性,进而分析了光伏发电预测方法、储能电池类型以及生产-消费者比例等因素对于 P2P 能量交易动态特征的影响。文献

[146]利用 ABM 方法建立 P2P 能量交易模型,验证了用户参与度提升对于产消者经济利益以及可再生能源利用率的影响。文献[147]利用多代理技术的独立决策与信息交互能力,验证了能量交易中引入信息修正竞价模型,可提高运营代理商在趋利市场中的交易利润,促进可再生能源就地消纳。文献[148]面向包含家庭与工商业用户的多能微网系统,建立了基于部分可观测马尔可夫决策过程(partially observable Markov decision process)的双层 P2P 能量交易模型,并通过建立深度强化学习多代理框架,验证了所提方法可以有效降低微网运营成本。

ACE 方法还可支撑 P2P 能量交易的工程应用。例如,文献[149]提出整合多代理系统、智能合约技术以及区块链技术,构建无需人工干预的微网系统 P2P 能量交易市场,在提升信息安全的同时,还可以降低交易平台维护成本。文献[150]提出采用多代理技术实现反向拍卖(reverse auction)P2P 能量交易市场,其中多代理平台用于监管、控制和执行能量资源的反向拍卖过程。文献[151]面向办公建筑微网系统的能量管理,建立了基于多代理平台的 P2P 能量交易仿真验证模型。其中,微网产消者通过参与市场交易,在无需进行负荷迁移、用能优化或购置新设备的情况下降低了用能成本,因而验证了所建立 P2P 能量交易机制的有效性。

综上所述,现有研究立足于 P2P 能量交易机制的设计、改进与验证,分别建立了基于博弈论框架以及计算经济学的市场建模方法。其中,博弈论方法通过理论建模刻画了市场中利益冲突个体之间的竞价策略,而计算经济学方法则通过 ABM 等技术,模拟参与者的交易过程与市场运作的演化方向。上述研究成果可以为 P2P 能量交易机制的进一步遴选与完善提供模型验证基础。

## 5 P2P 能量交易研究展望

现有研究在 P2P 能量交易的市场结构、交易策略以及建模分析方面,已经有很多前期成果,但依然存在以下问题有待进一步完善:

1) 面向 UCMS 多元产消者供需协调的 P2P 能量交易机制有待进一步深化

现有研究针对自治产消者之间的能量资源协调优化问题,分别建立了采用统一定价的集中式市场以及采用双向拍卖交易的分布式市场。考虑到 UCMS 具有能量资源数量较大、归属主体多元等

特点, 采用集中式交易将面临优化空间维数过高、优化计算过于复杂等问题; 同时, UCMS 终端用户出于隐私保护的需求, 可能拒绝向微网运营商提供自身能量资源配置情况、运行状态以及产用能计划等敏感信息, 使得集中式 P2P 能量交易更加难以实现。采用分布式市场机制可以在一定程度上避免敏感信息泄露, 但由于缺少全局协调机制, 分布式 P2P 能量交易对产消者的交易决策能力提出了更高的要求。因此, 现有研究在交易信息公开透明方面还需要进一步完善, 避免由于产消者交易决策能力受限导致市场整体效率降低。此外, 现有研究虽然在交易结算阶段引入了区块链等去中心化技术, 但在交易竞价阶段依然采用集中化的交易平台, 因此存在单点故障导致市场交易整体失效、进而扩大 UCMS 信息物理风险的可能性。综上考虑, 如何在兼顾信息透明、隐私保护以及安全可靠的前提下, 引入去中心化的交易竞价方法, 是建立 P2P 能量交易机制需要解决的关键问题, 有待进一步深化研究。

