

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241631

社区能源与本地市场：英国能源本地化分析与借鉴

黄宇翔¹, 黄蔚亮², 牛振勇³, 许星原¹, 王宇绅¹, 陈皓勇¹, 张小平⁴

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东电网有限责任公司, 广东 广州 510620; 3. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510610; 4. 伯明翰大学, 英国 伯明翰 B15 2TT)

摘要: 在净零目标的驱动下, 英国分布式能源发展和社区能源建设已取得初步成效, 并逐步推进本地市场建设与运行。在此背景下, 首先系统梳理了英国能源结构、电力市场的改革路径, 分析了英国支持能源本地化的相关政策。然后, 深入探讨了英国能源本地化发展的关键进程, 重点研究了本地市场建设理念及本地市场与上层市场的交互机制。最后, 通过对英国典型社区能源项目及本地市场成功运行案例的分析, 总结其对中国实现能源本地化的借鉴意义。

关键词: 社区能源; 净零目标; 本地市场; 电力市场; 可再生能源

Community energy and local markets: an analysis of energy localization in the UK and lessons learned

HUANG Yuxiang¹, HUANG Weiliang², NIU Zhenyong³, XU Xingyuan¹, WANG Yushen¹,
CHEN Haoyong¹, ZHANG Xiaoping⁴

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510620, China; 3. Guangzhou Power Supply Bureau,
Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510610, China; 4. University of Birmingham,
Birmingham B15 2TT, United Kingdom)

Abstract: Driven by the net-zero target, the UK has made preliminary success in distributed energy development and community energy construction, while gradually advancing the establishment and operation of local markets. Against this background, this paper first systematically reviews the UK's energy structure and reform pathways of its electricity market, and analyzes relevant policies supporting energy localization. It then delves into the key processes of energy localization development in the UK, focusing on local market design concept and interaction mechanisms between local markets and upper-level markets. Finally, by analyzing typical UK community energy projects and successful local market operation cases, this paper summarizes the lessons that can be drawn for China's energy localization initiatives.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2403500).

Key words: community energy; net-zero target; local market; electricity market; renewable energy

0 引言

随着全球能源危机与气候问题日益严峻, 各国纷纷加快能源转型的步伐, 以减少化石能源依赖并降低碳排放^[1-4]。能源转型不仅需要加速可再生能源的建设与并网运行, 更需要重塑传统能源体系和市场架构, 以适应能源结构的多元化与分布化趋势^[5]。在这一背景下, 构建灵活高效的新型能源体系成为

推动能源转型的关键环节。其中, 能源本地化为实现能源体系的去中心化管理与资源优化配置提供了可行路径, 这其中主要包括两个实现路径: 社区能源^[6]与本地市场^[7]。

社区能源是指在本地范围内, 通过分布式能源系统实现能源的生产、消费和共享, 旨在提高能源的自给自足和可持续性^[8-9]。而本地市场则是一个为这些分布式资源提供交易、调度和管理的平台, 确保区域内能源供需的平衡, 并在需要时与更广泛的电网系统进行协同。社区能源与本地市场模式通常围绕微电网^[10]或虚拟电厂^[11]来构建, 涉及太阳能、

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2022YFB2403500);
南方电网重大科技项目资助(GDKJXM20220333)

风能等可再生能源，并支持灵活资源的参与。

作为全球最早实施电力市场改革的国家之一，英国在推动能源本地化方面始终走在前列。英国的社区能源实践始于 20 世纪 90 年代末的 Baywind 合作社^[12]，该合作社通过公众筹资模式吸引投资者，并成功收购了坎布里亚郡的一部分商业风电场。Baywind 合作社的成功为英国社区能源项目的快速发展奠定了基础，推动了社区能源项目从奥克尼群岛^[13]到德文郡^[14]等地的广泛布局，涵盖多种商业模式和组织形式。截至 2024 年 8 月，英国已有 583 个社区能源组织，管理着 398 MW 可再生能源容量，2023 年累计发电 617 GWh，足以满足约 228 530 户家庭的电力需求。

在社区能源的基础上，本地市场增加了交易和结算功能，为分布式能源资源的优化配置提供了全新平台。然而，受限于计量技术和市场规则，英国首个真正具备交易功能的本地能源市场——康沃尔本地能源市场，直到 2019 年才建成^[15]。该市场通过在线交易平台，使区域内买卖双方能够提交能源报价并实现撮合交易，同时允许配电网运营商与输电系统运营商采购灵活性服务，从而提升区域能源市场的协调性和高效性。

与此同时，我国也在积极探索本地市场的发展路径。自 2015 年发布《中共中央 国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》^[16](简称 9 号文)以来，我国在电力市场建设方面取得了显著进展，包括取消计划发电、推进现货市场建设以及促进分布式资源直接交易等政策逐步落地^[17]。《关于推进售电侧改革的实施意见》^[18]和《关于积极推进电力市场化交易进一步完善交易机制的通知》^[19]等政策文件，为分布式资源进入市场提供了制度保障，并推动了隔墙售电、就地消纳等灵活交易形式的发展。

2021 年发布的《“十四五”现代能源体系规划》明确提出，要大力发展新能源，推动分布式能源规模化应用，同时加快构建适应新能源占比逐渐提高的新型电力系统，鼓励风电和太阳能发电优先本地消纳。2022 年，国家发展改革委发布《加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》(简称 118 号文)^[20]，明确提出需要完善分布式发电的市场化交易机制，支持微电网、增量配电网等主体参与交易，增强新能源就地消纳能力，并促进区域与全国电力市场的协调发展。

考虑到我国电力市场建设历来将英国市场体系和政策作为重要参考^[21]，深入分析英国能源本地化的实践路径及应用案例，对于我国构建多层次协同发展的全国统一市场具有重要借鉴意义。

1 英国电力市场体系及政策

自 1881 年首个公共电力系统建立以来，英国电力系统持续变革。20 世纪初，电力行业由私人企业运营，40 年代实现国有化，并持续至 80 年代末。80 年代末至 90 年代初，英国政府通过《电力法案》^[22]推行大规模私有化与市场重组，引入竞争机制，并设立批发市场及独立监管机构。此后，英国电力市场经历 4 次重要改革，其关键节点与内容见表 1。

表 1 英国电力市场架构改革

年份	阶段	关键特点	作用
1990	电力池阶段	1. 建立电力池作为电力批发市场	1. 推动电力市场化 2. 提高电力系统的透明度和效率
		2. 发电商通过竞价向电力池出售电力	
		3. 供电商从电力池购买电力	
2001	新电力交易安排阶段	1. 取代电力池	1. 克服电力池的局限性 2. 降低电力价格
		2. 采用双边合同和电力交易所结合的模式	
		3. 增强市场竞争	
2005	英国电力交易和传输安排阶段	1. 将新安排阶段扩展到苏格兰地区	1. 实现统一的电力市场 2. 提高市场效率和竞争力
		2. 形成全英国统一的电力市场	
2013	低碳电力市场改革阶段	1. 引入差价合约机制	1. 支持可再生能源和低碳技术 2. 推动能源转型
		2. 建立容量市场	

经过多年改革，英国电力市场形成了多元化的市场主体格局，明确了政府、市场和企业的定位，建立了政监分离的管理架构，形成了能量从发电商到输电网再到配电网最后到用户，资金从用户到供应商再发电商或平衡机构的单流向模式，如图 1 所示。

