



Research  
Smart Grid and Energy Internet—Review

## 端对端能源交易现状分析与展望

周越, 吴建中, 龙超, 明文龙

School of Engineering, Cardiff University, Cardiff CF24 3AA, UK

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 26 March 2019

Revised 22 August 2019

Accepted 22 November 2019

Available online 10 June 2020

#### 关键词

端对端能源交易  
分布式能源  
本地能源市场  
区块链  
能源政策

### 摘要

作为有望解决人类社会“能源三元悖论”的一种重要手段, 端对端能源交易 (peer-to-peer energy trading) 在近年涌现并快速发展。在端对端能源交易中, 分布式能源 (distributed energy resource, DER) 直接互相进行能源的交易和共享。基于对相关学术论文、研究项目和工程实践的综合调研, 本文总结并分析了端对端能源交易的全球发展现状, 讨论了端对端能源交易的5个主要方面, 包括市场机制设计、交易平台、物理和信息通信基础设施、社会科学视角以及政策法规; 针对每个方面, 对现有相关研究和实践均进行了批判性分析, 并就未来的发展方向做出了展望; 文末对主要发现和展望做了系统性总结。端对端能源交易是一个快速发展的领域, 为全球的学术界和工业界提供了巨大的潜力和机会。

© 2020 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. 引言

“能源三元悖论”是现代人类社会面临的主要问题之一, 包括环境可持续、能源平等和能源安全这三个至关重要、需要同时实现但有时相互矛盾的目标[1]。为解决这一问题, 全球范围内正开展着一场前所未有的能源革命。据估计, 全球每年在能源基础设施的相关投入超过 $2.0 \times 10^{12}$ 美元[2]。“能源三元悖论”的解决方案可以分为两大方向: 一是通过更广泛的全球能源系统互联实现资源在区域、国内甚至国际范围内的合理配置, 例如, 全球能源互联网发展合作组织 (Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, GEIDCO) 在许多方面的研究和实践[3]; 二

是通过发展本地化的能源解决方案, 如智能本地能源系统 (smart local energy system), 为大能源系统建立具有自我管理能力的、鲁棒的基本能源管理单元 (cell) [4]。学术界和工业界普遍认为, 没有一种单独的方案是能够完全解决“能源三元悖论”的“灵丹妙药”[5], 因此结合“大互联”和“本地化”的全系统方法 (whole-system approach) 是应对未来全球能源挑战的必由之路[6,7]。

本地化能源解决方案的涌现是分布式能源 (distributed energy resource, DER) 快速发展和接入的结果[8]。传统电力系统的潮流是单向的——电能由大型集中式电厂发出, 依次经由高压输电网络和相对低压的配电网络, 经数次变电最终传输到终端用户[9]。与之相应, 传统电力市场也是单向的——发电企业在电力批发市场

\* Corresponding author.

E-mail address: [WuJ5@cardiff.ac.uk](mailto:WuJ5@cardiff.ac.uk) (J. Wu).

将大量电能卖给售电企业，而售电企业在电力零售市场再将从发电企业处批发的电能零散地卖给终端用户[10]。然而，各种分布式发电机组、储能设备和灵活负荷在内的分布式能源的出现，在技术和商业模式上改变了电力系统的单向格局[11]。从技术的角度，分布式电源引发的电力系统双向潮流以及可再生能源本身的间歇性和随机性给现代电力系统的规划、运行和保护带来了许多新的挑战[12]，但与此同时，分布式能源本身具有的灵活性又给电力系统应对这些挑战提供了宝贵的资源。从商业模式的角度，分布式能源属于大量位于电力系统边缘的小用户，打破了大型发电企业对电能供应的寡头垄断，为本地化电力市场的出现和发展提供了机会[8]。

近年来涌现的端对端能源交易（peer-to-peer energy trading）正吸引越来越多的关注[13]。在端对端能源交易中，拥有分布式能源的用户[由于这些用户同时具备发电和用电的能力，因此又被称为“电力产消者”（prosumers）]可以直接互相进行能源交易和共享。相比以自然垄断和规模效应为特点的传统电力市场，端对端能源交易可以看作是“共享经济”的一个范例[14]——犹如用户通过优步（Uber）共享未充分利用的私家车以及通过爱彼迎（Airbnb）共享未充分利用的房产[15]，端对端能源交易使用户可以与其他用户共享多余的本地发电或电力灵活性，实现能源生产者和消费者在经济利益上的双赢[16]。

电力用户发用电曲线的多样性（即在同一时刻，一部分用户有本地发电节余，而另一部分用户则有本地发电不足）是端对端能源交易得以展开的基础。在许多国家，为了促进分布式发电的本地消纳，分布式发电的上网电价往往低于用户的购电电价[17]，这给用户寻求彼此之间的直接电力交易提供了基本的经济激励。此外，在全球范围内，例如，在美国、英国、澳大利亚、新西兰、葡萄牙和西班牙，分布式发电的上网补贴不断下降是趋势，这进一步促使用户寻求建立本地的端对端能源交易市场[18]。

从电力系统调度的角度看，端对端能源交易为未来管理高渗透分布式能源提供了一种重要的手段[17]。分布式能源具有种类多样，运行特性、接入容量、接入地点和所有权各异的特点，因此传统的集中调度方法既不可行也不经济[19]。在此情况下，通过设计合理的端对端能源交易机制，分布式能源可以自发实现功率和能量上的平衡，从而减轻其给上级电网带来的压力和不确定