2) 考虑市场供需弹性的灵活性资源量化提取与定价策略尚需深入讨论

建立有效的 DERs 能量管理策略是产消者灵活性资源量化提取的基础, 现有研究往往针对某一类具体研究对象建立能量管理模型, 方法的通用性难以保证。在灵活性建模方面, 现有研究往往采用二次成本函数等面向传统现货市场的建模方法, 来刻画产消者的交易意愿。然而, 对于包含差异化分布式可再生能源、储能以及柔性负荷的 UCMS 产消者, 需要构建更加精细的产用能边际效用模型, 为灵活性资源量化提取与交易定价提供有效支撑, 目前研究尚未涉及。在交易定价方面, 现有研究一般面向完全竞争市场, 假定用户均为市场价格的接受者, 在非合作博弈以及价格预测的基础上建立定价策略。然而, 对于竞价过程公开透明的 UCMS 分布式 P2P 能量交易市场, 现有定价策略未能充分利用动态价格信号中所包含的深层供求信息, 难以消除信息不对称所导致的市场效率损失; 对于能量平衡服务商等拥有较强的市场力的参与主体, 现有定价策略忽略了有限规模 UCMS 市场的供需弹性, 未能体现能量平衡服务商规模经济对于市场均衡带来的影响, 因此将可能导致能量平衡服务商自身经济利益以及市场全局效用受损。综上所述, 在 UCMS 产消者灵活性资源量化提取与交易策略方面的研究还需要进一步完善。

3) 包含聚合商市场力的 P2P 能量交易建模及分析方法还需深化

通过在 P2P 能量交易中引入聚合商托管模式, 建立合理的聚合商能量资源调度与经济利益分配体系, 可以有效缓解分布式市场中产消者交易决策能力受限所导致的不确定性风险。现有研究通过建立基于 Stackelberg 博弈的能量交易市场模型, 验证了聚合商托管模式对于产消者个体经济利益和系统整体效益的提升效果。然而, 当聚合商掌握大量用户侧灵活性资源时, 将显著提高其竞价能力, 成为具有较强市场力的 P2P 能量交易市场参与主体。一旦聚合商利用其市场力操纵市场价格并从中获利, 将可能给其余独立产消者以及 UCMS 整体效益带来损失。目前针对聚合商市场力的研究相对有限, 大部分研究关注产消者市场力的评价方法, 而聚合商市场力的形成机理、负面影响以及抑制方法还有待深入探究。

## 参考文献 References

- [1] YAZDANIE M, OREHOUNIG K. Advancing urban energy system planning and modeling approaches: gaps and solutions in perspective[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110607.
- [2] 王成山, 李 鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(2): 10-14, 23.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [3] 杨经纬, 张 宁, 王 毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 11-24.  
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 11-24.
- [4] 余晓丹, 徐宪东, 陈硕翼, 等. 综合能源系统与能源互联网综述[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(1): 1-13.  
YU Xiaodan, XU Xiandong, CHEN Shuoyi, et al. A brief review to integrated energy system and energy internet[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(1): 1-13.
- [5] WANG C, WANG S, LIU F, et al. Risk-loss coordinated admissibility assessment of wind generation for integrated electric-gas systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 4454-4465.
- [6] CAO Y, WEI W, CHEN L J, et al. Supply inadequacy risk evaluation of stand-alone renewable powered heat-electricity energy systems: a data-driven robust approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 1937-1947.
- [7] 刘 洪, 李吉峰, 葛少云, 等. 基于多主体博弈与强化学习的并网型综合能源微网协调调度[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(1): 40-48.  
LIU Hong, LI Jifeng, GE Shaoyun, et al. Coordinated scheduling of grid-connected integrated energy microgrid based on multi-agent game and reinforcement learning[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(1): 40-48.
- [8] 陈启鑫, 刘敦楠, 林 今, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制



