

This is an Open Access document downloaded from ORCA, Cardiff University's institutional repository: <https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/163412/>

This is the author's version of a work that was submitted to / accepted for publication.

Citation for final published version:

Yan, Mingyu, Wang, Lingling, Teng, Fei, Wen, Jinyu, Gan, Wei, Yao, Wei and Zhou, Yue 2023. Review and prospect of transactive energy market for distributed energy resources. *Automation of Electric Power Systems* 47 (18) 10.7500/AEPS20211222002

Publishers page: <https://doi.org/10.7500/AEPS20211222002>

Please note:

Changes made as a result of publishing processes such as copy-editing, formatting and page numbers may not be reflected in this version. For the definitive version of this publication, please refer to the published source. You are advised to consult the publisher's version if you wish to cite this paper.

This version is being made available in accordance with publisher policies. See <http://orca.cf.ac.uk/policies.html> for usage policies. Copyright and moral rights for publications made available in ORCA are retained by the copyright holders.



收稿日期: xxxx-xx-xx; 修改日期: xx-xx-xx。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金集成项目(U1866602)

Funding: This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1866602)

面向分布式能源的可交易能源市场研究综述与展望

晏鸣宇¹, 王玲玲², 滕飞¹, 文劲宇³, 甘伟⁴, 姚伟³, 周越⁴

(1. 电力与电子工程系, 帝国理工学院, 伦敦 南肯辛顿 SW7 2AZ;

2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240;

3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 华中科技大学, 湖北省武汉市 430074;

4. 工程学院, 卡迪夫大学, 卡迪夫 CF19 3AT;)

摘要: 可交易能源市场能够激励产消者进行能量交易, 通过调整实时电价以引导其平衡可再生能源出力的随机波动, 提高可再生能源消纳水平, 以保障我国“双碳”目标的实现。首先介绍了面向分布式能源的可交易能源市场的概念、特性与框架。全面分析了现有可交易能源市场交易机制与优缺点, 介绍了现有可交易能源市场的平台和示范项目。最后, 从市场实际运行角度出发, 简述了可交易能源市场现有的挑战并指出未来的发展方向。

关键词: 交易能源市场; 配网; 市场机制; 交易平台; 示范项目

0 引言

电力系统的清洁低碳转型对实现“双碳目标”有着重要的意义^[1]。提高可再生能源接入比例与系统运行效率, 是实现电力系统脱碳化的重要方法。

需求侧响应(Demand response, DR)和分布式能源(Distributed energy resource, DER)是实现上述目标的重要手段。需求侧响应使得传统的刚性负荷能动态调整, 以保证系统功率的实时平衡。

分布式能源(Distributed energy resource, DER), 如分布式可再生能源、电动汽车、分布式储能等, 能够实现能源的就地生产与消纳, 从而避免能源远距离传送, 减小能源传输造成的损耗。随着上述技术的引入, 传统的消费者演化为同时具有生产与消费能力的产消者(prosumer)。

产消者可以积极与电网互动, 以平衡可再生能源出力的随机波动, 提高可再生能源消纳水平。同时, 亦可以进一步挖掘用户侧的灵活性资源, 引导其参与电力系统灵活调节, 为电网的安全稳定与灵活运行提供有力支撑。然而, 产消者需要有合适的市场机制引导以参与到配网运行^[2]。可交易能源市场(Transactive energy market, TEM)是面对多分布式主体的新型配网零售市场, 是“一套通过经济手段和控制手段, 以价值为参数调节系统全局供需动态平衡的电力系统运行机制”^{[3]-[4]}。

可交易能源市场旨在配网形成扁平化的交易结构, 降低用户侧主体参与市场的壁垒, 使得“隔墙售电”^[5]成为可能。我国也出台了相关政策以指导可交易能源的发展。我国国家发改委和国家能源局于2022年3月发布《“十四五”现代能源体系规划》^[6], 其中明确提出要健全分布式发电市场化交易机制, 鼓励分布式光伏、风电等主体与周边用户直接交易, 激励就可再生能源就地消纳。

目前, 关于可交易能源市场已有一定的研究, 全面掌握分析现有的可交易能源市场研究有助于研究更高效实用的市场机制, 解决能源系统现有挑战, 并为可交易能源市场指出新的研究方向。本文首先系统介绍了可交易能源的概念与市场架构。接着, 详细阐述了基于拍卖和博弈论的可交易能源市场机制, 并对其优缺点进行分析。然后, 介绍了基于区块链技术的可交易能源市场平台, 并对现有可交易能源市场示范项目进行回顾。最后, 结合当前研究不足, 对未来可交易能源市场的发展方向进行展望。

1 可交易能源市场

1.1 基于互联微网的配网框架

产消者分布零散、容量较小, 需要聚合管理。针对不同的实际需求, 产消者涌现出了多种形式

的聚合体，如微电网(Microgrid, MG)^[7]，虚拟电厂^[8]、负荷聚集商^[9]等等。不同于虚拟电厂与负荷聚集商，微电网作为实体电力网络的管理者，能够在聚合地理位置相邻的产消者的同时保证电力网络安全^[10]。微网可将现场的产消者、分布式能源和传统的负荷互联，从而实现能源的本地平衡。同时亦可以通过公共耦合点与相邻的配电系统互联，实现与公共事业公司的能源交互。地理位置相近的微网可以相互联接构成互联微网 (Networked microgrids, NMG)^[11]，为配电网提供了新的运行模式。互联微网可有效实现对分散在不同地点产消者的聚合与协同，从而充分利用每个产消者可用资源^{[12]-[13]}。同时，互联微网框架的出现允许微网间交易能源，使得可交易能源市场成为可能。

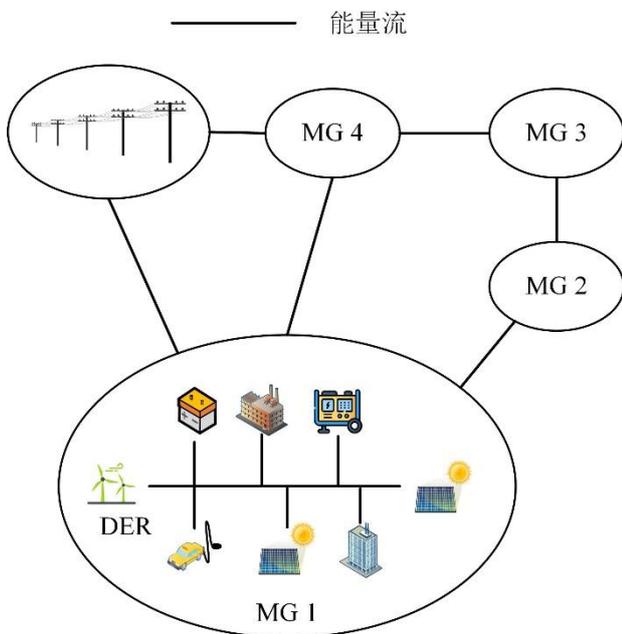


图1 基于互联微网的配网结构

Fig.1 Distribution network topology based on networked microgrids

1.2 可交易能源市场概念与架构

为了促进分布式能源的接入，目前配网零售市场在实际运行中执行分时电价 (Time-of-use, TOU) 和上网电价 (Feed-in-tariff, FiT) 机制。图2展示了现有配网市场的实际运行机制。在该机制下，市场成员可以与公共事业公司 (Utility company, UC) 交易电能。如果市场成员装有分布式能源，该成员可以将多余的电能卖给公共事业公司。市场成员向公共事业公司以实时电价买电，以上网电价向公共事业公司卖电。通常而言，上网电价远低于实时电价。以美国太平洋燃气电力公司 (Pacific Gas and Electric Company, PG&E) 为例，其上网电价约为 0.064 \$/kWh – 0.108 \$/kWh。

而实时电价约为 0.2 \$/kWh – 0.3 \$/kWh^[14]。在该市场机制下，用户侧可能会小规模投入分布式能源以减少其用电成本。但由于上网电价太低，用户侧卖电给公共事业公司将无利可图。因此用户侧不会大规模投入分布式能源。

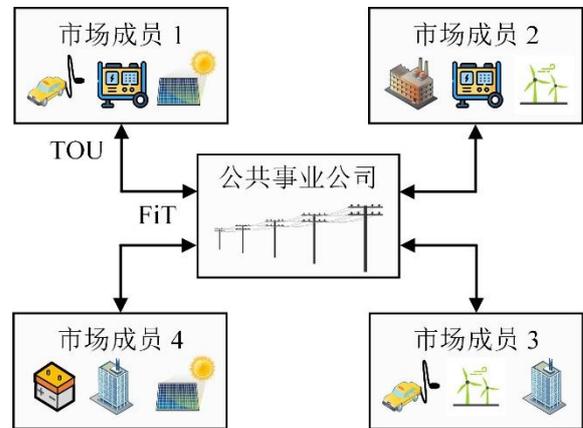


图2 基于上网电价的配网零售市场

Fig.2 Retail market in distribution network based on FiT

可交易能源市场旨在对现有的上网电价机制进行改进，打破公共事业公司垄断，让用户侧相互交易以保持能源实时平衡。市场成员可以直接交易，并以动态市场化的价格进行结算^[15]。由于实时供需关系不同，因此不同时段的市场结算价格不同。因此，在可交易能源市场中，结算的价格是动态化的。面向互联微网的可交易能源市场框架如图3所示。根据面向对象的不同，可交易能源市场可分为面向微网内部产消者的市场与面向互联微网的市场。具体而言，每个微网内部的产消者可以通过微网内部市场互相交易。同时，产消者可以聚合成微网的形式，与其他微网交易能源以进一步最大化其收益。