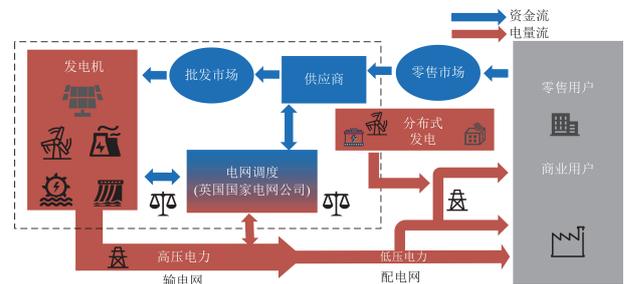


图 1 英国电力市场电量、资金流动

Fig. 1 Electricity and revenue flows in the UK electricity market

1.1 英国电力市场体系

英国通过英法互联线、北海互联线等跨境电力互联线，与欧洲大陆及爱尔兰岛实现了电网连接。尽管 2020 年英国脱欧，其电力市场仍与欧洲保持紧

密联系, 并保留了大部分市场体系结构。目前, 英国电力市场主要由 3 部分组成: 批发市场、系统服务和零售市场。批发市场由远期交易市场、现货交易市场(含日前市场、日内及实时市场等细分)等组成。系统服务主要通过平衡机制实现, 同时还包含容量市场及短期运营储备市场等多种系统服务^[23], 具体结构如图 2 所示。

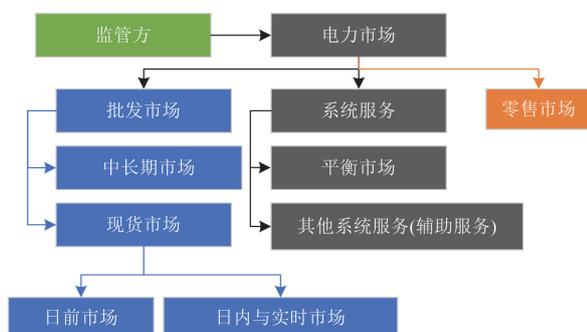


Fig. 2 UK electricity market structures

在批发市场层面, 英国电力市场对源自中长期合同的电量比例不设限制, 甚至允许全部需求来自现货市场交易。在日前现货市场中, 英国采用全域统一价格出清机制, 主要交易平台包括欧洲电力交易所(European power exchange, EPEX)和北欧电力交易所(Nord pool spot's N2EX, N2EX)。此外, 电力交易所还提供短期平衡市场和日内市场, 用于调节实际需求与合同电量间的偏差。这些市场分为日内拍卖和日内连续交易两种形式, 前者实行集中式出清, 价格可预测性较高; 后者则全天实时匹配交易, 价格波动性较大。

零售市场方面, 英国煤气和电力市场管理办公室(office of gas and electricity markets, Ofgem)^[24]作为监管主体, 负责确保电力市场公平竞争与透明运行, 并实施了多项值得借鉴的政策措施。其中, 能源限价每年 4 月与 10 月定期发布, 确保长期未更换供应商的用户享有价格上限保护。切换保障则确保用户可通过供应商或第三方平台(如比价网站)便捷转换供应商, 且转换过程必须在 5 天内完成并免除额外费用。同时, 零售市场评估要求所有供应商按统一格式设计账单, 明确展示消费参数, 并提供更有竞争力的服务选项。

平衡机制(balancing mechanism, BM)是系统运营商通过实时调节发电与需求以维持电力系统稳定的市场机制。区别于电能量市场, 平衡机制交易的是能量平衡量而非直接电能量。其中, 投标用于减少发电或增加需求, 出价则用于增加发电或减少需

求。该机制由电力系统运营商(electricity system operator, ESO)直接管理, 形成单一买方市场结构, 无须经由交易所, 报价后直接调度执行。

此外, 英国电力系统服务还包括频率响应、备用服务、电压控制及黑启动能力等, 这些服务帮助系统运营商在不同运行条件下保持系统稳定, 并在紧急情况下提供必要支持。

1.2 英国可再生能源政策对能源本地化的推动

英国电力市场私有化始于 1990 年, 旨在引入市场竞争机制以提升系统效率。在私有化初期, 政策重点主要集中于批发市场建设, 但亦有部分政策支持社区能源, 以促进能源本地化进程。在建立供电商业竞争与开放零售市场后, 非化石燃料义务(non-fossil fuel obligation, NFFO)^[25]条例要求供应商从可再生能源与核能中获取一定比例电力。然而, 当时的市场环境使该政策更倾向于支持中大型商业化项目, 未能显著推动社区能源建设。

可再生能源义务(renewables obligation, RO)^[26]是英国于 2002 年实施的支持可再生能源发展的政策机制, 通过强制电力供应商逐年提高可再生能源电力比例来促进可再生能源的相关投资。RO 机制覆盖小型水电与生物质能等资源, 使社区能源项目可通过出售可再生能源义务证书(renewable obligation certificates, ROCs)获取额外收益。

为进一步促进小规模可再生能源和低碳发电技术发展, 英国于 2010 年 4 月引入上网电价补贴(feed-in tariffs, FiTs)政策^[27], 规定电力供应商对符合条件的可再生能源的发电量和上网电量提供固定补贴, 这与中国分布式光伏发电补贴政策较为相似。由于 FiTs 政策明确面向 5 MW 以下可再生能源且不依赖 ROCs 交易市场, 同时涵盖光伏、风电、小型水电、生物质能等多种能源形式, 被普遍认为是真正推动社区能源建设的关键政策。该政策为英国带来了一批以可再生能源为主导的社区能源项目, 如牛津郡的 Westmill Solar Co-operative 光伏项目和南威尔士的 Awel Co-op Wind Farm 项目。

随着英国燃煤电站的逐步退役与可再生能源渗透率逐步增加, 英国政府开始进一步讨论新的电力市场改革的必要性。2011 年, 英国政府发布的《电力市场改革白皮书》标志着英国电力市场步入现代化, 其中影响较深的新政策除了被广泛肯定的容量市场外, 还包括有关分布式发电的重要政策: 差价合约^[28]。

差价合约能对可再生能源发电提供稳定的价格补偿, 降低电价波动带来的风险。英国议会于 2013 年通过的《能源法案》^[29]为差价合约提供了法律依据。2014 年, 差价合约正式实施, 并成功完成了首

次招标拍卖。到 2017 年, 差价合约全面取代了原有的 RO 机制, 成为支持可再生能源建设与运营的核心机制。

2019 年, FiTs 正式关闭, 由新能源智能回购政策(smart export guarantee, SEG)^[30]取代。SEG 允许小型能源生产者(如家庭太阳能系统、社区风能项目等)将剩余电力回售电网, 并获得供应商支付的电价。与 FiTs 相比, SEG 的准入门槛降至 50 kW, 但价格由市场决定而非政府统一制定。这一转变将可再生能源成本负担从政府转移至供应商, 虽然释放了政府可再生能源建设资金, 但也导致供应商购电成本上升, 进而提高了终端用户电价。

2022 年, 受俄乌冲突影响, 欧洲天然气价格剧烈波动。由于英国电力市场中天然气机组长期作为边际定价机组, 其发电成本的大幅上涨直接推动英国电价全年处于高位振荡状态。为应对能源安全与价格波动问题并减小天然气成本对电价的冲击, 英国政府于 2022 年 7 月启动新一轮电力市场改革^[31]。初步审查提出了一系列发展方向问题, 包括本地市场的建设可行性、节点电价的采用可能性以及用按标价支付替代按出清支付等。

2024 年 3 月的第二轮电力市场审查(review of electricity market arrangements, REMA)中, 英国政府对电力市场改革采取了相当保守的态度, 具体结果如图 3 所示。绿色部分为暂时通过的改革方案, 红色部分为暂时否决的方案, 而灰色部分则在第一轮审查中已被否决。

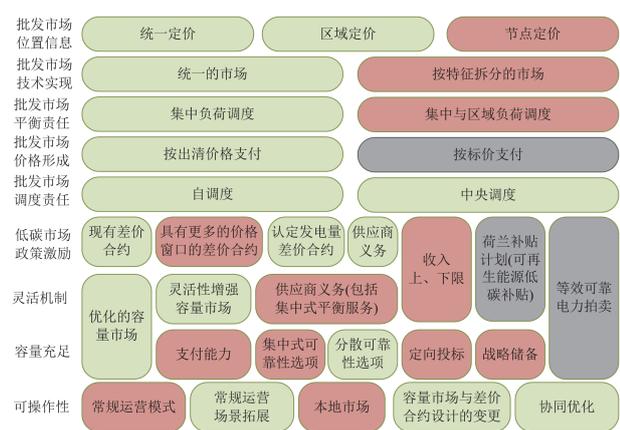


图 3 2024 年英国 REMA 第二轮审查结果
Fig. 3 Second round result for REMA in 2024

从图 3 可见, 英国政府在 2024 年第二轮 REMA 中采取了保守态度, 保留了差价合约和容量市场等有效机制的更新, 但未支持节点电价及市场出清方式的结构改革。