- (一)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3050-3056.
- CHEN Qixin, LIU Dunnan, LIN Jin, et al. Business models and market mechanisms of energy internet (1)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3050-3056.
- [9] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. Peer-to-peer trading in electricity networks: an overview[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3185-3200.
- [10] LUO Y, ITAYA S, NAKAMURA S, et al. Autonomous cooperative energy trading between prosumers for microgrid systems[C]//39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops. Edmonton, Canada: IEEE, 2014: 693-696.
- [11] SCHOLLMEIER R. A definition of peer-to-peer networking for the classification of peer-to-peer architectures and applications[C] // Proceedings First International Conference on Peer-to-Peer Computing. Linköping, Sweden: IEEE, 2001: 101-102.
- [12] JOGUNOLA O, IKPEHAI A, ANOH K, et al. Comparative analysis of P2P architectures for energy trading and sharing[J]. Energies, 2017, 11(1): 62.
- [13] EINAV L, FARRONATO C, LEVIN J. Peer-to-peer markets[J]. Annual Review of Economics, 2016, 8: 615-635.
- [14] BEITOLLAHI H, DECONINCK G. Peer-to-peer networks applied to power grid[C]//Proceedings of the International conference on Risks and Security of Internet and Systems. Marrakech, Morocco: IEEE, 2007: 8.
- [15] GIOTITAS S, PAZAITIS A, KOSTAKIS V. A peer-to-peer approach to energy production[J]. Technology in Society, 2015, 42: 28-38.
- [16] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7.
- WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7.
- [17] WU F F, VARAIYA P P, HUI R S Y. Smart grids with intelligent periphery: an architecture for the energy internet[J]. Engineering, 2015, 1(4): 436-446.
- [18] YAZDANIE M, DENSING M, WOKAUN A. The nationwide characterization and modeling of local energy systems: quantifying the role of decentralized generation and energy resources in future communities[J]. Energy Policy, 2018, 118: 516-533.
- [19] 王程, 刘念. 基于交替方向乘子法的互联微电网系统分布式优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2675-2681.
- WANG Cheng, LIU Nian. Distributed optimal dispatching of interconnected microgrid system based on alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2675-2681.
- [20] ZHANG C H, WU J Z, ZHOU Y, et al. Peer-to-peer energy trading in a microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 220: 1-12.
- [21] REDDY P P, VELOSO M M. Strategy learning for autonomous agents in smart grid markets[C]//Proceedings of the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence. Barcelona, Spain: ACM, 2011: 1446-1451.
- [22] RODRIGUES D L, YE X M, XIA X H, et al. Battery energy storage sizing optimisation for different ownership structures in a peer-to-peer energy sharing community[J]. Applied Energy, 2020, 262: 114498.
- [23] 李轩, 李华强, 李旭翔. 基于区块链的分布式储能端对端交易控制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3424-3431.
- LI Xuan, LI Huaqiang, LI Xuxiang. Peer-to-peer trade and control for distributed energy storage based on blockchain technology[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3424-3431.
- [24] HAHNEL U J J, HERBERZ M, PENA-BELLO A, et al. Becoming prosumer: revealing trading preferences and decision-making strategies in peer-to-peer energy communities[J]. Energy Policy, 2020, 137: 111098.
- [25] 张小平, 李佳宁, 付灏. 英国电力零售市场的改革与挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 10-16.
- ZHANG Xiaoping, LI Jianing, FU Hao. UK retail electricity market reform and challenges[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 10-16.
- [26] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97-106.
- ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-106.
- [27] ZHOU Y, WU J Z, LONG C, et al. State-of-the-art analysis and perspectives for peer-to-peer energy trading[J]. Engineering, 2020, 6(7): 739-753.
- [28] SOUSA T, SOARES T, PINSON P, et al. Peer-to-peer and community-based markets: a comprehensive review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 104: 367-378.
- [29] CUI S C, WANG Y W, SHI Y, et al. A new and fair peer-to-peer energy sharing framework for energy buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3817-3826.
- [30] LÜTH A, ZEPTER J M, DEL GRANADO P C, et al. Local electricity market designs for peer-to-peer trading: the role of battery flexibility[J]. Applied Energy, 2018, 229: 1233-1243.
- [31] 肖谦, 陈政, 朱宗耀, 等. 适应分布式发电交易的分散式电力市场探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 208-218.
- XIAO Qian, CHEN Zheng, ZHU Zongyao, et al. Discussion on decentralized electricity market for distributed generation transactions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 208-218.
- [32] CORNÉLUSSE B, SAVELLI I, PAOLETTI S, et al. A community microgrid architecture with an internal local market[J]. Applied Energy, 2019, 242: 547-560.
- [33] ZHOU Y L, CI S, LI H J, et al. A new framework for peer-to-peer energy sharing and coordination in the energy internet[C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). Paris, France: IEEE, 2017: 1-6.
- [34] LIU T, TAN X Q, SUN B, et al. Energy management of cooperative microgrids with P2P energy sharing in distribution networks[C]//2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Miami, USA: IEEE, 2015: 410-415.
- [35] ZHOU Y, WU J Z, LONG C. Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework[J]. Applied Energy, 2018, 222: 993-1022.
- [36] ALAM M R, ST-HILAIRE M, KUNZ T. An optimal P2P energy trading model for smart homes in the smart grid[J]. Energy Efficiency, 2017, 10(6): 1475-1493.
- [37] NGUYEN S, PENG W, SOKOLOWSKI P, et al. Optimizing rooftop photovoltaic distributed generation with battery storage for peer-to-peer energy trading[J]. Applied Energy, 2018, 228: 2567-2580.
- [38] LONG C, WU J Z, ZHOU Y, et al. Peer-to-peer energy sharing through a two-stage aggregated battery control in a community microgrid[J]. Applied Energy, 2018, 226: 261-276.
- [39] PARHIZI S, KHODAEI A, SHAHIDEPOUR M. Market-based versus price-based microgrid optimal scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 615-623.
- [40] ECKER F, SPADA H, HAHNEL U J J. Independence without control: Autarky outperforms autonomy benefits in the adoption of private energy storage systems[J]. Energy Policy, 2018, 122: 214-228.
- [41] ALAM M R, ST-HILAIRE M, KUNZ T. Peer-to-peer energy trading