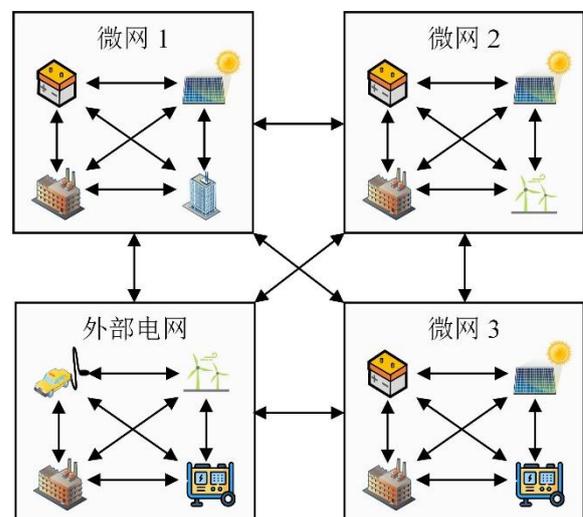


图3 面向互联微网的可交易能源市场

Fig.3 Transactive energy market for networked microgrids

1.3 可交易能源市场类型

图 4 展示了去中心化和中心化的可交易能源市场。去中心化的市场又称之为点对点能源交易 (Peer-to-peer energy trading, P2PET)。在该市场中, 市场成员之间直接交换信息并制定双边合同。而在中心化市场中, 市场成员依赖于第三方机构协调交易, 如配电系统运营商 (Distribution system operator, DSO) 或公共事业公司。可交易能源还引申出了很多其他概念, 比较著名的有能源共享 (Energy sharing, ES)。能源共享是指拥有闲置电能的一方有偿暂时让渡电能使用权给另一方, 利用闲置电能创造价值的运营模式。在常规能源交易中, 销售方 (如发电厂) 和购买方 (如用户) 一般有着明确的划分, 而在能量共享中, 参与者的市场角色可由市场出清内生决定而不必事先确定, 且可灵活转换^[16]。这些概念都属于可交易能源市场, 其市场架构和运行机制均属于上述的两种市场。

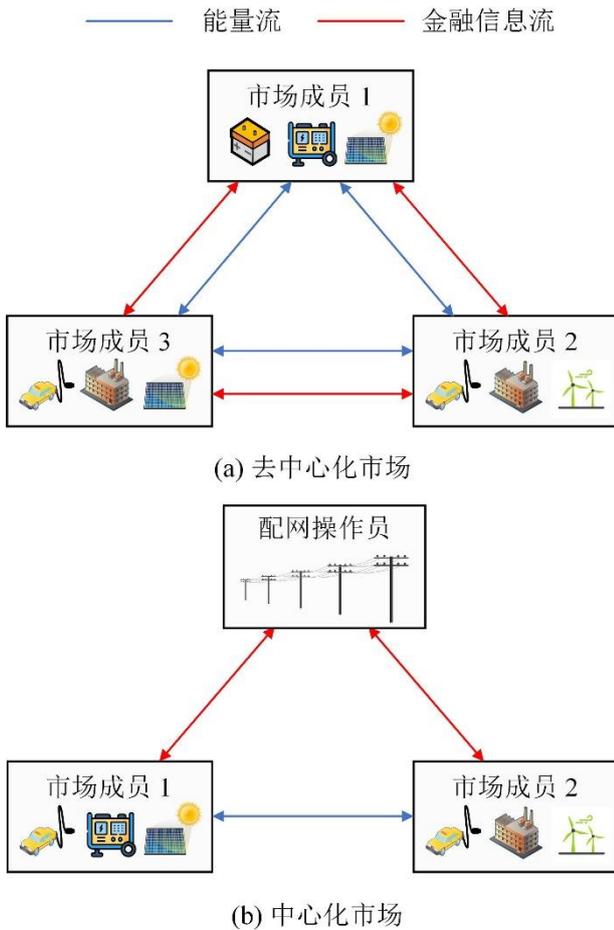


图 4 不同类型的可交易能源市场

Fig.4 Different types of transactive energy markets

2 可交易能源市场机制

可交易能源市场给配网零售市场带来了新的

运行模式, 需要新的市场机制以动态反映配网系统中能源价值、供需、竞争、风险关系等要素之间的联系。已有许多文献针对可交易能源市场机制开展研究。目前市场机制主要基于两种理论设计: 拍卖和博弈论。

2.1 拍卖

图 5 展示了一个典型的拍卖。在拍卖中, 市场参与者需要投标以参加市场竞价, 投标中通常包括了用户的成本/收益以及偏好等等。拍卖商或者第三方机构根据市场参与者投标出清市场。本节将绍不同拍卖在可交易能源市场中的应用。

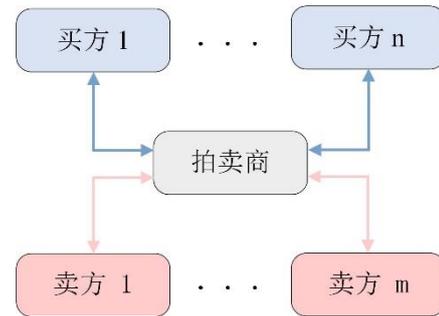


图 5 拍卖机制

Fig.5 Auction mechanism

2.1.1 单向拍卖

单向拍卖 (Single auction, SA), 也可称之为单边拍卖, 是最传统的拍卖模式。在单向拍卖中, 只有卖家需要投标以参与市场竞争, 而买家的需求必须得到满足。主网批发市场的出清机制就是典型的单向拍卖。文献[17]研究多微电网的可交易市场, 每个微网负责协调本地消费者并与其他微网进行能源交易。在该市场上, 只有卖方参与竞标, 而买方不参与竞标。

单边拍卖最大的缺陷就是假设买家能源需求是固定的。随着需求侧响应的引入, 买家的能源需求将随着市场价格动态调整。单边拍卖无法考虑该动态特性, 因此不适合在可交易能源市场中使用。

2.1.2 双向拍卖

双向拍卖 (Double auction, DA) 机制允许卖方和买方同时竞价。因此, 该机制能考虑需求侧响应, 让所有的成员都参与到市场中。图 6 给出了双向拍卖市场的出清机制。拍卖商汇总供给侧和需求侧竞标, 于供给曲线和需求曲线的交点得到市场的出清价格和电量。

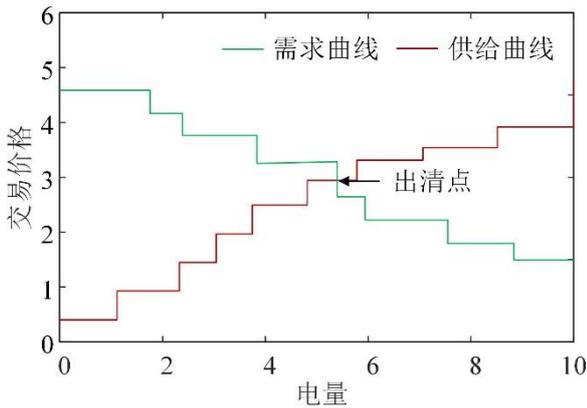


图 6 双向拍卖出清机制

Fig.6 Market clearing for double auction mechanism

文献[18]-[19]提出了针对产消者的双向拍卖，产消者可根据其新能源出力与需求侧响应计划并灵活竞价以最大化其收益。文献[20]进一步将双向拍卖用于多微网间的交易。文献[21]提出了针对电动汽车间交易的双向拍卖，电动汽车可根据其电荷水平与能量价格与其他电动汽车交易，从而缓解高峰期的负荷。文献[22]提出了双边拍卖的评估体系，分析了通信不确定性、物理网络、个体理性等实际条件对双边拍卖的影响。

2.1.3 配网节点边际电价

节点边际电价是主网批发市场中的重要出清方法。其本质上是一种考虑电力系统物理约束的拍卖。近年来，许多文献尝试将节点电价延伸至配网侧，通过计算配网节点边际电价（Distribution locational marginal price, DLMP）实现可交易能源市场出清。文献[23]研究了基于直流潮流的配网节点电价计算方法，但是配网中的电阻与电抗的比值较大，基于直流潮流的配网节点电价计算会引入显著误差^[24]。因此，一些学者尝试对交流潮流模型进行线性化，并给出对应的配网节点电价计算方法。文献[24]提出了一种新的线性化潮流方法，推导了配网节点电价的有功、无功和网损分量。文献[25]采用基于信赖域的求解方法，通过交流潮流模型的一阶近似来求解配网节点电价及其组成部分。文献[26]构建了基于二阶锥规划(Second-order cone programming, SOCP)的配网潮流出清模型，实现了对有功/无功资源的定价，从而激励配网内分布式能源参与阻塞管理和电压支撑。

2.1.4 分布式优化

由于风光等可再生能源固有的随机性和波动性，分布式可再生能源的大规模接入使得配电网面临的不确定性增加。在实际运行中，针对不同的可再生能源出力场景，可能需要多次运行最优交流潮流模型来保障系统的安全稳定运行并更新

DLMP。而传统的非线性交流潮流模型计算复杂度较高，无法在实时调度中应用。随着市场主体的增加，可以考虑引入分布式优化，在降低计算复杂度的同时计算 DLMP。

常用的分布式优化方法为基于增广拉格朗日分解的方法^[27]，包括交替方向乘法(Alternating direction method of multipliers, ADMM)^{[28]-[29]}、目标级联法^[30]和对偶分解法^[31]等。其中，ADMM 结合了对偶分解的可分解性和乘法法的优越收敛性，在电力系统优化问题中获得了较为广泛的应用。与对偶分解相比，ADMM 能够在较少的限制下收敛到最优解。文献[32]研究了配电网与多微网混合连接系统的分布式鲁棒经济调度问题。通过引入虚拟协调器构建“部件-子系统-主系统”3层结构，采用目标级联法进行分布式求解。文献[33]和[34]分别基于 ADMM 实现了电力系统和微电网群的分布式经济调度。这些分布式优化算法的本质是将耦合约束采用拉格朗日松弛解耦，将中心化的市场问题分解为多个子问题并行求解，其中拉格朗日乘子可以看作影子价格。除基于增广拉格朗日分解外，还有基于 Karush-Kuhn-Tucker 条件的分布式优化方法^[35]。

2.2 博弈论

博弈论可用来模拟和分析市场成员行为，能有效分析市场均衡，并辅助研究人员建立市场机制。博弈论可分为非合作博弈、合作博弈、主从博弈等等。本节将介绍博弈论以及基于博弈论建立的市场机制。