节点电价实施需要精细化建模, 可能加剧地区

电价差异, 对弱势区域不利。本地市场虽未获审查支持, 但作为英国能源转型的关键发展方向仍受到高度重视, 其未获支持主要因其与批发市场和辅助服务市场的衔接复杂性, 可能暂时降低市场效率并引发多次收费问题。英国政府推动电力改革较为谨慎, 除因为电价有所回落降低了改革紧迫性外, 还面临利益群体阻力, 例如节点电价可能引发伦敦地区电价上涨, 遭到当地企业反对。

尽管本地市场在这轮官方审查中未获得政策支持, 但作为能源变革的战略方向, 其建设步伐在英国各地仍在稳步推进。社区光伏、微电网、虚拟电厂和 P2P 能源交易试点已积累丰富实践经验, 为未来全面发展奠定坚实基础。试点结果表明, 本地市场更适合“自下而上”渐进发展模式, 通过分布式能源与技术创新逐步与上层市场实现有机衔接, 优化本地能源管理效率。

英国社区能源市场建设强调试点先行、自下而上发展, 为我国提供了重要启示。我国可通过区域试点逐步推进本地市场机制, 例如结合南方电网现货市场试点、分布式能源和虚拟电厂应用, 探索更灵活高效的市场结构, 并采用“先资源运行, 再推动入市”的路径。

1.3 英国本地能源计划与社区能源

上述政策主要通过推动可再生能源发展间接促进社区能源与本地市场建设, 而本地能源计划(local area energy plan, LAEP)^[32]是英国政府直接引导支持能源本地化的重要机制。LAEP 是英国地方政府主导的区域性综合能源规划工具, 需要联合市场运营商、资源持有者及用户代表等多元利益相关方, 通过协同参与完成制定。其核心价值在于提供一个经过全面成本核算的长期发展蓝图, 明确本地能源系统的建设方向与路径, 并以精确的方式阐明“做什么、在哪里、何时以及由谁完成”的实施细节。

LAEP 最早于 2015 年由能源系统孵化器(energy systems catapult, ESC)构建开发, 并在 Bury、Bridgend 和 Newcastle 等试点地区率先落地实施。经过近十年发展, 该规划框架已在英国多个地区成功应用并取得显著成效。大曼彻斯特地区通过全面推行 LAEP, 制定了 2038 年实现净零排放的宏伟目标, 并系统部署了一系列关键措施, 包括大规模安装太阳能电池板、推广热泵应用、建设智能电网与储能系统以及优化建筑能效标准, 全方位促进可再生能源与低碳技术在区域内的普及应用。

在牛津郡, LAEP 则更加侧重于提升能源使用效率与扩大可再生能源利用规模, 通过推进社区太阳能与风能项目, 以及建设分布式能源系统, 有效

降低区域碳排放。该地区 LAEP 的一个突出特点是强化了社区参与机制, 通过公众咨询会、工作坊及数字平台等多样化渠道, 提高了公众对能源转型的支持度与合作意愿, 为规划的顺利实施奠定了坚实的社会基础。

彼得伯勒的 LAEP 强调广泛的公众参与和跨部门利益相关方合作, 通过制定务实可行的低碳行动计划, 确保政策目标落实落地。约克与北约克郡的 LAEP 则设定了 2034 年实现净零排放更为激进的目标, 并依托绿色经济增长目标和基础设施升级项目推动规划实施。值得注意的是, 这些地区在 LAEP 实施过程中, 均注重将能源规划与当地经济发展、就业创造及社会公平等多元目标相结合, 实现了能源、经济与社会效益的协同优化。

这些实践案例充分表明, LAEP 不仅为英国地方政府提供了实现可持续发展目标的有力工具, 还能通过促进可再生能源投资、创造绿色就业、降低能源成本等方式带来显著的经济和社会效益, 充分展现了其在能源转型与可持续发展领域的多重价值。LAEP 的成功实施还依赖于完善的监测评估机制, 大多数地区建立了基于关键绩效指标的进度跟踪系统, 确保规划执行质量并适时调整优化。

英国社区能源的蓬勃发展, 得益于 LAEP、FiTs 等政策支持及长期推行的去中心化能源目标。社区能源指由地方社区主导的能源项目, 其核心特征在于社区成员在所有权、控制权和收益分配上享有直接参与权。其内容涵盖可再生能源发电、能源效率提升、需求侧管理以及能源储存等多个领域, 目标是通过地方化能源生产与管理, 增强社区能源自主性, 推动可持续发展, 并在经济、环境和社会三方面创造综合收益。

2 英国本地市场发展方向

2.1 本地市场概念及设计理念

社区能源为可再生能源的本地消纳和降低能源传输成本提供了重要基础。然而, 单靠社区能源共享体系难以实现资源的经济效益最大化, 尤其在投资成本回收方面存在不足。因此, 积极引导资源参与市场交易, 成为推动社区能源可持续发展的关键。

当前, 电力市场和系统运营主要集中于输电层面的参与者, 配电网的价值信号尚未充分体现在批发市场、电力平衡市场和辅助服务市场的交易与结算中。为此, 英国能源安全净零排放部和剑桥政策经济协会联合发布的本地市场指导文件^[33]指出, 位置价值、时间价值和系统可见性是实现低压资源高效聚合与管理的关键要素。

1) 位置价值

位置价值的核心在于电网约束和损耗具有显著的位置相关性, 其本质是不同区域的负载与发电情况差异会直接影响电力的实际价值。

目前, 英国日前及日内市场的出清未考虑输配电网约束, 采用全国统一价格, 且短期内未采用节点电价, 导致地理因素对资源分布和供需差异的影响难以通过市场信号体现。因此, 本地市场的设计需明确纳入配电网约束, 充分考虑区域资源的地理特性, 通过更精准的位置信号优化电力资源分配。

2) 时间价值

时间价值源于电力无法存储的特性, 其核心是不同时段的供需动态直接决定电力价值——系统需维持频率稳定, 实时平衡供需, 因此分时价格信号对优化分布式能源调度至关重要。在英国本地市场中, 时间价值的有效传递能优化分布式资源响应, 增强市场与系统的协调性, 同时细化电价时序特征, 提升调度效率, 为本地化灵活交易及社区能源可持续发展提供支撑。

3) 系统可见性

系统可见性指对电力系统(尤其是配电网)运行状态的实时监控能力, 包括获取负载、发电量、传输状态等数据, 依赖先进传感与通信技术。在本地能源系统中, 其重点是监测本地发电、储能及用电状态, 通过数据支撑优化调度策略、快速响应异常事件, 最终保障能源供应安全。

从本地市场高效运行的角度出发, 文献[34]以微电网市场为例, 提出了本地能源系统建设的综合评价体系, 其相关关系如图 4 所示。

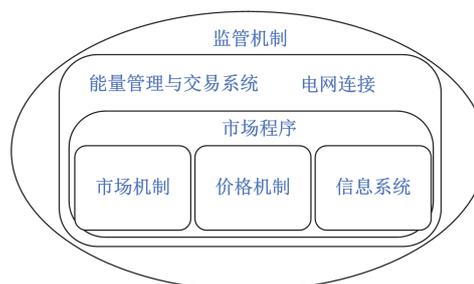


图 4 本地能源系统建设综合评价体系

Fig. 4 Comprehensive evaluation system for local energy system construction

市场程序明确交易主体, 形成合理的市场结构与交易格局。

电网连接确保本地市场的供需平衡, 保证与上层电网的协调运行。

信息系统建立公开的信息披露机制，确保所有市场信息对参与者可见。

市场机制制定公平合理的报价体系，确保市场交易的公正性与规范性。

价格机制确保交易结算过程的公平性，并实现合理的收益分配。

能量管理与交易系统(energy management trading system, EMTS)通过实时偏差修正与资源运行控制，保障能量管理和交易系统的高效性。