- among smart homes[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 1434-1443.
- [42] LIAN J M, REN H Y, SUN Y N, et al. Performance evaluation for transactive energy systems using double-auction market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 4128-4137.
- [43] PAPADASKALOPOULOS D, STRBAC G. Decentralized participation of flexible demand in electricity markets—part I: market mechanism[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 3658-3666.
- [44] 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.
- [45] MORSTYN T, TEYTELBOYM A, MCCULLOCH M D. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 2026-2035.
- [46] SORIN E, BOBO L, PINSON P. Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 994-1004.
- [47] ALI F S, ALOQAILY M, ALFANDI O, et al. Cyberphysical blockchain-enabled peer-to-peer energy trading[J]. *Computer*, 2020, 53(9): 56-65.
- [48] ABDELLA J, SHUAIB K. Peer to peer distributed energy trading in smart grids: a survey[J]. *Energies*, 2018, 11(6): 1560.
- [49] LUO F J, DONG Z Y, LIANG G Q, et al. A distributed electricity trading system in active distribution networks based on multi-agent coalition and blockchain[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 4097-4108.
- [50] GUERRERO J, CHAPMAN A, VERBIC G. A study of energy trading in a low-voltage network: centralised and distributed approaches[C]// 2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC). Melbourne, Australia: IEEE, 2017: 1-6.
- [51] DEORI L, MARGELLOS K, PRANDINI M. Price of anarchy in electric vehicle charging control games: when Nash equilibria achieve social welfare[J]. *Automatica*, 2018, 96: 150-158.
- [52] 张海涛, 王汝英, 张立, 等. 基于区块链的园区级分布式新能源代币交易技术研究[C]// 中国电机工程学会能源互联网专委会首届学术年会会议论文集. 成都, 中国: 中国电机工程学会, 2019: 396-402.
- ZHANG Haitao, WANG Ruying, ZHANG Lli, et al. Research on park-level distributed new energy token trading technology based on block chain[C]// Proceedings of the First Academic Annual Meeting of Energy Internet Committee of CSEE. Chengdu, China: CSEE, 2019: 396-402
- [53] GUO H Y, CHEN Q X, ZHANG Y, et al. Constraining the oligopoly manipulation in electricity market: a vertical integration perspective[J]. *Energy*, 2020, 194: 116877.
- [54] GUERRERO J, CHAPMAN A C, VERBIČ G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(5): 5163-5173.
- [55] ZHANG C H, WU J Z, CHENG M, et al. A bidding system for peer-to-peer energy trading in a grid-connected microgrid[J]. *Energy Procedia*, 2016, 103: 147-152.
- [56] ELKAZAZ M, SUMNER M, THOMAS D. A hierarchical and decentralized energy management system for peer-to-peer energy trading[J]. *Applied Energy*, 2021, 291: 116766.
- [57] HAN D, ZHANG C Z H, PING J, et al. Smart contract architecture for decentralized energy trading and management based on blockchains[J]. *Energy*, 2020, 199: 117417.
- [58] KHALID R, JAVAID N, ALMOGREN A, et al. A blockchain-based load balancing in decentralized hybrid P2P energy trading market in smart grid[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 47047-47062.
- [59] DEVINE M T, CUFFE P. Blockchain electricity trading under demurrage[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 2323-2325.