2.2.1 非合作博弈

非合作博弈（Noncooperative game, NCG）关注市场成员的竞争行为。假设每个市场成员都是理性的，会与其他成员竞争以最大化自身收益。非合作博弈中最重要的是纳什均衡（Nash equilibrium, NE）。纳什均衡代表一种策略组合，即如果所有市场成员都选择该策略组合中的策略，没有市场成员可以通过更改其策略获得更大收益。如果纳什均衡存在并且唯一的，市场成员的最优策略就是纳什均衡。

文献[27]将非合作博弈用于具有储能的产消者，并证明了纳什均衡的存在。为了保护产消者的隐私，文献[37]-[38]提出了分布式算法以达到纳什均衡。文献[39]设计一种基于贡献值的多产消者能源交易方法。上述文献通过非合作博弈来模拟买方之间的竞争行为，但未考虑配电网约束。由于市场成员间的交易行为受到物理网络限制，因此市场成员的行为是耦合的。为了解决这一问题，

文献[40]利用广义纳什均衡 (Generalized Nash equilibrium, GNE) 寻找电力网络约束下市场成员的最优策略。然而现有的文献对电力网络约束假设较为简单 (如忽略电压约束、相角约束等)。如何针对实际中复杂的电力网络模型, 构建合适的广义纳什均衡仍然有待研究。

2.2.2 合作博弈

合作博弈 (Cooperative game, CG) 关注市场参与人员的合作行为, 而非竞争行为。合作博弈本质上是收益分配问题, 即用户由竞争转向合作, 分配合作带来的收益。合作博弈通常可分为联盟博弈 (Canonical coalition game, CCG) 和联盟形成博弈 (Coalition formulation game, CFG)。前者假设所有市场成员均会合作, 形成一个大联盟 (Grand coalition, GC)。其研究重点为大联盟是否稳定, 以及如何将大联盟的收益值分配给所有市场成员。后者则重点研究联盟是如何形成的以及联盟结构的属性。

文献[41]-[42]将联盟博弈用于微网间的合作, 并采用纳什议价 (Nash bargaining, NB) 分配市场成员共同创造的合作剩余。在文献[42]的基础上, 文献[43]-[44]考虑了微网间的联络线约束。然而, 纳什议价的分配方案无法保证大联盟的稳定性。即与参与大联盟相比, 市场成员在参与其他联盟时可能会获得更高的收益, 因而不愿意加入大联盟。核仁 (Nucleolus) 和沙普利值 (Shapley value, SV) 是经典合作博弈理论最著名的两种分配方案。沙普利值是基于市场成员边际贡献的分配方案, 该方法与纳什议价有着相同的缺点。核仁则是基于核 (Core) 的分配方案, 能够保证市场成员只有在参与大联盟时才能获得最大收益。文献[45]-[46]研究了微网内部产消者的合作行为, 并采用核仁和沙普利值分配大联盟收益。结果表明, 只要分时电价大于上网电价, 大联盟总是稳定的。核仁和夏普利值需要枚举计算所有潜在联盟的收益值来分配收益。如此高的计算复杂度使得该方案几乎不可能应用在实际中。文献[47]-[48]提出了低计算复杂度的分配方案计算方法。这些计算方法能够保证分配方案属于核的同时无需枚举所有潜在联盟。文献[49]利用联盟形成博弈论, 对微网交互以及不同形式的联盟组成进行了研究。经典合作博弈由于其理论限制, 无法考虑物理网络约束下的市场成员行为间的耦合性。具有外部性的合作博弈 (Cooperative game with externalities, CGE) 可以有效考虑该耦合性。文献[50]采用具有外部性的合作博弈理论研究配电网约束下微网间的交易, 并提出了对应的分配方案。

2.2.3 主从博弈 (斯塔克尔伯格博弈)

主从博弈, 又称之为斯塔克尔伯格博弈 (Stackelberg game, SG), 是一种特殊的博弈模型。在该模型中, 市场成员被分为两类, 领导者和跟随者。图 7 展示斯塔克尔伯格博弈的流程。在该博弈模型中, 领导者先行动, 决定其最优策略并告知跟随者。跟随者根据领导者的最优策略做出最优响应, 并回复给领导者。根据领导者和跟随者数量的不同, 斯塔克尔伯格博弈可分为单领导者-多跟随者斯塔克尔伯格博弈 (Single-leader multi-follower Stackelberg game, SLMF Stackelberg game) 和多领导者-多跟随者斯塔克尔伯格博弈 (Multi-leader multi-follower Stackelberg game, MLMF Stackelberg game) 等。多领导者之间和多跟随者之间可以是竞争行为也可以是合作行为。与非合作博弈类似, 斯塔克尔伯格博弈存在斯塔克尔伯格均衡 (Stackelberg equilibrium, SE)。如果所有领导者和跟随者都选择了该均衡内的策略, 没有领导者和追随者可以通过改变现有策略单方面获益。

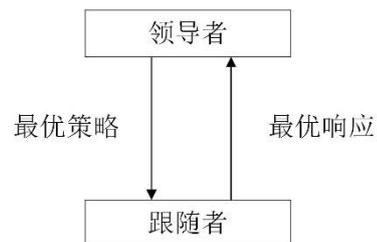


图 7 斯塔克尔伯格博弈流程

Fig.7 Process of Stackelberg game

在可交易能源市场中, 市场成员可分为买方和卖方。通常, 卖方作为领导者, 向买方提供能源价格与能量。而买方作为跟随者, 根据其能源价格制定自身能源需求, 并将该需求返回给卖方。由于市场成员数量较多, 因此通常采用 MLMF Stackelberg game 对可交易能源市场中的市场成员进行建模。文献[51]提出了多微网的斯塔克尔伯格博弈, 并证明了 SE 的存在。然而, 该模型假设微网内部只包括分布式新能源并且未考虑分布式新能源的物理约束 (如机组容量等)。文献[52]-[53]进一步考虑了分布式新能源的物理约束。上述文献需要市场成员提供所有信息来达到 SE。然而在实际中, 用户出于隐私考虑, 往往不愿意提交所有信息。文献[54]提出了 SE 的分布式计算方法以保护用户隐私。文献[55]进一步在微网中考虑了分布式新能源与小型燃气轮机组。首先, 上述文献未考虑分布式能源的异构性。比如分布式新能源没有燃料费用而小型燃气轮机则具有二次发电成

本曲线。此外，已有模型往往假设买方与卖方是异构性市场成员，具有不同形式的目标函数和约束。这种假设是非常不合理的，因为市场参与者买卖角色是根据当前价格、机组出力和负荷决定的，可以随时转换。因此买方卖方应当是同构性的，应该具有相同形式的约束与目标函数。文献[56]提出的斯塔克尔伯格博弈解决了上述问题。然而，该文章仅仅考虑了燃气轮机和分布式新能源两种分布式能源。配网中还存在其他异构性的分布式能源如储能等等。综合考虑所有异构性分布式能源的斯塔克尔伯格博弈模型还有待研究。

2.3 不同市场机制对比

本小节介绍了不同种类的可交易能源市场机制。不同机制有各自的优缺点。拍卖是目前最成熟有效的市场机制基于拍卖的可交易能源市场需要第三方协助出清市场，因此是中心化的市场。该方法能在出清市场的同时保证配网网络安全，并且其出清价格能考虑网络堵塞、电压越限等一系列成本，具有明确的物理意义。然而，该机制需要市场参与者频繁地参与竞标过程。配网中大规模的市场参与者竞标会导致不容忽略的交易成本。另一方面，参与者需要对市场价格、机制等有着清晰的了解。而配网中的市场成员容量较小，盈利有限，缺乏主动学习竞标的意愿。从而阻碍了市场成员参与竞标的积极性。此外，拍卖机制需要引入第三方进行市场出清，这可能会导致隐私保护等问题。

基于合作博弈的市场能避免市场参与者频繁参与竞标。该方法根据参与者的贡献合理给每个市场成员分配收益值。该方法能有效激励市场成员相互合作以实现社会福利的最大化。然而，基于合作博弈的市场同样是中心化的市场，需要第三方辅助市场出清，这可能会导致隐私等问题。同时，基于合作博弈的市场机制通常计算复杂度极高，难以面向海量分布式能源。尽管有许多研究尝试去降低计算复杂度，也取得一定成果，但仍然不能满足实际中的计算需求。此外，如何在合作博弈中考虑配网网络仍然面临较大挑战。市场参与者经由配网连接，彼此行为耦合。而经典合作博弈理论无法模拟参与者行为间的耦合特性，需要合作博弈理论进一步完善。

与上述两种方法不同，基于非合作博弈和主从博弈设计的市场可以实现去中心化，是点对点可交易能源市场。该方法能容许参与者彼此之间交互，能有效保护参与者隐私。然而，该市场难以考虑配网网络约束。一方面是因为市场参与者

缺乏网络相关信息，无法衡量其交易行为对配网影响。另一方面是因为网络数学模型过于复杂，很难分析网络约束下的广义纳什均衡和斯塔克尔伯格均衡，从而建立合理的市场机制。此外，该方法同样需要市场参与者频繁互动以实现市场出清，这会增加用户的交易成本。

3 可交易能源市场平台

可交易能源市场能允许分布式主体积极互动，因而需要新的平台以支持分布式主体交易。区块链技术能为分布式主体构建可行的交易环境，得到了广泛的关注。目前可交易能源市场平台也大多基于区块链技术搭建的。本节将对区块链技术和现有的可交易能源市场平台做简要的介绍。

3.1 区块链

由于加密货币的兴起，区块链技术也为人熟知。区块链是一种去中心化的，不可更改的，可共享的数字化账本。该账本可用于记录各种数据，如交易信息等等。通过采用链式存储结构与去中心化共识等技术，区块链中存储的数据是防篡改的。由于区块链不依赖第三方实现共识，因此该技术被广泛用于点对点交易中。图 8 展示了去中心化的数字账本。市场成员每人均有独立的账本，并采用彼此交互的共识机制对账本状态进行更新。