监管机制制定、修改并监督本地市场规则，确保其符合上层集中式市场的准则与规范。

此外，文献[35]通过全面回顾本地能源市场的研究文献，提出了建设本地市场需要解决的几个关键问题。

1) 对电力系统运行的影响。本地能源市场可能影响电力系统的运行、规划及约束条件，引发电压波动、高峰负载、网络拥堵等问题。

2) 分布式能源资源的波动性。分布式能源资源在合理管理下，可提供辅助服务及局部系统服务；但高渗透率可能对电网稳定性和可靠性造成影响，如导致过电压、欠电压、相不平衡及非预期的双向功率流等。

3) 网络约束的集成挑战。将网络约束纳入本地市场机制，需要在决策过程中充分重视配电系统运营商的作用。然而，目前本地市场与现有电力系统基础设施的完全集成，仍存在显著的研究空白与技术障碍。

这些难题使得本地市场与社区能源系统在与顶层集中式传统电力市场的交互中面临阻碍。能否解决本地市场与大电网及上层集中式市场的协同问题，将是决定本地能源系统能否可持续发展的关键。

2.2 本地市场设计障碍与解决方式

尽管社区能源向本地市场的升级在推动电力市场发展方面具有诸多优势，但具体实施过程中仍面临着显著的障碍，尤其体现在政策与监管层面。根据英国 Centrica 机构的报告《英国本地能源市场的政策和监管障碍》^[36]，这些障碍主要集中在以下两个方面。

1) 现有电力市场和网络运营模式仍以大型发电站为核心，电力出清与结算主要在输电网层面，消费者仅作为被动的电力接收者。这种传统设计难以适应分布式能源兴起和本地市场所需的复杂灵活性，限制了地方能源市场的创新空间与动态调节能力。

2) 当前政策规定消费者必须通过受许可的供应商进行交易，仅能选择单一供应商。这种规则阻碍了消费者与其他生产消费者或本地市场直接交易

的可能性，从而削弱了市场的多样性和消费者的选择权。

为应对上述问题，Centrica 在其报告《解锁本地能源市场》中提出了两项实现本地市场建设的关键措施：供应商中心模型改革与配电网络运营商(distribution network operators, DNO)向配电系统运营商(distribution system operator, DSO)的转型(即配电网络开放)。

2.2.1 供应商中心模型改革

20 世纪 80 年代末英国能源行业私有化时，形成了以供应商为核心中介的供应商中心模式。然而，这一模式已难以适配电力市场的创新需求，点对点交易模式因受限于现有市场规则而无法落地。供应商中心模式不仅削弱了市场主体间的互动性，还阻碍了能源流与资金流的直接联动。

若允许消费者和产消者同时选择多个供应商，并在无需持牌供应商参与的情况下自由交易多余电量或出售给任意交易方，将有效拓宽市场选择，为本地市场发展注入动力。因此，本地市场设计应聚焦消费者需求，以最大化投资收益为目标，支持通过新型中介或直接交易模式开展能源交易。

针对供应商限制问题，文献[36]中提出了一种广义电能供应商下的消费者选择模型(见图 5)。

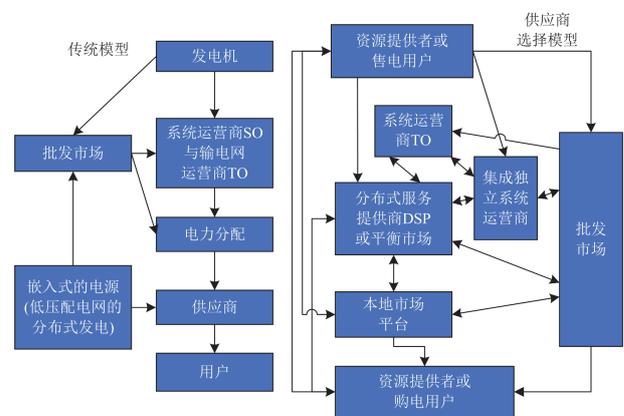


图 5 消费者选择模型

Fig. 5 Consumer selection model

从图 5 可见，传统模型将用户置于能源系统末端，所有交易均需通过供应商完成，与系统上游无直接互动。低压侧发电机或产销者虽可参与市场，但大多数交易仍依赖供应商进行。

消费者选择模型引入更灵活的系统交付方式，使配电成为市场核心。客户可同时作为买家和卖家参与多个市场，并直接进行点对点电力交易。该模型专注于本地分配和平衡市场，以本地可再生能源资产为核心驱动力，显著促进本地能源交易。其不

仅缩短了能源系统与消费者的距离, 还提供了更多选择, 同时降低了交易成本。

2.2.2 DNO 向 DSO 的转型

推动 DNO 向 DSO 的转型是构建高效本地市场的关键。随着配电网中分布式发电接入增加, DNO 对能量流的预测与主动管理需求不断提升。当前, 诸多研究和官方报告已探讨 DNO 向 DSO 的转型路径。2014 年, 施耐德电气分析了分布式发电、可再生能源、储能系统及微电网如何改变传统 DNO 运行模式, 并探讨了这种改变对配电网设计、运营和维护的影响^[37]。

2020 年, 西部供电公司 (Western Power Distribution, WPD) 在《DNO Transition to DSO》^[38] 报告中阐述了 DNO 向 DSO 转型的关键环节, 包括功能分离、独立监督和外部审计。功能分离指 DNO 须将配电网维护职能与系统运营职能明确划分, 以避免角色重叠; 独立监督要求 DNO 设立独立监督委员会, 监控 DSO 的决策流程; 外部审计则须确保 DNO 和 DSO 运营接受定期审查, 涵盖财务透明度、关键流程执行及风险管理。

同样地, 英国社区能源协会在《The Transition from DNO to DSO: What Could It Mean for Community and Local Energy》^[39] 报告中, 从本地能源视角探讨了 DNO 向 DSO 转型对社区和地方能源的影响。报告重点分析了 DSO 转型带来的新市场机遇, 包括推动点对点交易促进本地能源市场、采购本地平衡性服务提升供电稳定性, 以及提供交易平台以促进多市场电力交易。并提出了 4 点对 DSO 转型的指导。

1) 提供复杂且自动化的网络服务, 在满足能源需求的同时保持成本低廉, 为 DSO 转型奠定技术与成本基础。

2) 与西北区域及地方的利益相关者协作, 开发适配本地和区域实际情况的解决方案, 助力实现国家与地方层面的能源政策目标。

3) 以合理、前瞻的方式规划、推动区域内灵活市场发展, 为参与者(如社区能源项目、本地用户)创造更多合作与价值实现机会。

4) 确保社会中最贫困群体不会因能源领域的发展而处于不利地位, 保障其有机会享受能源转型带来的福利, 实现包容性发展。

目前英国已有 DNO 成功转型。2021 年, 西部供电公司 'Flexible Power' 品牌开发 DSO 服务, 连接网络运营商与灵活性服务提供商。数百名电力消费者加入该品牌, 聚合超 450 MW 灵活性资源, 并支持 200 万客户区域内数千辆电动汽车充电。

2.3 本地市场与上层市场交互策略

除本地市场设计外, 本地市场与上层市场的交互模式亦是可持续运行的关键。高效的交互机制可确保本地市场在分布式能源交易、可再生能源并网及需求响应过程中, 与上层市场协调, 实现资源最优配置。针对交互策略, 文献[33]总结了英国分布式资源的利用现状, 并提出了 3 种 TMO-DMO 交互机制。