- [60] LIU Y B, ZUO K Y, LIU X Q, et al. Dynamic pricing for decentralized energy trading in micro-grids[J]. *Applied Energy*, 2018, 228: 689-699.
- [61] KHORASANY M, MISHRA Y, LEDWICH G. A decentralized bilateral energy trading system for peer-to-peer electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(6): 4646-4657.
- [62] PAUDEL A, KHORASANY M, GOOI H B. Decentralized local energy trading in microgrids with voltage management[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(2): 1111-1121.
- [63] ESMAT A, DE VOS M, GHIASSI-FARROKHFAL Y, et al. A novel decentralized platform for peer-to-peer energy trading market with blockchain technology[J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116123.
- [64] 吴界辰, 艾欣, 胡俊杰, 等. 面向智能园区多产消者能量管理的对等模型(P2P)建模与优化运行[J]. *电网技术*, 2020, 44(1): 52-60.
- WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Peer-to-peer modeling and optimal operation for prosumer energy management in intelligent community[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(1): 52-60.
- [65] SAMPATH L P M I, PAUDEL A, NGUYEN H D, et al. Peer-to-peer energy trading enabled optimal decentralized operation of smart distribution grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 654-666.
- [66] LI J Y, KHODAYAR M E, WANG J H, et al. Data-driven distributionally robust Co-optimization of P2P energy trading and network operation for interconnected microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(6): 5172-5184.
- [67] VERGADOS D J, MAMOUNAKIS I, MAKRIS P, et al. Prosumer clustering into virtual microgrids for cost reduction in renewable energy trading markets[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2016, 7: 90-103.
- [68] LIU W J, QI D L, WEN F S. Intraday residential demand response scheme based on peer-to-peer energy trading[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(3): 1823-1835.
- [69] 单俊嘉, 胡俊杰, 吴界辰. 面向虚拟电厂能量管理的点对点市场交易机制与模型[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3401-3408.
- SHAN Junjia, HU Junjie, WU Jiechen. Peer-to-peer market trading mechanism and model for virtual power plant energy management[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3401-3408.
- [70] CUI S C, WANG Y W, SHI Y, et al. An efficient peer-to-peer energy-sharing framework for numerous community prosumers[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(12): 7402-7412.
- [71] SHEIKHAHMADI P, BAHRAMARA S. The participation of a renewable energy-based aggregator in real-time market: a Bi-level approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 123149.
- [72] IRIA J, SOARES F, MATOS M. Optimal bidding strategy for an aggregator of prosumers in energy and secondary reserve markets[J]. *Applied Energy*, 2019, 238: 1361-1372.
- [73] SOTO E A, BOSMAN L B, WOLLEGA E, et al. Peer-to-peer energy trading: a review of the literature[J]. *Applied Energy*, 2021, 283: 116268.
- [74] OLIVELLA-ROSELL P, LLORET-GALLEGO P, MUNNÉ-COLLADO Í, et al. Local flexibility market design for aggregators providing multiple flexibility services at distribution network level[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 822.
- [75] BURGER S, CHAVES-ÁVILA J P, BATLLE C, et al. A review of the value of aggregators in electricity systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 77: 395-405.