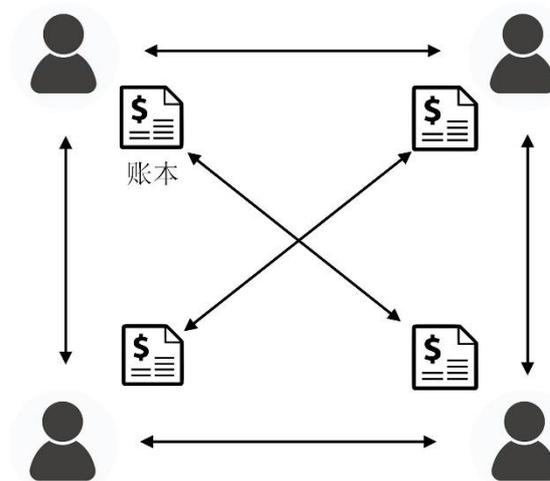


图 8 分布式账本示意图

Fig.8 Topology of distributed ledger

区块链可分为公有链(Public chain)，私有链(Private chain)和联盟链(Consortium chain)。公有链对所有人员开放，任何人都可以加入到公有链中的共识过程。私有链非公开的区块链，通常由中心机构建立和管理。该链仅开放给授权的节点，并且每个节点写入和读取数据的权限都被中心机构严格控制。联盟链介于公有链和私有链之间，由多个机构共同管理。每个机构可以管理一个或

多个节点，但是数据的读取写入只能由机构管理。总的来说，公有链区块链去中心化程度最高而私有链去中心化程度最低。通常而言，去中心化程度越高，共识机制更复杂，交易效率越低。智能合约则是区块链中的另一个概念。智能合约本质上是一种能够自动执行合约条款的计算机协议。智能合约的引入能有效提升系统运行效率与安全性，减少对第三方机构的依赖。目前关于区块链的平台主要包括以太坊（Ethereum）和超级账本（Hyperledger）。以太坊是一个可编程的公共区块链，并且带有名为以太（Ether）的本地加密货币。以太坊的结构跟比特币非常相似。除了能利用以太进行交易，以太坊还支持智能合约并且存储和更新智能合约。以太坊采用工作量证明（Proof of Work, PoW）作为共识机制。超级账本则是用来实现联盟链的平台。该平台采用实用拜占庭容错（Practical Byzantine Fault Tolerance, pBFT）作为共识机制。

基于区块链的点对点交易已经引起学术界的关注，文献[57]提出了将区块链用于电力系统点对点能源交易。文献[58]将区块链技术用于产消者间的交易，并提出一种高频验证机制以保证产消者之间交易安全结算。文献[21]、[59]提出了基于联盟链的点对点能源交易平台。文献[60]利用超级账本建立了可交易能源市场平台。该平台能适用于基于拍卖、点对点能源交易等多种机制的市场。文献[61]利用以太坊建立了点对点能源交易的市场平台。文献[62]-[63]在上述文献基础上，提出一种双层区块链框架以考虑电力系统物理网络约束。此外，工业界也开始广泛研发基于区块链的可交易能源市场平台。具体平台所示如下。

3.2 Power Ledger

Power Ledger 是面向点对点可交易能源市场的交易平台^[64]，支持市场参与者间的去中心化交易。该平台最早采用的是基于以太坊开放的区块链，并采用 PoW 作为共识机制。目前，该平台逐渐切换到自研的公共区块链中，并选用权益证明（Proof of Stake, PoS）作为共识机制以保证可拓展性。该平台能每秒处理超过 50000 笔交易，已经为澳大利亚的 11000 名参与者提供了服务。该平台提供了 POWR 的电子货币共交易使用。

3.3 TransActive Grid

TransActive Grid 是由 LO3 Energy 公司基于以太坊和智能合约开发的交易平台^[65]。该平台支持点对点能源交易与分布式能源的控制以实现电网功率平衡、需求响应等用途。该平台设计了由计算机和智能电表组成的 TransActive Grid 元素

（TransActive Grid element, TAG-e）。TAG-e 可测量能源生产和消耗，与网络中的其他 TAG-e 共享信息以交易能源。著名的 Brooklyn 微网可交易能源项目就采用该平台进行测试，测试规模包括 200 个家庭用户。TransActive Grid 能允许分布式能源直接进行交易，并利用区块链记录存储交易。

3.4 Electron

Electron 是面向天然气和电力计量和计费系统的平台^{[66]-[67]}，该平台能与现有的英国能源交易系统平台结合共同工作。该平台也采用的以太坊公有链，具有安全、透明、去中心化等特性。采用智能合约以提供计量、计费等服务。与 TransActive Grid 类似，该平台同样设计了软件和硬件（智能电表）。与现有平台不同，该平台加入了隐私保护功能。该平台利用加密技术对所有智能电表数据加密，以保证用户隐私。

4 可交易能源市场示范项目

可交易能源市场已引起了世界各国的广泛关注，不少国家基于上述的市场机制，建立了可交易能源的示范工程。本节对几个代表性的示范项目进行介绍。目前可交易能源项目均多采用拍卖作为市场机制，目的在于验证该市场机制能否激励用户侧主体参与交易以及可交易能源市场对现有电网的影响。

4.1 基于双向拍卖的示范项目

4.1.1 GridWise 项目

美国能源部于 2006-2007 年资助了 Olympic Peninsula GridWise 项目^[68]，这是美国关于可交易能源市场最早也是最著名的示范项目。该项目测试能否通过协同分布式能源和需求侧响应的灵活性，以推迟和减少输电设备的投资。GridWise 项目中的市场参与者包括 4 个大型城市水泵，2 个备用柴油发电机，以及能控制电水热等负荷的 112 个智能建筑等。该项目设计了能源管理系统以控制建筑的水热器、烘干机、空调等等。该能源管理系统具备双向通信能力使得建筑能与外界交互。

该项目采用双向拍卖作为市场机制。公用事业公司的电力供应价格为主网批发市场的价格。柴油发电机组基于实际运营产生的固定和可变成本进行投标。水泵基于旨在调节的水库水位进行投标。智能建筑则基于用户偏好进行投标。为了捕捉用户偏好，能源管理系统允许用户设置从最舒适（非价格响应）到最经济（高度价格响应）之间的范围，并基于该范围制定投标曲线。该实时市场每 5 分钟出清并进行结算。市场决定了能

源的清算价格并将其广播给市场参与者。

该项目综合研究了可交易能源市场的管理技术与市场机制从而提升配网资产的利用率。该项目作为美国可交易能源首个示范项目，提出了基于先进的信息通讯技术的可交易能源通信架构以实时聚合与管理不同类型的产消者。此外，该项目研究可交易能源市场定价机制以分析不同定价机制对市场参与者的激励性。

4.1.2 GridSMART 项目

由俄亥俄州美国电力公司资助的 GridSMART 示范项目关注于面向居民家庭的实时市场^[69]。该项目设计了能实时与电力市场交互的家庭智能软件以管理家用电力设备（如空调等），并用双向拍卖作为市场机制。具体而言，家庭智能软件能根据每个居民家庭的偏好，每 5 分钟为每个居民家庭制定投标曲线并提交给本地供电公司。本地的供电公司会根据所有家庭的投标出清市场，并将出清价格返回给每个居民家庭。

GridSMART 项目于 2013 年进行示范运行，涉及约 200 个居民家庭。结果表明，用户短期能源使用量与电价呈负相关。此外，该项目进行了多种实验，如暂时降低线路容量来测试居民用户对调峰条件的响应等。该项目侧重关注居民家庭行为以及可交易能源对电力系统影响，包括研究可交易能源市场能否缓解电网潮流越限并与系统容量紧张，用户对价格波动的敏感性。

4.1.3 Brooklyn 项目

Brooklyn 项目位于纽约市布鲁克林社区，面向该地区的三个互联的配电网。该项目起初面向 5 名产消者与 5 名邻近消费者进行测试。产消者可以通过基于以太坊的智能合约，将他们的剩余能源直接出售给他们的邻居。目前项目已经进入下一阶段的开发，市场参与人员规模扩大到 300 多家房屋和小型企业，包括约 50 家光伏生产者。

该项目设计了基于区块链的能量交易平台。首先通过专门设计的智能电表，将可出售的能源经由区块链平台转换为等效的能量代币。消费者向产消者购买能量代币以购买能源。该能源代币会自动转移到消费者的智能电表，并根据消费者使用能量扣除等价代币。该项目采用双向拍卖作为市场机制。其市场机制类似于股票市场的运作方式。市场成员可以不仅可以根据自己的价格偏好，还可以根据其环境或社会价值的标准来制定购买/出售能源计划。例如，消费者可以为可再生能源支付高价。该市场每 15 分钟出清并进行结算。Brooklyn 项目旨在探索消费者参与可交易能源市

场的潜力。该项目对市场参与者的个人偏好和社会行为进行详细的调查，并开发了基于区块链的计量交易系统。

4.1.4 Piclo 项目

Piclo 是英国于 2015 年推出的第一个可交易能源试点项目，该项目由由能源和气候变化部资助。Piclo 采用双向拍卖作为市场机制，每半个小时根据市场参与人员偏好匹配买卖双方，实现能量交易。与上述的示范项目的匹配机制不同，Piclo 在匹配中额外考虑了参与人员所在的地理位置，使得地理位置相近的市场参与者之间交互能源，从而降低了能源输送损耗。该示范项目的经验表明，如果在全英国推广可交易能源市场可带来数十亿英镑的社会福利提升。

4.2 基于分布式优化的示范项目

4.2.1 PNWSGD 项目

太平洋西北智能电网示范（Pacific Northwest Smart Grid Demonstration, PNWSGD）项目由太平洋西北国家实验室牵头举行，也是美国规模最大的可交易能源示范项目^[70]。该项目包括华盛顿大学与十余家公共事业公司，覆盖范围包括了爱达荷州、蒙大拿州、俄勒冈州、华盛顿州和怀俄明州。

该项目采用分布式优化方法作为市场出清机制。该项目将所有分布式资产（分布式能源与负荷等）划分为若干个区域，其中每个区域聚合分布式资产。相邻区域不断交互相关信息以实现市场出清。每个区域可以管理其内部的分布式资产以协同分布式资产的需求。