模型 1: TMO-DMO 一体化的集中式市场

该模式由单一市场运营商负责, 统一出清输电和配电层级的资源, 其核心特点是在联合市场出清中加入配电约束, 与现有市场的主要区别在于增加了配电层级的考量。

模型 2: TMO-DMO 相互迭代的分层市场

该模式在配电与输电层级市场及其运营商间分配供需平衡责任, 以解决模型 1 在计算复杂性上的挑战。两者需通过不断交互迭代, 实现最优出清。

模型 3: DMO-TMO 两步市场

该模式下, 配电和输电市场相对独立, 市场出清从配电层开始, 配电市场的出清结果作为固定输入传递至输电市场。不同于模型 2, 此模式采用单向通信, 仅由配电市场向输电市场传递信息。

英国本地市场建设思路的模型对比如图 6 所示, 相关优缺点总结如表 2 所示。

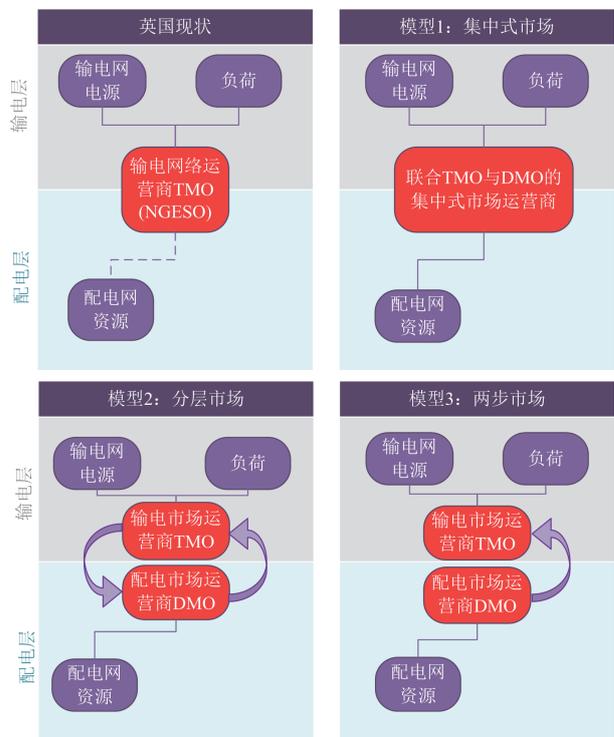


图 6 英国本地市场建设思路: 模型对比

Fig. 6 Construction approach of UK local energy market: model comparison

表 2 不同本地市场出清模式优劣对比

Table 2 Comparison of the advantages and disadvantages of different local markets

模型	优势	劣势
现状	无需改革、没有风险	1. 无法同时优化传输和配电级资源，导致市场出清效率低下 2. 分布式资源聚合与参与市场存在障碍，市场准入门槛较高
模型 1 集中市场	1. 假设市场运营商掌握所有资源的准确信息，它能够实现资源的最优利用 2. 输配电层级的资源平等竞争 3. 创建一个更大的资源池以满足系统需求，将有利于提升市场流动性并促进竞争	1. 需要对输电网与配电网进行出清，存在计算挑战 2. 高低压网络的不同物理特性意味着需要重构现有算法，能否实现仍有待实际验证 3. 信息监控、管理、验证和维护依赖同一个 Market Operator，缺乏权力制约
模型 2 分层市场	1. 迭代顺利的情况下能够实现资源最优配置 2. 上下层市场分开出清，减轻计算量	1. 市场清算依赖于迭代结果的快速精确收敛，并且存在无法收敛的可能 2. 个实体需要开发和维持市场运营能力(例如系统和流程)，可能成本更高
模型 3 两步市场	1. 两步市场清算过程，通过单向信息流，可能避免模型 1 的计算困难和模型 2 的迭代困难	1. 两步过程无法同时优化传输和配电级资源，导致市场清算方案效率低下 2. 无法体现输电和配电层级资源之间的竞争 3. 计算结果十分依赖上层市场对下层市场的计划制定

从技术角度看，模型 1 与主流电力市场双层优化方法一致。文献[40]已验证该方案的理论可行性。该类模型将输电层与配电层分离，上层市场优化系统运营目标，如全网经济性或社会福利最大化，而下层市场关注本地资源优化，通常以主体效益最大化为目标。求解耦合模型方法有：1) 采用双层优化方法，如 KKT 条件、强对偶理论或分解算法，将两层模型转化为单层求解^[41]；2) 基于博弈论构建上下层市场联动机制^[42]。这些研究为模型 1 的集中市场出清提供了理论支持，尤其适用于资源分布有限或市场集中度高的地区。相比模型 2 和模型 3，模型 1 实现难度较低，是构建本地市场的首要阶段。

不同于模型 1 的理论框架，模型 2 和模型 3 将调度与出清权限下放至 DMO，由其负责本地市场出清及结算。文献[43]表明，该类模式依赖 DMO 与 TMO 的高效数据交互与结果互认，其中模型 2 对数据交互效率及求解能力要求更高。受英国市场架构影响，DMO 和 TMO 作为独立公共事业单位，彼此独立甚至可能存在利益冲突。因此，在出清结果的上报与反馈过程中，如何协调层级市场的权限划分与责任分配，是本地市场建设的核心挑战之一。

相比之下，我国在本地市场与上层市场交互方面具备天然优势。输电网与配电网均由电网公司持有，数据交互与利益冲突问题较小^[44]。此外，我国电网调度体系已明确 DMO 与 TMO 的权责层级，DMO 需要在必要时接受 TMO 指令与调度结果。

3 英国能源本地化建设实例

近年来，随着能源本地化的发展，英国涌现出多个典型的本地能源项目，展现了多元化的发展路径。本文选取代表性案例进行分析，探讨不同模式下市场建设的意义，并总结推动能源本地化发展的

关键因素。

在社区能源领域，布里斯托能源合作社代表了自下而上的建设模式，其资金和收益主要来自社区内部，直接惠及当地居民。牛津超级能源中心(energy superhub Oxford, ESO)^[45]则体现了政策引导的发展模式，不仅规模更大，资源也更为丰富，主要侧重于创新示范。这一对比揭示了自下而上与自上而下模式在目标定位、规模效应及社会影响力方面的显著差异。

英国本地市场建设同样呈现多样化路径。康沃尔本地市场作为首个与大电网互动的调频市场，开启了本地市场探索进程，目前主要提供灵活性服务。相比之下，大曼彻斯特本地市场计划构建完整的电能出清平台并与英国电能市场对接，但仍处于规划阶段，受政策影响较大。这两个案例代表了本地市场从单一灵活性服务向综合电量出清的演进方向，揭示了本地市场与大电网融合的潜在发展趋势。

通过对这些典型案例的分析，可更系统地理解英国本地能源项目的发展特征，为我国本地市场建设提供有益借鉴。

3.1 社区共建的布里斯托能源合作社

作为多民族融合、历史悠久的国家，社区文化在英国具有重要地位。区别于政府主导项目，布里斯托能源合作社^[46](Bristol energy cooperative, BEC)体现了完全自主运营的社区能源模式，被学术界公认为英国最具代表性的社区能源组织之一。目前，BEC 管理着 13.4 MW 的发电容量，包括 15 个屋顶光伏和 2 个地面太阳能电站。

BEC 采用社区共同所有制模式，由当地居民与企业联合投资持有。通过社区股权发行机制筹集资金，居民与支持者转化为合作社股东。自成立以来，BEC 累计投入资金超过 1340 万英镑，建设 20 余个

太阳能与储能项目,吸引 1600 多名投资者参与,并将超过 40 万英镑的收益分配用于医疗、护理、公益体育等社区公共福利项目。

在能源投资与治理方面, BEC 与教育机构建立合作关系,为实习生提供本地能源规划的实践机会,以促进人才回流。同时, BEC 为居民提供公益能源宣讲、能源数据分析及最优供应套餐咨询服务。随着外部关注度提升, BEC 成立了社区利益公司,以拓展融资渠道。