- [76] GHAVIDEL S, RAJABI A, GHADI M J, et al. Hybrid power plant bidding strategy for voltage stability improvement, electricity market profit maximization, and congestion management[J]. *IET Energy Systems Integration*, 2021, 3(2): 130-141.
- [77] MORSTYN T, FARRELL N, DARBY S J, et al. Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants[J]. *Nature Energy*, 2018, 3(2): 94-101.
- [78] LONG C, WU J Z, ZHANG C H, et al. Feasibility of peer-to-peer energy trading in low voltage electrical distribution networks[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2227-2232.
- [79] RASHIDIZADEH-KERMANI H, VAHEDIPOUR-DAHRAIE M, SHAFIE-KHAH M, et al. Optimal bidding of profit-seeking virtual associations of smart prosumers considering peer to peer energy sharing strategy[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 132: 107175.
- [80] GAZIJAHANI F S, SALEHI J. Game theory based profit maximization model for microgrid aggregators with presence of EDRP using information gap decision theory[J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(2): 1767-1775.
- [81] 张巍, 卢骧. 点对点交易下储能聚合商共享自营多模式交易模型[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(2): 15-23.  
ZHANG Wei, LU Xiang. Sharing and self-operating multi-mode trading model of energy storage aggregators with peer-to-peer trade[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(2): 15-23.
- [82] IRIA J, SOARES F, MATOS M. Optimal supply and demand bidding strategy for an aggregator of small prosumers[J]. *Applied Energy*, 2018, 213: 658-669.
- [83] WANG F, GE X X, YANG P, et al. Day-ahead optimal bidding and scheduling strategies for DER aggregator considering responsive uncertainty under real-time pricing[J]. *Energy*, 2020, 213: 118765.
- [84] HAGHIFAM S, DADASHI M, ZARE K, et al. Optimal operation of smart distribution networks in the presence of demand response aggregators and microgrid owners: a multi follower bi-level approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102033.
- [85] NIKMEHR N, RAVADANEGH S N. Optimal power dispatch of multi-microgrids at future smart distribution grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(4): 1648-1657.
- [86] 刁勤华, 林济铿, 倪以信, 等. 博弈论及其在电力市场中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2001, 25(1): 19-23.  
DIAO Qinhu, LIN Jikeng, NI Yixin, et al. Game theory and its applications in power markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2001, 25(1): 19-23.
- [87] WU Y, TAN X Q, QIAN L P, et al. Optimal pricing and energy scheduling for hybrid energy trading market in future smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(6): 1585-1596.
- [88] TORBAGHAN S S, BLAAUWBROEK N, KUIKEN D, et al. A market-based framework for demand side flexibility scheduling and dispatching[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2018, 14: 47-61.
- [89] OLIVELLA-ROSELL P, BULLICH-MASSAGUÉ E, ARA-GÜÉS-PENALBA M, et al. Optimization problem for meeting distribution system operator requests in local flexibility markets with distributed energy resources[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 881-895.
- [90] AN D, YANG Q Y, YU W, et al. Sto2Auc: a stochastic optimal bidding strategy for microgrids[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(6): 2260-2274.
- [91] BAI L Q, LI F X, JIANG T, et al. Robust scheduling for wind integrated energy systems considering gas pipeline and power transmission N-1 contingencies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1582-1584.
- [92] 王燕舞, 崔世常, 肖江文, 等. 社区产消者能量分享研究综述[J]. *控制与决策*, 2020, 35(10): 2305-2318.  
WANG Yanwu, CUI Shichang, XIAO Jiangwen, et al. A review on energy sharing for community energy prosumers[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(10): 2305-2318.
- [93] ZHAO Z, LEE W C, SHIN Y, et al. An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(3): 1391-1400.
- [94] PRATT A, KRISHNAMURTHY D, RUTH M, et al. Transactive home energy management systems: the impact of their proliferation on the electric grid[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2016, 4(4): 8-14.
- [95] MORSTYN T, MCCULLOCH M D. Multiclass energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(5): 4005-4014.
- [96] KUSAKANA K. Optimal peer-to-peer energy management between grid-connected prosumers with battery storage and photovoltaic systems[J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 32: 101717.
- [97] ZEPTER J M, LÜTH A, DEL GRANADO P C, et al. Prosumer integration in wholesale electricity markets: synergies of peer-to-peer trade and residential storage[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 184: 163-176.
- [98] 陈修鹏, 李庚银, 周明, 等. 考虑新能源不确定性和点对点交易的配网产消者分布式优化调度[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3331-3338.  
CHEN Xiupeng, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Distributed optimal scheduling for prosumers in distribution network considering uncertainty of renewable sources and P2P trading[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3331-3338.
- [99] 葛少云, 李吉峰, 刘洪, 等. 考虑智能建筑特性的多微网端对端能量交易方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(6): 203-214.  
GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, et al. Peer-to-peer energy trading method for multiple microgrids considering characteristics of smart building[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 203-214.
- [100] LYU C, JIA Y W, XU Z. Fully decentralized peer-to-peer energy sharing framework for smart buildings with local battery system and aggregated electric vehicles[J]. *Applied Energy*, 2021, 299: 117243.
- [101] KUSAKANA K. Optimal economic dispatch of grid-interactive renewable prosumers with hybrid storage and peer to peer energy sharing capabilities[J]. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, 2021, 10(3): 209-216.
- [102] SHARIFI L, FREITAG F, VEIGA L. ARTA: an economic middleware to exchange pervasive energy and computing resources[C]//2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). Sydney, Australia: IEEE, 2016: 478-483.
- [103] WU S X, ZHANG F F, LI D L. User-centric peer-to-peer energy trading mechanisms for residential microgrids[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2018: 1-6.
- [104] LONG C, WU J Z, ZHANG C H, et al. Peer-to-peer energy trading in a community microgrid[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [105] LIU N, YU X H, WANG C, et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3569-3583.
- [106] BAROCHE T, PINSON P, LATIMIER R L G, et al. Exogenous cost allocation in peer-to-peer electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(4): 2553-2564.
- [107] PAUDEL A, SAMPATH L P M I, YANG J W, et al. Peer-to-peer ener-