该测试项目面向 11 个公共事业公司，测试系统表明分布式资产可以在不同地域间聚合以实现域间协同动态响应。此外，该项目表明了可交易能源系统能显著降低系统峰值负荷。如果测试区域内 30% 的负载能参与到可交易能源市场中，则该区域的峰值负载可能会降低约 8%。

4.2.2 Couperus 项目

Couperus 项目位于荷兰海牙郊区的 Ypenburg^{[71]-[73]}。该项目面向一座超过 300 套公寓的 Couperus 公寓楼，其中每套公寓都配有单独的热泵。该热泵由电能驱动，可以灵活调节其热出力以更改其消耗的电能。Couperus 项目主要测试能否通过聚合该热泵以缓解附近风电场波动与缓解网络堵塞。由于风电预测误差的存在，风电的日前预测与实际出力存在并不一致。在欧洲市场中，这种差异会使风电场所有者收入减少。聚合热泵能有效平衡该差异，从而为风电场发电创造价值。

此外，热泵灵活性也用于本地配电网的堵塞管理。

具体而言，该项目设计了一个名为 Power-Matcher 的电子市场。每个热泵都由一个智能代理，该代理与电子市场积极互动。具体而言，用户设定一个温度值，该代理程序将公寓的内部温度控制在用户设定点附近。如果住户想要房间维持 24°C 的温度，那么其热泵会灵活调节其出力，将温度保持在 23.6 到 24.4°C 之间。该项目测试结果表明，聚合热泵能缓解 80% 以上的风电不平衡，并能有效缓解当地配网堵塞。

5 挑战与展望

现有的可交易能源市场机制与示范项目主要关注单一的电量交易，市场机制不够健全，无法充分量化分布式主体特性、配网网损等因素。此外，随着电力系统的不断发展，未来可交易能源市场一方面必须具备“电量交易+辅助服务”的多元化交易机制和体系，另一方面，市场机制要能协助实现电力系统中多能协同、低碳转型的目标。针对上述问题，本节分析可交易市场面临的挑战，指出可交易市场未来的发展方向，并给出了潜在解决思路。

5.1 计及非理性决策的市场机制难点与解决思路

不同于传统电力市场，可交易能源市场机制的核心是以用户为中心，用户必须具有自主控制能源生产消费、自由制定能源价格的权利。此外，市场需要保护用户信息隐私、降低用户参与壁垒、减少用户交易成本、激励用户参与市场。虽然已有很多关于可交易能源市场机制的研究，然而现有机制有各自的优缺点，无法综合实现上述目标。此外，现有的市场机制往往是基于假设市场成员的绝对理性，假设市场成员根据其期望收益进行决策，忽略了其心理预期等非理性因素。实际中，分布式能源往往由小型个人投资，因此市场成员多为小型个人，该主体难以像传统的大规模发电集团一样做出理性决策。例如，考虑一个具备两种选择的实验：A、赢 10 元；B、赢 20 元或者是 0 元，每种情况概率均为 0.5。由于人类决策的主观性，实验结果表明，大多数人选择选项 A，即使 AB 的期望收益一致。另一方面，分布式可再生能源存在随机性与波动性，导致可交易能源市场中的风险与不确定性增加，市场成员做出理性决策的难度加大。因此，可交易能源市场机制必须要考虑成员的潜在非理性决策，具备量化与规避风险与不确定性的能力。前景理论（Prospect theory, PT）能够量化个人的心理因素，因而可以

用于分析市场成员潜在非理性决策。

5.2 配网网络约束下的市场机制难点与解决思路

在电力市场中，市场成员的能源交易受限于实际电力网络约束（如线路容量约束，电压约束等）。如果能源交易行为不满足电力网络约束，该行为会严重威胁到配网系统的安全稳定运行。在中心化的可交易能源市场中，市场操作员拥有配网网络与市场成员报价等相关信息，因此很容易得到满足网络约束的市场出清方案。而在点对点市场中，市场成员不具有网络与其他成员交易行为的信息。如何在点对点市场中考虑网络安全约束成为研究难点。

双层模型的点对点交易市场^{[28][56][75]}可以有效解决上述问题。在下层模型中，市场参与者执行点对点交易，并将能源交易结果传递给上层模型。在上层模型中，配网操作员校验能源交易结果是否满足网络约束。如果不满足约束，配网操作员会将相关信息传递给下层的市场成员，并引导他们调整能源交易以满足网络约束。双层模型架构虽然明确配网操作员与市场参与者职能，该框架仍然存在许多缺点亟待解决。首先，双层模型需要上下层之间迭代以获取最优解，迭代的过程中需要多次求解复杂的电力系统优化问题。因此双层模型的计算复杂度较高，需要研究低复杂度的计算方法以提升求解速度^[74]。此外，双层模型中的上下层迭代机制仍然有待研究，尤其是迭代过程对下层市场的影响。不合理的迭代机制会严重影响下层市场的整体社会福利与个体收益。

5.3 过网费定价的难点与解决思路

可交易能源市场中，市场成员之间的能源交易会减少配网用户对公共事业公司的能源依赖。因此，公共事业公司的收入将显著下降，财务状况恶化。在此背景下，公共事业公司的商业模式将会从传统的“卖电”转向为提供“网络服务”。具体而言，由于市场成员依赖公共事业公司的网络进行能源交易，因此公共事业公司将会对市场成员收取过网费以弥补其财政收入。过网费定价机制与政策监管尤为重要。一方面，过高的过网费可能会阻碍市场成员的能源交易；另一方面，过低的配网费会恶化公共事业公司的财务状况，刺激公共事业公司降低日常的运维成本，从而降低配网设备的可靠性。此外，出于隐私考虑，市场成员往往不愿意将制定的双边金融合同上报给公共事业公司，这对公共事业公司制定配网费带来了挑战。

过网费的本质是公共事业公司将配网线路的规划、建设和运营成本分摊给市场成员。现有过

网费的制定主要有两种思路：一种是采用类似主网金融输电权的概念，把金融输电权费用作为过网费收取^[75]。另一种则是根据分布式主体的电气距离制定配网费^{[76]-[78]}。此外，博弈论可以将网络费用合理的分摊给每一个市场参与人员，为制定过网费提供了全新的思路。总的来说，过网费的研究仍处于初步阶段，不同过网费对市场均衡的影响仍有待研究。

5.4 配网网损分摊难点与解决思路

配网中的能源传输会有较大的损耗。在可交易能源市场中，市场成员的频繁交易会增大配网线路潮流，进一步导致网损上升。在主网批发市场中，网损结算是与能源结算分开执行的。主网市场先执行能源市场出清，随后根据能源市场出清结果结算网损。现有的研究是将类似的框架应用于可交易能源市场中，先利用现货市场出清能源，再利用图论等方法结算网损^[79]。值得注意的是，不同于主网，配网市场中的成员同时具备生产与消费能力，因此成员可以灵活制定不同的金融合同以规避网损费用，实现恶意骗补。因此主网的网损分摊方案并不能直接应用到配网中，需要针对该情况制定新的网损分摊方案^[80]。

另一种思路则是能源-网损协同出清。参与者在交易时不仅要考虑能源费用，也要考虑到潜在的网损费用。能源-网损协同的出清市场机制能让市场成员主动寻找相邻的成员进行交易，从而有效降低网损^[28]。目前能源-网损协同的出清机制较少，尤其是出清方案合理性与模型精确度仍有待研究。

5.5 主-配协同市场机制难点与解决思路

在传统的主-配市场中，配网中的负荷为刚性负荷。公共事业公司只需要预测配网负荷后并将其提交给主网系统操作员。主网市场操作员会基于该预测值出清市场以保证功率平衡。可交易能源市场的引入提升了整个主-配市场的复杂性。图9展示了分布式能源接入下的主-配市场。分布式能源的引入使得配网可以向主网反向输出功率，因此分布式能源的行为将会对主网市场产生影响^[81]。如果主网市场提供的节点电价较低，配网市场成员更愿意向主网购电。反之，如果主网市场提供的节点电价较高，配网市场成员更愿意通过自身的分布式能源进行供电甚至向主网卖电。由此可知，主-配协同定价机制能够降低线路阻塞，提升系统运行效率，最大化社会福利。

现有主-配市场协同的思路可分为两类。第一类是主网系统操作员（transmission system operator）

直接控制配网内的所有负荷和分布式能源，配网公共事业公司只向主网操作员提供配网实时数据与维护配网运行^{[82]-[83]}。该方案优势在于只需要一个中心机构就能完成主配网协同出清。然而，该方案需要同时考虑主网和配网的约束，计算难度较大。此外，主网和配网往往由不同的机构管理。公共事业公司不愿意将数据交给主网。第二类则是主网配网市场分开运行。主网操作员管理主网市场而公共事业公司管理可交易能源市场。公共事业公司和主网操作员不断互动以协调主网和配网的出清价格^{[84]-[86]}。该市场架构较为符合实际，但是分层市场设计的复杂度较高，并要求主网操作员与公共事业公司不断求解市场出清问题以更新价格。总而言之，现在仍缺乏低复杂度的模型与算法以协同出清主-配市场的同时保证配网侧的隐私。尤其是当可交易能源市场以点对点机制运行时，配网市场成员间、主配市场间均需要迭代出清，使得整体市场出清变的更加复杂。

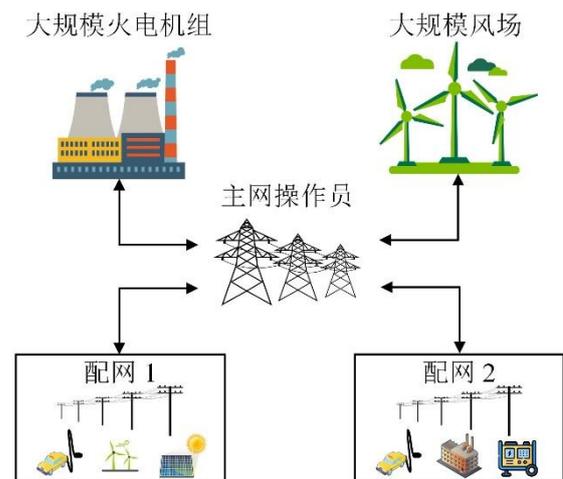


图9 主-配协同市场

Fig.9 Coordinated transmission and distribution markets

5.6 辅助服务市场机制难点与解决思路

不同于传统主网大规模发电机组，分布式能源大部分经由逆变器并网，因此具有响应速度快、灵活可控等特性。高度电力电子化的用户主体能实时响应，提升了电力系统实时操作灵活性。在可交易能源市场中构建辅助服务市场（如备用市场、频率支撑、电压调节等），能充分调动用户主体的灵活性，为主网的安全稳定与灵活运行提供有力支撑。以备用市场为例，用户侧主体同时参加能量和备用市场可以增加系统备用，提升可再生能源消纳能力^{[87]-[88]}。