作为社区主导型组织, BEC 的重大决策必须获取本地居民支持。2015 年, BEC 计划建设柴油发电机以提供频率调节和短期运营储备服务,但因环境污染问题,两次申请均遭到居民强烈反对,最终被迫终止。随着储能技术进步,大容量储能系统成为更环保的频率调节与容量储备替代方案,并获得居民广泛认同。布里斯托本地企业 Aura Power 于 2017 年和 2020 年在原柴油机选址提出储能电池解决方案,获得 BEC 及社区居民一致支持。

3.2 先进技术典范: 牛津超级能源中心

相较于社区主导的布里斯托能源合作社,牛津 ESO 体现了政府主导型能源项目的典型特征。牛津 ESO 是英国政府资助并获议会支持的大型基础设施项目,总投资 4100 万英镑,由储能企业 Pivot Power 牵头,联合多家国内外机构共同实施。其核心目标是实现电力、电动交通与供热系统的协同集成,构建低碳、可持续的城市能源生态。

牛津 ESO 的显著特征在于其先进的数据分析与处理技术,通过城市级综合能源一体化平台,实现电池系统、电动汽车管理与优化调度及能源交易的智能引擎的高效协同。项目创新性地部署了英国首个连接输电网络的 50 MW/50 MWh 锂离子电池与 2 MW/5 MWh 钒液流混合电池系统,这一配置使其成为全球首个电网级“混合”电池系统。相比传统低压或自用储能,直连输电网络的储能为电网提供了更优质的调频服务,显著加速了英国分布式能源系统建设进程。

在电动交通领域,牛津 ESO 建成了英国规模最大、性能最强的电动汽车充电枢纽,配备 42 个多功率等级充电点,并建设了一条 7 km 长的专用电缆,直接从高压电网获取 10 MW 电力。此创新推动了相关法规调整,支持电动汽车充电设施接入输电网络,并促进电力计量方式革新,使充电设施能直接采用超低价的可再生能源电价,省去供应商代理环节,有效降低运营成本。

3.3 康沃尔本地能源交易平台

位于威尔士西南部的康沃尔郡拥有英国最高

密度的微型发电认证的可再生能源装置,总计超过 38 000 个,能够满足 15% 以上本地家庭的能源需求。随着英国电网结构转型及可再生能源并网比例提高,高波动性新能源的有效管理日益关键。康沃尔本地市场项目^[47]通过聚合与管理分散式能源资源,充分利用家庭及企业的能源生产与存储能力,在平衡电网需求、降低碳排放的同时为参与者创造经济收益。

该项目于 2017 年启动,聚合了 100 余户配备太阳能发电、储能系统及智能监控设备的家庭,构建虚拟电厂为电网提供灵活性服务。此外,项目向 125 余家公共服务机构部署了冷热电三联供系统及一系列低碳能源技术与监控装置。

康沃尔本地能源市场交易平台运行框架如图 7 所示。该平台采用本地化交易模式,使系统运营商能够直接向分布式资源发出调度指令。家庭与企业可在平台上灵活响应这些指令,形成灵活性交易机制。

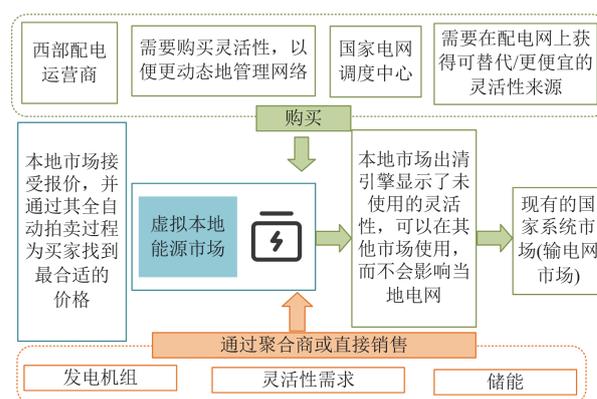


图 7 康沃尔本地能源市场运行框架

Fig. 7 Operational framework of Cornwall local energy market

该项目的核心创新在于其运营平台首次实现了地方配电网络运营商与国家电网电力系统运营商协同采购灵活性服务的双买方模式。这一全球首创模式通过从长期至日内的拍卖机制,精准匹配运营商需求与分布式资源报价。平台涵盖了从需求识别、市场竞价、竞价匹配、服务交付到结算验证的完整流程,为本地能源系统提供自动化端到端解决方案,显著提升了市场效率,并降低了分布式可再生能源的电网接入成本。

3.4 长期规划: 大曼彻斯特本地市场

相较于社区级本地能源系统,大曼彻斯特本地市场(Greater Manchester local energy market, GMLEM)规模更为宏大。《大曼彻斯特本地能源市场最终报告》^[48]指出,计划到 2038 年全面建成该市场,支持 1.5 GW 本地低碳发电与需求对接,满足 34 000

户家庭及 1.2 TWh 商业能源需求，预计年创造超 4000 万英镑系统价值，并吸引高达 46 亿英镑新型能源资产投资。

报告还明确指出本地市场 4 个主要价值流向。

1) 就地消纳本地能源：减少对输电网络的依赖，提高本地能源利用效率。

2) 提升系统灵活性：动态调整电力供需，增强

系统稳定性与适应性。

3) 为配电网提供灵活性服务：满足配电网调节需求，缓解局部网络压力。

4) 数据交易与市场补贴分配：利用市场交易数据创造收益，并向市场参与者提供补贴支持。

图 8 展示了 GM LEM 的本地市场建设结构图。

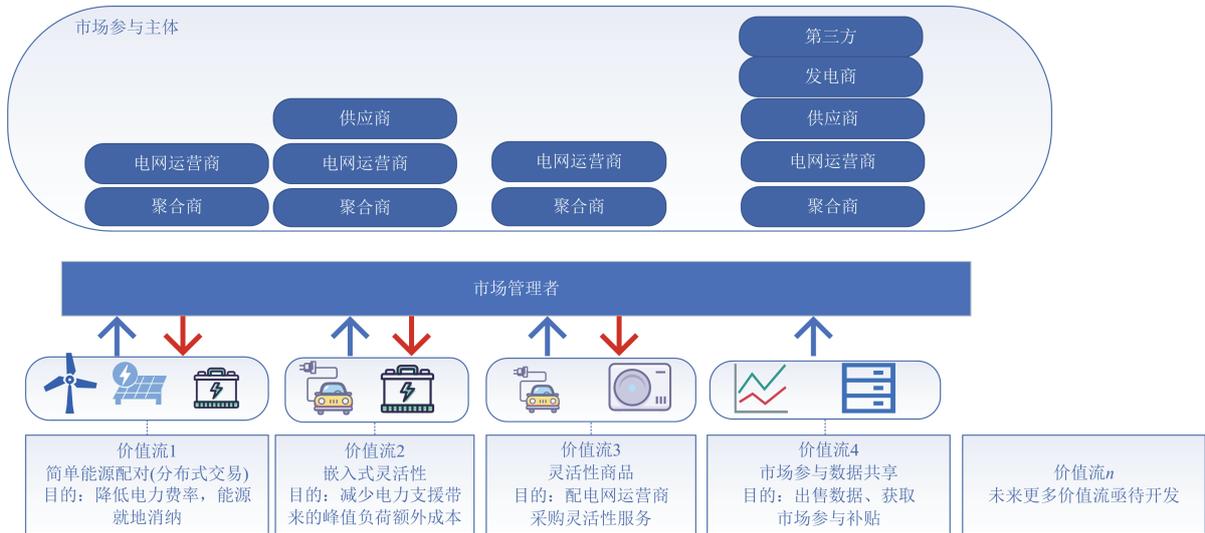


图 8 大曼彻斯特本地市场建设结构图

Fig. 8 Construction structure diagram of Greater Manchester local market

为协调复杂的价值流与能量流，GM LEM 构建了“市场制造者”数字化平台使本地消费者可直接向本地发电商购电。该市场与国家能源市场及区域灵活性市场形成互补关系，充当输配电网价格与需求信号的传递媒介，推动构建多层次综合能源市场。