- gy trading in smart grid considering power losses and network fees[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 4727-4737.
- [108] 万 灿, 贾妍博, 李 彪, 等. 城镇能源互联网能源交易模式和用户响应研究现状与展望[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(14): 29-40. WAN Can, JIA Yanbo, LI Biao, et al. Research status and prospect of energy trading mode and user demand response in urban energy internet[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(14): 29-40.
- [109] JIN Y S, CHOI J, WON D. Pricing and operation strategy for peer-to-peer energy trading using distribution system usage charge and game theoretic model[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 137720-137730.
- [110] KANG J W, YU R, HUANG X M, 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.
- [111] LI Z T, KANG J W, YU R, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(8): 3690-3700.
- [112] ZHANG C, YANG T, WANG Y. Peer-to-peer energy trading in a microgrid based on iterative double auction and blockchain[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2021, 27: 100524.
- [113] DAVATGARAN V, SANIEI M, MORTAZAVI S S. Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market[J]. *Energy*, 2018, 148: 482-493.
- [114] KLÆBOE G, ERIKSRUD A L, FLETEN S E. Benchmarking time series based forecasting models for electricity balancing market prices[J]. *Energy Systems*, 2015, 6(1): 43-61.
- [115] GUAN X H, HO Y C, LAI F. An ordinal optimization based bidding strategy for electric power suppliers in the daily energy market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001, 16(4): 788-797.
- [116] ZHANG Z Y, TANG H Y, HUANG Q, et al. Two-stages bidding strategies for residential microgrids based peer-to-peer energy trading[C]// 2019 IEEE/IAS 55th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Calgary, Canada: IEEE, 2019: 1-9.
- [117] 高 洁, 盛昭瀚. 演化博弈论及其在电力市场中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2003, 27(18): 18-21. GAO Jie, SHENG Zhaohan. Elementary groping for evolutionary game theory and its application in electricity market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(18): 18-21.
- [118] NASH J. Non-cooperative games[J]. *Annals of Mathematics*, 1951, 54(2): 286-295.
- [119] TUSHAR W, YUEN C, MOHSENIAN-RAD H, et al. Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading: the potential of game-theoretic approaches[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, 35(4): 90-111.
- [120] JIN X L, WU Q W, JIA H J. Local flexibility markets: literature review on concepts, models and clearing methods[J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114387.
- [121] PAUDEL A, CHAUDHARI K, LONG C, et al. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: a game-theoretic model[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8): 6087-6097.
- [122] WANG Y P, SAAD W, HAN Z, et al. A game-theoretic approach to energy trading in the smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(3): 1439-1450.
- [123] SU W C, HUANG A Q. A game theoretic framework for a next-generation retail electricity market with high penetration of distributed residential electricity suppliers[J]. *Applied Energy*, 2014, 119: 341-350.
- [124] MARZBAND M, JAVADI M, POURMOUSAVI S A, et al. An advanced retail electricity market for active distribution systems and home microgrid interoperability based on game theory[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 157: 187-199.
- [125] AMIN W, HUANG Qi, UMER K, et al. A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in islanded and grid-connected microgrid[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 123: 106307.
- [126] CHEN Y, MEI S W, ZHOU F Y, et al. An energy sharing game with generalized demand bidding: Model and properties[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2055-2066.
- [127] ZHANG R Q, CHENG X, YANG L Q. Energy management framework for electric vehicles in the smart grid: a three-party game[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(12): 93-101.
- [128] MAHARJAN S, ZHU Q Y, ZHANG Y, et al. Dependable demand response management in the smart grid: a Stackelberg game approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(1): 120-132.
- [129] LEE J, GUO J, CHOI J K, et al. Distributed energy trading in microgrids: a game-theoretic model and its equilibrium analysis[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(6): 3524-3533.
- [130] ZHOU W H, WU J, ZHONG W F, et al. Optimal and elastic energy trading for green microgrids: a two-layer game approach[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2019, 24(3): 950-961.
- [131] WEI F, JING Z X, WU P Z, et al. A stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems[J]. *Applied Energy*, 2017, 200: 315-329.
- [132] JIA L Y, TONG L. Dynamic pricing and distributed energy management for demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 1128-1136.
- [133] LIU H, LI J F, GE S Y, et al. Distributed day-ahead peer-to-peer trading for multi-microgrid systems in active distribution networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 66961-66976.
- [134] LIU N, YU X H, WANG C, et al. Energy sharing management for microgrids with PV prosumers: a stackelberg game approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017, 13(3): 1088-1098.
- [135] LONG C, ZHOU Y, WU J Z. A game theoretic approach for peer to peer energy trading[J]. *Energy Procedia*, 2019, 159: 454-459.
- [136] 崇志强, 陈培育, 李树青, 等. 基于合作博弈论的 P2P 电力交易方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2021, 33(12): 87-92, 100. CHONG Zhiqiang, CHEN Peiyu, LI Shuqing, et al. P2P energy trading method based on cooperative game theory[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 33(12): 87-92, 100.
- [137] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. Peer-to-peer energy trading with sustainable user participation: a game theoretic approach[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 62932-62943.
- [138] HAN L Y, MORSTYN T, MCCULLOCH M. Incentivizing prosumer coalitions with energy management using cooperative game theory[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 303-313.
- [139] LEE W, XIANG L, SCHOBBER R, et al. Direct electricity trading in smart grid: a coalitional game analysis[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(7): 1398-1411.
- [140] MA K, HU G Q, SPANOS C J. A cooperative demand response scheme using punishment mechanism and application to industrial refrigerated warehouses[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(6): 1520-1531.
- [141] ZHANG Z, LI R, LI F R. A novel peer-to-peer local electricity market for joint trading of energy and uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1205-1215.
- [142] 袁家海, 丁 伟, 胡兆光. 基于 Agent 的计算经济学及其在电力市场理论中的应用综述[J]. *电网技术*, 2005, 29(7): 47-51.