目前有关可交易辅助服务市场多关注于备用市场，对其他服务市场研究较少。而用户侧的灵活性恰恰是其他辅助服务市场欠缺的。因而有必

要对其他辅助服务市场开展研究，充分挖掘用户侧灵活性。此外，大多数辅助服务要求用户侧主体能够实时响应。由于用户侧主体容量较小，需要聚合以有效提供辅助服务。聚合模式下需要引入聚合主体辅助通讯控制等，这会增加通讯时延，导致用户侧主体无法及时参与辅助服务。有效的分散式控制方法和高效通讯模式以提供实时辅助服务仍有待研究。此外，高度电力电子化的分布式能源并网参与辅助服务市场会导致服务市场呈现高度异构化，需要新的控制算法以协同控制异构性主体以提供辅助服务。

5.7 多能协同市场机制难点与解决思路

能源转换与存储装置（如热电联产机组，电锅炉等）的大规模投入提升了配网中的不同能源系统（如电、气、热等系统）耦合性与能源利用率。在此背景下，传统的微电网将会演变为多能源微网。多能源微网能通过其内部的能源转换与存储装置，转换不同形式的能源以保证本地能源供应^{[89]-[90]}。图 10 展示了面向多能微网的可交易市场。多能源微网能互相交换电、热等不同类型的能源，从而充分利用不同能源系统特性以提升能源系统的灵活性与运行效率，从而使得能源系统的整体社会福利上升^[91]。面向能源微网的可交易市场能充分利用多能源微网的灵活性，以实现高比例分布式新能源的消纳。

由于多能源微网能同时交易电、热等不同形式能源，因此其出清机制需要考虑不同能源的耦合性。现有的可交易市场机制，如拍卖^[92]，分布式优化^{[93]-[94]}，博弈论^{[95]-[96]}等也可以用多能源系统。然而，不同能源系统具有不同的动态特性，现有的市场出清机制无法量化该动态特性。

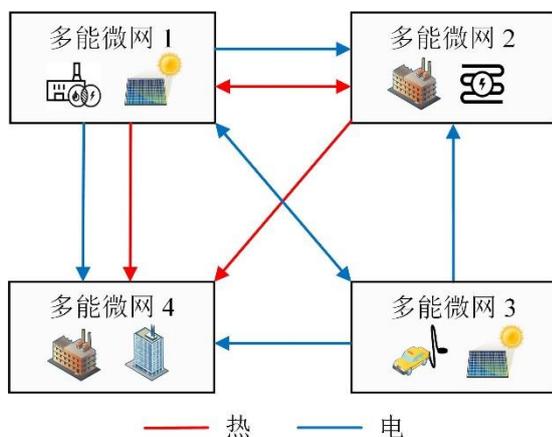


图 10 多能微网间的能源交易

Fig.10 Energy trading among energy hubs

5.8 电碳协同市场机制难点与解决思路

碳市场通过对碳排放收取费用，能有效控制

碳排放，从而实现低碳发展。电-碳协同市场能够有效激励电力系统中可再生能源的投入，实现电力系统的脱碳化。目前电力系统碳排放主要来源于主网发电机组，因此电-碳市场的研究主要集中在主网批发市场。随着分布式化石能源（如分布式天然气）接入比例的不断提高，未来电力系统将呈现主配协同发电的新形态。碳市场也会随之下沉至配网零售市场。面向分布式能源接入的电-碳协同的可交易能源零售市场，能够进一步刺激分布式新能源的投资与利用，从而加速电力系统脱碳化过程，助力我国“碳中和”目标的实现。

根据面向对象不同，碳市场可分为碳税与碳权市场^[97]。碳税主要是面对消费者，从消费侧针对碳排放收取额外费用^{[98]-[99]}。而碳权市场主要面向生产者，生产者必须需要购买足够的碳权才能从事具有碳排放的生产活动^{[100]-[101]}。碳权市场和碳税是面向传统单一的生产者和消费者。一方面，配网辐射状的架构与产消者特殊的属性结合可能会导致复杂的电-碳耦合机理与碳足迹追踪^[50]。另一方面，碳权市场和碳税是面向传统单一的生产者和消费者；在面向产消者的背景下，这些碳市场机制的碳减排激励性还有待分析与验证。

5.9 基于云边协同计算的市场难点与解决思路

在可交易能源市场的背景下，大规模的分布式能源将会积极参与到市场中。会带来极大的通讯和计算负担，严重影响到实际市场的正常运行^[102]。此外，电力市场中一些辅助服务（如调频服务等）需要分布式能源能够实时响应。传统的中心化管理框架无法满足该时间尺度要求。边缘计算能够将中心化的云计算和通讯任务卸载至多个分布式的边缘计算中心，从而降低计算和通讯负担。此外，边缘计算中心在地理位置上会更靠近用户侧，能够以低时延的方式提供计算服务。因此，边缘计算为面向大规模分布式能源的点对点可交易能源市场提供了有效的解决方案。然而边缘计算通常只能保证本地解决方案的最优性，即局部最优，无法协同所有分布式边缘计算中心实现全局最优解。云-边协同的计算框架能有效协同管理不同边缘计算中心，从而提供给用户低时延服务的同时保证计算结果的全局最优性。图 11 给出了云-边协同的管理框架。其中边缘服务器管理现场的产消者，产消者只与边缘服务器通信。而云服务器则协同各边缘服务器。能量则在所有产消者之间流动以最大化系统整体收益。

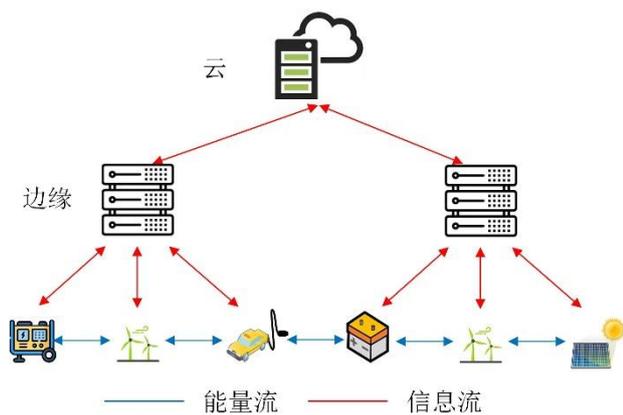


图 11 云-边缘协同框架

Fig.11 Framework for coordinated cloud-edge

不同于传统的电力系统分层式管理框架，云-边协同是面向电力、通讯、数据等学科的综合研究。基站同时具备计算与通信能力，被认为是未来可以在电力系统部署的边缘计算中心^[104]。通过复用通信公司的基站，配网部署边缘计算设备的成本得到极大的降低。基于云-边协同框架的可交易能源市场研究目前仍处于初步阶段。在此背景下，分布式能源的聚合^[105]，基站通信与分布式能源管理的协同均亟待解决。

5.10 基于数据驱动的市场机制难点与解决思路

现有可交易能源市场机制是基于物理模型。而可交易能源市场中有大量的市场成员，从而极大地增加物理模型的复杂度，限制市场在实际中的应用。此外，现有市场往往需要市场成员能够准备地洞悉市场动态，以实现最优竞标和自身收益最大化。而这会给小规模的生产者造成巨大的学习成本。配网运行中存在海量的历史运行数据，充分利用历史数据并建立数据驱动（data-driven）的可交易能源市场机制，能显著降低传统市场机制的复杂性，为可交易能源市场的实际运行铺平道路。

强化学习(Reinforcement learning, RL)是一种不基于物理模型的协调方法，能允许市场成员不依赖物理模型，从与外界环境的不断交互中学习以实现最优策略^[106]。市场参与者可以通过强化学习，以试探竞标其竞标对市场出清结果影响，以实现最优竞标^[107]。公共事业公司可以利用强化学习分析市场成员的潜在交易行为^[108]，并建立对应的市场机制^[109]。基于强化学习的市场机制不需要求解物理模型，仅根据实时数据即可获得最优策略。因此该方法具有高度可拓展性。然而，强化学习无法精准考虑电力系统物理约束，其得到的市场出清方案有可能无法满足电力系统运行约束。数据-物理协同的强化学习方法能有效解决上述问

题。

4 结语

可交易能源市场能够激励配网用户侧进行能量交易，通过调整实时电价以引导其平衡可再生能源出力的随机波动，提高可再生能源消纳水平。首先介绍了面向分布式能源的可交易能源市场的概念、特性与框架。全面分析了现有可交易能源市场机制与优缺点，介绍了现有的可交易能源市场平台与示范项目。最后，从市场实际运行角度出发，简述了可交易能源市场未来的研究与发展方向。希望本文能够为面向分布式能源的可交易能源市场的研究提供参考。

参考文献

- [1] 丁剑, 方晓松, 宋云亭, 等. 碳中和背景下西部新能源传输的电氢综合能源网构想[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 1-9.
Ding Jian, Fang Xiaosong, Song Yunting, et al. Conception of electricity and hydrogen integrated energy network for renewable energy transmission in western China under background of carbon neutralization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 1-9.
- [2] 林俐, 许冰倩, 王皓怀. 典型分布式发电市场化交易机制分析与建议 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (4): 1-8.
LIN Li, XU Bingqian, WANG Haohuai. Analysis and recommendations of typical market-based distributed generation trading mechanisms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (4): 1-8.
- [3] 陈启鑫, 王克道, 陈思捷, 等. 面向分布式主体的可交易能源系统:体系架构、机制设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 1-7.
Chen Qixin, Wang Kedao, Chen Sijie, et al. Transactive energy system for distributed agents: architecture mechanism design and key technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 1-7.
- [4] The GridWise Architecture Council. GridWise transactive energy framework version 1.0 [EB/OL]. [2021-12-18]. http://www.gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf
- [5] 唐家俊, 张智, 杨莉, 等. 考虑地域优势及合作成本的增量配电公司联盟策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 84-92.
TANG Jiajun, ZHANG Zhi, YANG Li, et al. Alliance strategy for incremental distribution and retail companies considering geographical advantage and cooperation cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 84-92.
- [6] 国家发展改革委, 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划. 国家发展改革委, 国家能源局, 2022.
- [7] 闫林芳, 刘巨, 石梦璇, 等. 基于模糊逻辑算法的直流微电网复合储能系统功率自适应分配策略[J]. 中国电机