GM LEM 为本地市场发展制定了 3 阶段规划：

初期阶段(2022—2025 年)：评估可参与能源交易的固定及流动资产，包括安装智能电表的居民用户、“产销者”、工业用户及电动汽车。建设初级交易平台实现报价与结算可视化，鼓励用户注册参与市场。

扩展阶段(2025—2030 年)：扩大用户覆盖范围，将更多居民、企业和能源设备纳入交易。引入“本地能源消纳量”激励机制，降低用户账单中的输电费用，提高市场参与度。

成熟阶段(2030 年及以后)：全面整合本地能源资源，与全国能源市场形成更紧密且差异化的互动，允许本地进行点对点(peer to peer)交易。打造先进的区域能源市场，依托能源市场联盟等形式，为用户提供更丰富、灵活的交易选择，进一步优化本地能源系统的运行效率与低碳发展水平。

然而，市场改革面临挑战。一方面，建设需要

大量前期投入，评估显示运营商预计至 2033 年可偿还初始 270 万英镑投资，2038 年实现稳定盈利；另一方面，监管协调涉及多方利益分配，英国天然气与电力市场办公室要求透明运行并确保盈余惠及社区。通过公众所有权管理模式，可在满足监管要求下实现公平利益分配。图 9 展示了大曼彻斯特本地市场的监管体系。

大曼彻斯特地方能源市场的建设不仅展现了本地能源系统的巨大潜力，还为未来能源转型提供了重要的实践依据。

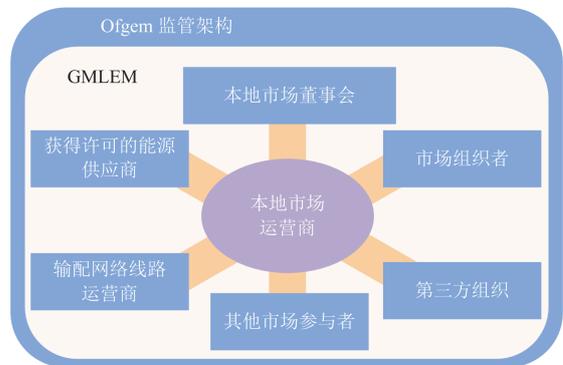


图 9 大曼彻斯特本地市场监管体系

Fig. 9 Regulation system of Greater Manchester local market

3.5 英国实例对我国能源本地化的启示

英国能源本地化发展构建了政策创新、技术应用与市场机制的系统框架, 对于我国来说具有借鉴意义。随着分布式能源接入比例上升、电网灵活性需求增加, 我国需要加强能源本地化建设, 探索社区能源与本地市场模式。

1) 构建支持政策与机制框架

康沃尔和曼彻斯特实践表明, 政策机制是本地市场成功的关键。英国通过 Ofgem 制定规则确保市场透明度, 并采用双买方模式协调国家电网与地方配电网利益。我国应完善监管体系, 明确市场主体职责, 出台专项政策支持分布式能源接入、储能技术及灵活性交易, 提供相应激励措施。

2) 推动技术创新与市场融合

牛津 ESO 经验显示, 技术创新是本地市场发展核心驱动力。借助先进能量管理技术, 牛津实现了电动汽车充放电的分布式能源高效管理。我国应加快智能电表、储能系统及能源管理设备普及, 提高分布式能源调度能力, 开发本地化交易平台, 推广区块链技术应用, 支持通过计算机系统自动进行能源交易双方的匹配, 无须人工逐一寻找和筛选交易对象, 快速、高效地促成能源交易, 节省人力和时间成本。

3) 激发社区参与推动公众化

康沃尔社区所有权模式与布里斯托公众投资经验表明, 社区深度参与至关重要。我国可通过收益共享机制及降低电价等措施, 提高各方参与意愿, 推广社区级能源项目, 构建以光伏、风电和储能为核心的本地能源系统, 同时加强科普宣传, 提升社会对能源本地化的认知与支持。

4 结语

在全球应对气候变化、推动可持续发展的背景下, 促进可再生能源并网消纳、构建低碳电力系统已成为各国能源政策的核心方向。英国在能源就地消纳、社区能源发展及本地市场构建方面的实践, 展现了本地市场在能源转型中的潜力与可行性。

我国作为全球能源转型的重要参与者, 应结合自身能源结构与市场需求, 借鉴英国经验, 以创新政策框架、先进技术手段及高效市场机制推动能源本地化发展。这不仅有助于提高可再生能源利用效率与电网灵活性, 还能加快构建低碳、清洁、可持续发展的能源体系, 为实现“双碳”目标及全球可持续发展作出积极贡献。

参考文献

[1] 杨锡勇, 张仰飞, 林纲, 等. 考虑需求响应的源-荷-储

多时间尺度协同优化调度策略[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 253-260.

YANG Xiyong, ZHANG Yangfei, LIN Gang, et al. Multi-time scale collaborative optimal scheduling strategy for source-load-storage considering demand response[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 253-260.

[2] 陈皓勇, 黄宇翔, 张扬, 等. 基于“三流分离-汇聚”的虚拟电厂架构设计[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 616-624.

CHEN Haoyong, HUANG Yuxiang, ZHANG Yang, et al. Architecture design of virtual power plant based on “three flow separation-convergence”[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 616-624.

[3] 李锦煜, 刘锐剑, 周朝阳, 等. 我国能源安全形势技术分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 249-255.

LI Jinyu, LIU Ruijian, ZHOU Chaoyang, et al. Technical analysis of China's energy security situation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 249-255.

[4] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 484-491.

XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.

[5] 陈皓勇, 谭碧飞, 伍亮, 等. 分层集群的新型电力系统运行与控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 581-595.

CHEN Haoyong, TAN Bifei, WU Liang, et al. Operation and control of the new power systems based on hierarchical clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 581-595.

[6] 牛焕娜, 王青林, 袁嘉兴, 等. 基于三层博弈的社区综合能源系统电热交易策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 25-37.

NIU Huanna, WANG Qinglin, YUAN Jiaxing, et al. Heat-electricity trading decisions of a community integrated energy system based on three-layer game theory[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 25-37.

[7] 谢东, 刘明波, 徐立新. 含分布式能源电力系统输配协调优化研究综述及展望[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 25-37.

XIE Dong, LIU Mingbo, XU Lixin. Review and prospect of transmission-distribution co-optimization of power systems with distributed energy resources[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 25-37.

[8] 康继光, 琚洁华, 赵艳敏, 等. 计及能源社区产消者的综合能源系统优化方法[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 206-216.

KANG Jiguang, JU Jiehua, ZHAO Yanmin, et al. Integrated energy system optimization considering energy communities

with prosumers[J]. *Electric Power*, 2023, 56(11): 206-216.

[9] 周俊宇, 李伟, 花洁, 等. 考虑需求侧可控负荷的含储能社区综合能源系统优化调度[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(2): 114-123.
ZHOU Junyu, LI Wei, HUA Jie, et al. Optimal dispatch of community integrated energy system with energy storage considering demand-side controllable load[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(2): 114-123.

[10] 田海东, 何山, 艾纯玉, 等. 计及能源交易下基于纳什议价模型的多微网合作博弈运行优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(6): 29-41.
TIAN Haidong, HE Shan, AI Chunyu, et al. Optimization strategy for cooperative game operation of multi-microgrids based on the Nashbargaining model considering energy trading[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(6): 29-41.

[11] 黄宇翔, 陈皓勇, 牛振勇, 等. 基于“能量-信息-价值”三层网络的虚拟电厂架构及运行关键技术综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(24): 169-187.
HUANG Yuxiang, CHEN Haoyong, NIU Zhenyong, et al. A review of virtual power plant architecture and key operational technologies based on a “energy-information-value” three-layer network[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(24): 169-187.