- YUAN Jiahai, DING Wei, HU Zhaoguang. A critical study of agent based computational economics and its application in research of electricity market theory[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(7): 47-51.
- [143] TEFATSION L. Agent-based computational economics: a constructive approach to economic theory[J]. *Handbook of Computational Economics*, 2006, 2: 831-880.
- [144] RINGLER P, KELES D, FICHTNER W. Agent-based modelling and simulation of smart electricity grids and markets—a literature review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 205-215.
- [145] MONROE J G, HANSEN P, SORELL M, et al. Agent-based model of a blockchain enabled peer-to-peer energy market: application for a neighborhood trial in Perth, Australia[J]. *Smart Cities*, 2020, 3(3): 1072-1099.
- [146] GUIMARÃES D V, GOUGH M B, SANTOS S F, et al. Agent-based modeling of peer-to-peer energy trading in a smart grid environment[C] // 2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). Bari, Italy: IEEE, 2021: 1-6.
- [147] 左坤雨, 刘友波, 向月, 等. 基于信息互动的分布式可再生能源多代理交易竞价模型[J]. *电网技术*, 2017, 41(8): 2477-2484.  
ZUO Kunyu, LIU Youbo, XIANG Yue, et al. Multi-agent transaction bidding model for distributed renewable energy based on information interaction[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(8): 2477-2484.
- [148] CHEN T Y, BU S R, LIU X, et al. Peer-to-peer energy trading and energy conversion in interconnected multi-energy microgrids using multi-agent deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(1): 715-727.
- [149] MEZQUITA Y, GAZAFROUDI A S, CORCHADO J M, et al. Multi-agent architecture for peer-to-peer electricity trading based on blockchain technology[C] // 2019 XXVII International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT). Sarajevo, Bosnia and Herzegovina: IEEE, 2019: 1-6.
- [150] CINTUGLU M H, MARTIN H, MOHAMMED O A. Real-time implementation of multiagent-based game theory reverse auction model for microgrid market operation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 1064-1072.
- [151] GOMES L, VALE Z A, CORCHADO J M. Multi-agent microgrid management system for single-board computers: a case study on peer-to-peer energy trading[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 64169-64183.



JIA Hongjie  
Ph.D., Professor

**贾宏杰**

1973—, 男, 博士, 教授  
主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、智能配用电、综合能源系统等  
E-mail: hjjia@tju.edu.cn



WANG Zibo  
Ph.D. candidate  
Corresponding author

**王梓博(通信作者)**

1991—, 男, 博士生  
主要研究方向为智能配用电、端对端能量交易等  
E-mail: wangzibo@tju.edu.cn

收稿日期 2022-06-13 修回日期 2022-07-06 编辑 程子丰