- 工程学报, 2019, 39(9): 2658-2670.
Yan Linfang, Ju Liu, Shi Mengxuan, et al. Adaptive power allocation strategy based on fuzzy logic algorithm for hybrid energy storage system in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2658-2670.
- [8] 李翔宇, 赵冬梅. 计及可调资源动态特性的虚拟电厂多级优化配置[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 17-24.
Li Xiangyu, Zhao Dongmei. Multi-level optimal configuration of virtual power plant considering dynamic characteristics of adjustable resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 17-24.
- [9] 李博嵩, 王旭, 蒋传文, 等. 广泛负荷聚集商市场策略建模及风险效益分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 119-126.
Li Bosong, Wang Xu, Jiang Chuanwen, et al. Market Strategy Modeling and Risk Profit Analysis of Demand-side Resource Aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 119-126.
- [10] 吴界辰, 艾欣. 交互能源机制下的电力产消者优化运行[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19):1-18.
WU Jiechen, AI Xin. Optimal operation of prosumers based on transactive energy mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19):1-18.
- [11] 沈俭荣, 文云峰, 郭创新, 等. 基于产消方式的互联微网协同自治运行策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 40-47.
SHEN Jianrong, WEN Yunfeng, GUO Chuangxin, et al. Prosumer-based Autonomous-synergetic operation strategy for interconnected microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 40-47.
- [12] LI Z, SHAHIDEHPOUR M, LIU X. Cyber-secure decentralized energy management for IoT-enabled active distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(5): 900-917.
- [13] TEIMOURZADEH S, TOR O B, CEBECI M E, et al. A three-stage approach for resilience-constrained scheduling of networked microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(4): 705-715.
- [14] LIU Y, WU L, LI J. Peer-to-peer (P2P) electricity trading in distribution systems of the future[J]. The Electricity Journal, 2019, 32(4): 2-6.
- [15] LI Z, BAHRAMIRAD S, PAASO A, et al. Blockchain for decentralized transactive energy management system in networked microgrids[J]. The Electricity Journal, 2019, 32(4): 58-72.
- [16] 陈玥, 刘锋, 魏韡, 等. 需求侧能量共享: 概念、机制与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2):1-11.
CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy Sharing at Demand Side: Concept, Mechanism and Prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2):1-11.
- [17] SHAMSI P, XIE H, LONGE A, et al. Economic dispatch for an agent-based community microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(5): 2317-2324.
- [18] LIU Weijia, QI Donglian, WEN Fushuan. Intraday residential demand response scheme based on peer-to-peer energy trading[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 16(3): 1823-1835.
- [19] CHEN Kaixuan, LIN Jin, SONG Yonghua. Trading strategy optimization for a prosumer in continuous double auction-based peer-to-peer market: A prediction-integration model[J]. Applied energy, 2019, 242: 1121-1133.
- [20] NUNNA H K, SRINIVASAN D. Multiagent-based transactive energy framework for distribution systems with smart microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2241-2250.
- [21] KANG Jiawen, YU Rong, HUANG Xumin, 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.
- [22] LIAN Jianming, REN Huiying, SUN Yannan, et al. Performance evaluation for transactive energy systems using double-auction market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(5): 4128-4137.
- [23] HUANG S, WU Q, OREN S S, et al. Distribution locational marginal pricing through quadratic programming for congestion management in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power System, 2015, 30(4): 2170-2178.
- [24] YUAN Haoyu, LI Fangxing, WEI Yanli, et al. Novel linearized power flow and linearized OPF models for active distribution networks with application in distribution LMP[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 438-448.
- [25] HANIF S, ZHANG K, HACKL C M, et al. Decomposition and equilibrium achieving distribution locational marginal prices using trust-region method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3269-3281.
- [26] BAI L, WANG J, WANG C, et al. Distribution locational marginal pricing (DLMP) for congestion management and voltage support[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4061-4073.
- [27] Molzahn D K, Dorfler F, Sandberg H, et al. A survey of distributed optimization and control algorithms for electric power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2941-2962.
- [28] MHANNA S, VERBIC G, and CHAPMAN A C. Adaptive ADMM for distributed AC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2025-2035.
- [29] WANG Y, HUANG Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Reconfigurable distribution network for managing transactive energy in a multi-microgrid system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(2): 1286-1295.
- [30] 谢敏, 吉祥, 柯少佳, 等. 基于目标级联分析法的多微网主动配电系统自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4911-4921+5210.
XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target

- cascading theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4911-4921.
- [31] CONEJO A J, CASTILLIO E, MINGUEZ R, et al. Decomposition techniques in mathematical programming[M]. Berlin, Germany: Springer, 2006.
- [32] 周晓倩, 艾芊. 配电网与多微网联合分布式鲁棒经济调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 23-30.
ZHOU Xiaoqian, AI Qian. Combined distributed robust economic dispatch of distribution network and multiple microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 23-30.
- [33] 夏世威, 邹唯薇, 张茜, 等. 基于交替方向乘子法的电力系统分散式经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 100-106.
XIA Shiwei, ZOU Weiwei, ZHANG Qian, et al. Decentralized economic dispatch for power system based on alternating direction method of multipliers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 100-106.
- [34] 王皓, 艾芊, 吴俊宏, 等. 基于交替方向乘子法的微电网群双层分布式调度方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1718-1727.
WANG Hao, AI Qian, WU Junhong, et al. Bi-level distributed optimization for microgrid clusters based on alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1718-1727.
- [35] NOCEDAL J and WRIGHT S, Numerical Optimization, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2000.
- [36] WANG Y, 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.
- [37] ATZENI I, ORDONEZ L G, SCUTARI G, et al. Demand-side management via distributed energy generation and storage optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 4(2): 866-876.
- [38] CHEN H, LI Y, LOUIE R H, et al. Autonomous demand side management based on energy consumption scheduling and instantaneous load billing: An aggregative game approach[J]. IEEE transactions on Smart Grid, 2014, 5(4), 1744-1754.
- [39] PARK S, LEE J, BAE S, et al. Contribution-based energy-trading mechanism in microgrids for future smart grid: A game theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4255-4265.
- [40] CHEN Y, WEI W, WANG H, et al. An energy sharing mechanism achieving the same flexibility as centralized dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, to be published.
- [41] 王剑晓, 钟海旺, 夏清, 等. 基于价值公平分配的电力市场竞争机制设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 7-17.
WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Competitive mechanism design in electricity market based on fair benefit allocation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 7-17.
- [42] WANG H, HUANG J. Incentivizing energy trading for interconnected microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(4): 2647-2657.
- [43] LI J, ZHANG C, XU Z, et al. Distributed transactive energy trading framework in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7215-7227.
- [44] KIM H, LEE J., BAHRAMI S, et al. Direct energy trading of microgrids in distribution energy market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(1): 639-651.
- [45] HAN L, MORSTYN T, McCulloch M. Incentivizing prosumer coalitions with energy management using cooperative game theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(1): 303-313.
- [46] FENG C, WEN F, YOU S, et al. Coalitional game-based transactive energy management in local energy communities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 35(3): 1729-1740.
- [47] LI J, YE Y, PAPADASKALOPOULOS D, et al. Computationally efficient pricing and benefit distribution mechanisms for incentivizing stable peer-to-peer energy trading[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(2): 734-749.
- [48] GAN Wei, YAN Mingyu, YAO Wei. Peer to peer transactive energy for multiple energy hub with the penetration of high-level renewable energy[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117027.
- [49] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. A coalition formation game framework for peer-to-peer energy trading[J]. Applied Energy, 2020, 261: 114436.
- [50] YAN Mingyu, SHAHIDEHPOUR Mohammad, ALABDULWAHAB Ahmed, et al. Blockchain for transacting energy and carbon allowance in networked Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4702-4714.
- [51] 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.
- [52] JADHAV A M, PATNE N R, GUERRERO J M. A novel approach to neighborhood fair energy trading in a distribution network of multiple microgrid clusters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 1520-1531.
- [53] JADHAV A M, PATNE N R. Priority-based energy scheduling in a smart distributed network with multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 3134-3143.
- [54] LIU Nian, YU Xinghuo, WANG Cheng, 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.
- [55] ANOH K, MAHARJAN S, IKPEHAI A, et al. Energy peer-to-peer trading in virtual microgrids in smart grids: A game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(2): 1264-1275.
- [56] YAN Mingyu, SHAHIDEHPOUR Mohammad, PAASO Aleks, et al. Distribution network-constrained optimization of peer-to-peer transactive energy trading