[12] Baywind Energy Co-operative. About us[EB/OL]. [2024-12-01]. <https://www.baywind.coop/about-us-3/>

[13] Orkney Renewable Energy Forum. Orkney’s energy [EB/OL]. (2023-10-27) [2025-02-27]. <https://www.oref.co.uk/orkneys-energy/>

[14] Devon community energy network support[EB/OL]. (2023-2024) [2025-02-27]. <https://www.regen.co.uk/project/devon-community-energy-network-support/>

[15] Centrica. Cornwall flexible energy trials prove success [EB/OL]. (2020-12-07) [2024-02-27]. <https://www.centrica.com/media-centre/news/2020/cornwall-flexible-energy-trials-prove-success/>

[16] 中共中央, 国务院. 中共中央 国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见[EB/OL]. [2015-04-09]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/tzgg/ggkx/201504/t20150409_1077736.html

[17] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 国家发展改革委 国家能源局关于开展分布式发电市场化交易试点的通知 [EB/OL]. (2017-10-31) [2024-11-24]. https://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm

[18] 国家发展和改革委员会. 关于推进售电侧改革的实施意见[EB/OL]. (2021-05-20) [2024-11-24]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/W020190905506465014964.pdf>

[19] 国家发展和改革委员会. 关于积极推进电力市场化交易进一步完善交易机制的通知[EB/OL]. (2018-07-18) [2024-11-24]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201807/t20180718_962756.html

[20] 国家发展和改革委员会. 关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见[EB/OL]. (2022-01-28) [2024-08-18]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202201/t20220128_1313653.html

[21] 李基贤, 许思扬. 英国电力市场化改革对中国电力市场发展的启示[J]. *电工电气*, 2021(7): 1-4, 11.
LI Jixian, XU Siyang. The enlightenment of UK electricity market reform to the development of Chinese electricity market[J]. *Electrotechnics Electric*, 2021(7): 1-4, 11.

[22] K Government. Electricity act 1989[EB/OL]. (1989-07-27) [2024-11-24]. <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/1989/29/contents>

[23] 黄宇翔, 黄蔚亮, 牛振勇, 等. 虚拟电厂市场机制与盈利模式及欧洲运行实例分析[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(9): 17-30.
HUANG Yuxiang, HUANG Weiliang, NIU Zhenyong, et al. Comparative introduction to virtual power plant profit models and analysis of European operation examples[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(9): 17-30.

[24] OFGEM. Energy price cap[EB/OL]. [2024-11-24]. <https://www.ofgem.gov.uk/energy-price-cap>

[25] International Energy Agency. Non-fossil fuel obligation[EB/OL]. <https://www.iea.org/policies/3867-non-fossil-fuel-obligation>

[26] OFGEM. Renewables obligation (RO)[EB/OL]. [2023-11-21]. <https://www.ofgem.gov.uk/environmental-and-social-schemes/renewables-obligation-ro>

[27] OFGEM. Feed-in tariffs (FIT)[EB/OL]. [2023-11-21]. <https://www.ofgem.gov.uk/environmental-and-social-schemes/feed-tariffs-fit>

[28] Department for Energy Security and Net Zero. Contracts for difference (CfD)[EB/OL]. (2016-11-09) [2024-11-24]. <https://www.gov.uk/government/collections/contracts-for-difference>

[29] UK Parliament. Energy act 2013[EB/OL]. (2013) <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2013/32/data.pdf>

[30] OFGEM. Smart export guarantee (SEG)[EB/OL]. [2023-11-21]. <https://www.ofgem.gov.uk/environmental-and-social-schemes/smart-export-guarantee-seg>

[31] Department for Energy Security and Net Zero, UK Government. Review of electricity market arrangements [EB/OL]. (2022-07-18) [2024-11-24]. <https://www.gov.uk/government/publications/review-of-electricity-market->

- arrangements
- [32] Parliamentary Office of Science and Technology. Local area energy planning: achieving net zero locally[EB/OL]. (2023-07-25) [2024-11-24]. <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/POST-PN-0703/POST-PN-0703.pdf>
- [33] Department for Energy Security & Net Zero. Local electricity markets: CEPA report[EB/OL]. (2023-02) [2024-11-24]. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65eafae63649a255a7ed635d/3-cepa-local-markets-report.pdf>
- [34] MENGELKAMP E, GÄRTTNER J, ROCK K, et al. Designing microgrid energy markets: a case study: the Brooklyn microgrid[J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 870-880.
- [35] DUDJAK V, NEVES D, ALSKAIF T, et al. Impact of local energy markets integration in power systems layer: a comprehensive review[J]. *Applied Energy*, 2021, 301.
- [36] Centrica. Policy and regulatory barriers to local energy market solutions in Great Britain[EB/OL]. (2018-03) [2024-08-18]. <https://www.centrica.com/media/4380/policy-and-regulatory-barriers-to-lem-s-in-gb-march-2018.pdf>
- [37] Centrica. Unlocking local energy markets[EB/OL]. (2018-09-18)[2024-08-18]. https://www.centrica.com/media/4377/bray-unlocking-local-energy-markets_-002.pdf
- [38] Western Power Distribution. DNO transition to DSO [EB/OL]. (2020-02) [2024-11-24]. <https://www.nationalgrid.co.uk/downloads/105967>
- [39] Community Energy England. The transition from DNO to DSO: What could it mean for community and local energy?[EB/OL]. (2018-06-23) [2024-11-24]. https://communityenergyengland.org/files/document/211/1532695604_TheTransitionFromDNOtoDSO.pdf
- [40] 徐立新, 沈志钧, 刘明波, 等. 考虑配电网安全校核的分布式能源聚合商参与市场竞标的双层混合整数优化模型[J]. *电网技术*, 2021, 45(11): 4395-4406.
- XU Lixin, SHEN Zhijun, LIU Mingbo, et al. Bi-level mixed integer optimization model for distributed energy aggregator participation in electricity market bidding considering security verification of distribution system[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(11): 4395-4406.
- [41] 马佳彤, 张儒峰, 付麟博, 等. 输配电网多主体参与的碳-电耦合市场双层交易决策方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(17): 12-26.
- MA Jiatong, ZHANG Rufeng, FU Linbo, et al. A bi-level trading decision-making method for the carbon-electricity coupling market with multi-agent participation in transmission and distribution networks[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(17): 12-26.
- [42] 梅生伟, 魏韡. 智能电网环境下主从博弈模型及应用实例[J]. *系统科学与数学*, 2014, 34(11): 1331-1344.
- MEI Shengwei, WEI Wei. Hierarchical game and its applications in the smart grid[J]. *Systems Science and Mathematics*, 2014, 34(11): 1331-1344.
- [43] 严文君, 刘俊勇. 基于深度学习的多微电网市场主从博弈运行优化策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(7): 120-128.
- YAN Wenjun, LIU Junyong. Optimization strategy for master-slave game operation in multi-microgrid market based on deep learning[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(7): 120-128.
- [44] WANG Yibo, WANG Yifan, LIU Chuang, et al. Auxiliary service dynamic compensation mechanism design for incentivizing market participants to provide flexibility in China[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(5): 112-128.
- [45] Energy Superhub Oxford. ESO final report[EB/OL]. (2023-06) [2024-11-24]. <https://energysuperhuboxford.org/wp-content/uploads/2023/06/ESO-Final-Report-V7.pdf>
- [46] Bristol Energy Cooperative. About Bristol energy cooperative[EB/OL]. [2024-11-24]. <https://bristolenergy.coop/about/>
- [47] Centrica. Cornwall flexible energy trial[EB/OL]. <https://www.centrica.com/media-centre/news/2020/cornwall-flexible-energy-trials-prove-success>
- [48] Greater Manchester local energy market. GM LEM summary report[EB/OL]. (2022-09) [2024-08-18]. https://gmgreencity.com/wp-content/uploads/2022/09/GM-LEM-Summary-Report_Final_V3.pdf
-
- 收稿日期: 2024-12-06; 修回日期: 2025-05-18
- 作者简介:
- 黄宇翔(1996—), 男, 博士, 研究方向为虚拟电厂与电力市场; E-mail: 893629600@qq.com
- 陈皓勇(1975—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、综合能源系统、电力经济学等。E-mail: eehychen@scut.edu.cn
- (编辑 张颖)