- among multi-microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020, 12(2): 1033-1047.
- [57] DEVINE M T, CUFFE P. Blockchain electricity trading under demurrage[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 2323-2325.
- [58] 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, 34(5): 4097-4108.
- [59] LI Zhetao, KANG Jiawen, YU Rong, et al. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things[J]. *IEEE transactions on industrial informatics*, 2017, 14(8): 3690-3700.
- [60] WANG S, TAHA A F, WANG J, et al. Energy crowdsourcing and peer-to-peer energy trading in blockchain-enabled smart grids[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(8): 1612-1623.
- [61] 穆程刚, 丁涛, 董江彬, 等. 基于私有区块链的去中心化点对点多能源交易系统研制[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(03): 878-890.
MU Chenggang, DING Tao, DONG Jiangbin, et al. Development of decentralized peer-to-peer multi-energy trading system based on private blockchain technology[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(03): 878-890.
- [62] SHAHIDEHPOUR Mohammad, YAN Mingyu, SHIKHAR Pandey, et al. Blockchain for peer-to-peer transactive energy trading in networked microgrids: providing an effective and decentralized strategy[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2020, 8(4): 80-90.
- [63] 杨洪明, 阳泽峰, 漆敏, 等. 双链式区块链架构设计及其点对点交易优化决策实现[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 19-27.
YANG Hongming, YANG Zefeng, QI Min, et al. Design of double-chain blockchain architecture and its implementation of peer-to-peer transaction optimization decision[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(9): 19-27.
- [64] Powerledger Energy Projects [EB/OL]. [2022-03-02]. <https://www.powerledger.io/>.
- [65] MENGELKAMP E, GARTNER J, ROCK K, et al. Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 870-880.
- [66] Electron [EB/OL]. [2022-03-02]. <https://electron.net/electronconnect/>.
- [67] GORANOVIC A, MEISEL M, FOTIADIS L, et al. Blockchain applications in microgrids an overview of current projects and concepts [C]// *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, October 29- November 1, 2017, Beijing, China: 6153 - 6158.
- [68] FORFIA D, KNIGHT M, MELTON R. The view from the top of the mountain: Building a community of practice with the gridwise transactive energy framework[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2016, 14(3): 25-33.
- [69] AGALGAONKAR Y P, HAMMERSTROM D J. Evaluation of smart grid technologies employed for system reliability improvement: Pacific northwest smart grid demonstration experience[J]. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2017, 4(2): 24-31.
- [70] HAMMERSTROM D J, WIDEGREN S E, IRWIN C. Evaluating transactive systems: Historical and current US DOE research and development activities[J]. *IEEE Electrification Magazine*. 2016, 4(4): 30-36.
- [71] GJORGIEVSKI V Z, MARKOVSKA N, ABAZI A, et al. The potential of power-to-heat demand response to improve the flexibility of the energy system: An empirical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110489.
- [72] ZHANG Chenghua, WU Jianzhong, LONG Chao, et al. Review of existing peer-to-peer energy trading projects[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 2563-2568.
- [73] HUANG Q, AMIN W, UMER K, et al. A review of transactive energy systems: Concept and implementation[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 7804-7824.
- [74] GUERRERO J, CHAPMAN A C, VERBIC G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(5): 5163-5173.
- [75] KIM J, DVORKIN Y. A P2P-dominant distribution system architecture[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 35(4): 2716-2725.
- [76] 吴治国, 刘继春, 张帅, 等. 多售电主体点对点交易模式及其动态过网费机制[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(19): 100-108.
WU Zhiguo, LIU Jichun, ZHANG Shuai, et al. Peer-to-peer transaction model of multiple power sellers and its dynamic network fee mechanism[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 100-108.
- [77] PAUDEL A, SAMPATH L P M I, YANG J, et al. Peer-to-peer energy trading in smart grid considering power losses and network fees[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 4727-4737.
- [78] 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.
- [79] NIKOLAIDIS A I, CHARALAMBOUS C A, MANCARELLA P. A graph-based loss allocation framework for transactive energy markets in unbalanced radial distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 34(5): 4109-4118.
- [80] AZIZI A, AMINIFAR F, MOEINI-AGHTAIE M, et al. Transactive energy market mechanism with loss implication[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(2): 1215-1223.
- [81] GIVISIEZ A G, PETROU K, OCHOA L F. A review on TSO-DSO coordination models and solution techniques[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189: 106659.
- [82] PAPALEXOPOULOS A, FROWD R, BIRBAS A. On the development of organized nodal local energy markets and a framework for the TSO-DSO

- coordination[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189: 106810.
- [83] LIND L, COSENT R, CHAVES-ÁVILA J P, et al. Transmission and distribution coordination in power systems with high shares of distributed energy resources providing balancing and congestion management services[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2019, 8(6): e357.
- [84] RENANI Y K, EHSAN M, SHAHIDEHPOUR M. Optimal transactive market operations with distribution system operators[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 9(6): 6692-6701.
- [85] MOHAMMADI A, MEHRTASH M, KARGARIAN A. Diagonal quadratic approximation for decentralized collaborative TSO+DSO optimal power flow[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(3): 2358-2370.
- [86] YUAN Z, HESAMZADEH M R. Hierarchical coordination of TSO-DSO economic dispatch considering large-scale integration of distributed energy resources[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 600-615.
- [87] ZHANG K, TROITZSCH S, HANIF S, et al. Coordinated market design for peer-to-peer energy trade and ancillary services in distribution grids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(4): 2929-2941.
- [88] GUO Z, PINSON P, CHEN S, et al. Chance-constrained peer-to-peer joint energy and reserve market considering renewable generation uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 12(1): 798-809.
- [89] YAN Mingyu, ZHANG Ning, AI Xiaomeng, et al. Robust two-stage regional-district scheduling of multi-carrier energy systems with a large penetration of wind power[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 10(3): 1227-1239.
- [90] YAN Mingyu, HE Yubin, SHAHIDEHPOUR Mohammad, et al. Coordinated regional-district operation of integrated energy systems for resilience enhancement in natural disasters[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(5): 4881-4892.
- [91] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42 (15) : 133-141.
BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42 (15) : 133-141
- [92] KHORASANY M, NAJAFI-GHALELOU A, RAZZAGHI R, et al. Transactive energy framework for optimal energy management of multi-carrier energy hubs under local electrical, thermal, and cooling market constraints[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129: 106803.
- [93] WANG Xiaodi, LIU Youbo, LIU Chang, et al. Coordinating energy management for multiple energy hubs : From a transaction perspective . *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*[J]. 2020, 121: 106060.
- [94] JAVADI M S, NEZHAD A E, JORDEHI A R, et al. Transactive energy framework in multi-carrier energy hubs: A fully decentralized model[J]. *Energy*, 2020, 238: 121717.
- [95] LIANG Yile, WEI Wei, WANG Cheng. A generalized Nash equilibrium approach for autonomous energy management of residential energy hubs[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(11): 5892-5905.
- [96] CHEN Y, WEI W, LIU F, et al. Energy trading and market equilibrium in integrated heat-power distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 4080-4094.
- [97] CHEN Y H, WANG C, NIE P Y, et al. A clean innovation comparison between carbon tax and cap-and-trade system[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 29: 100483.
- [98] CHENG Yaohua, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Modeling carbon emission flow in multiple energy systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(5): 3562-3574.
- [99] CHENG Yaohua, ZHANG Ning, ZHANG Baosen, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 11(2): 1307-1318.
- [100] CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Optimal flexible operation of a CO2 capture power plant in a combined energy and carbon emission market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(3): 1602-1609.
- [101] HUA Weiqi, JIANG Jing, SUN Hongjian, et al. A blockchain based peer-to-peer trading framework integrating energy and carbon markets[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115539.
- [102] 范开俊, 徐丙垠, 陈羽, 等. 配电网分布式控制实时数据的 GOOSE over UDP 传输方式 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40 (4) : 115-120.
FAN Kaijun, XU Bingyin, CHEN Yu, et al. GOOSE over UDP transmission mode for real-time data of distributed control
- [103] ELA E, GEVORGIAN V, TUOHY A, et al. Market designs for the primary frequency response ancillary service—Part I: Motivation and design . *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 29(1): 421-431.
- [104] ZHANG Jiawei, WANG Peng, ZHANG Ning. Frequency regulation from distributed energy resource using cloud-edge collaborations under wireless environments[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, to be published.
- [105] JIANG Aihua, WEI Hua, DENG Jun, et al. Cloud-edge cooperative model and closed-loop control strategy for the price response of large-scale air conditioners considering data packet dropouts[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 4201-4211.
- [106] 周念成, 廖建权, 王强钢, 等. 深度学习在智能电网中的应用现状分析与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43 (4) : 180-191. ZHOU Niancheng, LIAO Jianquan, WANG Qianggang, et al. Analysis and prospect of deep

- learning application in smart grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (4): 180-191.
- [107] YE Yujian, QIU Dawei, SUN Mingyang, et al. Deep reinforcement learning for strategic bidding in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(2): 1343-1355.
- [108] TAO Chen, SU Wencong. Indirect customer-to-customer energy trading with reinforcement learning. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4): 4338-4348.
- [109] QIU D, YE Y, PAPADASKALOPOULOS D, et al. Scalable coordinated management of peer-to-peer energy trading: A multi-cluster deep reinforcement

learning approach[J]. Applied Energy, 2021, 292: 116940.

晏鸣宇(1994—), 男, 通信作者, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 数字能源系统, 点对点交易, 可再生能源。E-mail: mingyu.yan@imperial.ac.uk

王玲玲(1993—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向: 电力系统优化运行、电力市场、可再生能源。E-mail: himalayart@163.com

滕飞(1987—), 男, 博士, 助理教授、主要研究方向: 智能电网、信息物理系统。E-mail: f.teng@imperial.ac.uk

文劲宇(1970—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力系统运行与控制、储能与新能源并网、微电网与舰船电力系统。E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn

(本文编辑 xxx)

Review and Prospect on Transactive Energy Market for Accommodating Distributed Energy Resources

YAN Mingyu¹, WANG Lingling², TENG Fei¹, WEN Jinyu³, GAN Wei⁴, YAO Wei³, ZHOU Yue⁴

(1. Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London, South Kensington, London SW7 2AZ, UK;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

3. School of Electrical and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

4. School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF10 3AT, UK)

Abstract: Transactive energy market stimulates prosumers to trade energy with their peers, which could help mitigate the uncertain renewable resource by adjusting the real-time electricity price, thus enhancing the accommodation of renewable resource and achieving the carbon peak and neutrality. This paper first introduces the concept, features, and framework of the transactive energy market. Then, a detailed introduction, analysis, and comparison for the current transactive energy market mechanism are provided. Furthermore, the existing platforms and pilot projects for the transactive energy market is provided. Finally, we analyze the future challenge and development for the transactive energy market for applying the transactive energy market in practice.

Key words: transactive energy market; power distribution system; market mechanism; trading platform; pilot project