性[20]。进一步地，通过合理的机制设计（如一些学者提出的“联邦电厂”概念[21]），端对端能源交易中的分布式能源可以提供辅助服务，支撑上级电网的安全稳定经济运行。

基于全球端对端能源交易的最新发展动态和研究成果，本文分5个关键方面对现有相关研究和工程实践进行了系统总结和分析。本文的组织结构如下：第2节绘制了端对端能源交易的全球图景，系统总结了全球的相关学术论文、科研项目和工程项目；第3节具体从5个方面对端对端能源交易进行了阐述和分析，包括市场机制、交易平台、物理和信息通信基础设施、社会科学视角以及政策法规；第4节对全文进行了总结。

## 2. 全球端对端能源交易发展图景

在许多国家，端对端能源交易正受到学术界和工业界越来越多的关注。本节总结并分析全球相关学术论文、科研项目和工程项目的统计数据，展示端对端能源交易的全球发展图景。本节内容基于超过30篇学术论文、8个科研项目以及20个工程项目的相关资料。

### 2.1. 学术论文

基于对超过30篇学术论文的总结分析，绘制了全球端对端能源交易学术研究的图景，具体过程如下：首先在IEEE Xplore、ScienceDirect、MDPI和Springer输入“peer-to-peer”“energy trading”“energy sharing”以及它们的组合作为关键词进行搜索；然后通过对相应论文的标题、关键词及摘要的阅读，筛选出与端对端能源交易直接相关的论文。值得指出的是，考虑到会议论文巨大的数量以及部分会议论文最终将拓展成期刊论文，因此所选论文仅限于期刊论文。所得的统计结果如图1所示，更多详细信息参见Appendix A中的表S1。

如图1所示，相比2017年，端对端能源交易的相关论文在2018年有一个非常陡峭的增长。截至2019年3月底，相关期刊论文的数量已达到11篇，已超过2018年半年的数量，相关论文的数量会继续保持指数增长的势头。该统计结果表明端对端能源交易在学术界正引发越来越多的注意和兴趣。值得指出的是，上述结果均基于前文所述的特定关键词和筛选过程，因此端对端能源交易实际相关论文的数量要远高于图1中的统计数字。此外，图1中的统计结果从2015年开始，但这并不意味着端对端能源交易领域的第一篇论文发表于2015年。在

2015年之前，也可能有相关的论文发表，但由于本文采用的论文筛选方法的限制，因此其未被囊括。图1的结果主要为展示端对端能源交易领域相关论文快速增长的趋势。这些分析同样也适用于图2和图3的相关结果。另外再次强调，图1中2019年的相关数据截至2019年3月底。

图2展示了各个国家相关论文的发表数量。英国是目前发表端对端能源交易相关论文最多的国家，而欧盟国家作为一个整体贡献了超过全球论文总数55%的论文，显著超过全球其他国家和地区。澳大利亚产出的相关论文排名全球第二。此外，亚洲国家（包括中国、新加坡和日本）和北美国家（包括美国和加拿大）也产出许多相关论文，分别为9篇和5篇。

从研究主题看，如图3所示，绝大多数论文聚焦于端对端能源交易的市场机制设计，而交易平台、社会科

学视角、物理和信息通信基础设施以及政策法规的相关论文数量分列第二到第五位。这可能是因为端对端能源交易仍在发展的早期阶段，所以大多数研究首先聚焦于如何让交易在现实中发生。另外图3的数据也显示出政策法规相关研究的相对不足，这在未来需要加强。

## 2.2. 科研项目

世界上一些国家的政府和科研资助机构支持了一些促进端对端能源交易发展的科研项目。与学术论文的搜索和筛选过程类似，首先在Google中输入“peer-to-peer”“energy trading”“energy sharing”以及它们的组合，与“project”一词一起作为关键词进行搜索；然后对搜索出的内容进行人工检查和筛选，去除不相关的结果。

端对端能源交易领域一个显著的科研项目是欧盟地平线2020计划（Horizon 2020）资助的P2P-SmarTest项目（Peer-to-Peer Smart Energy Distribution Networks，即

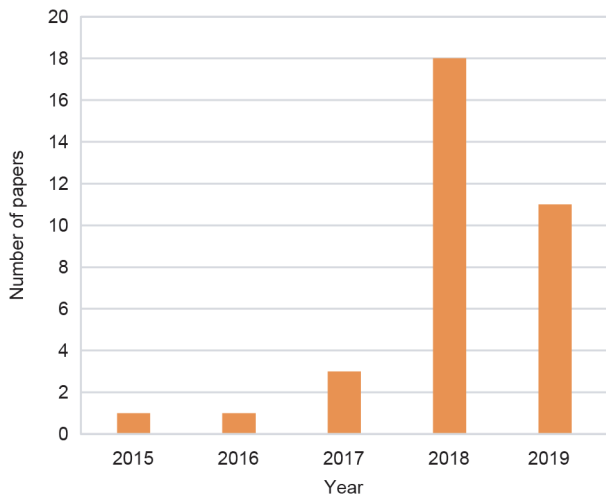


图1. 端对端能源交易相关期刊论文统计（按年）。2019年的论文数量截至2019年3月底。

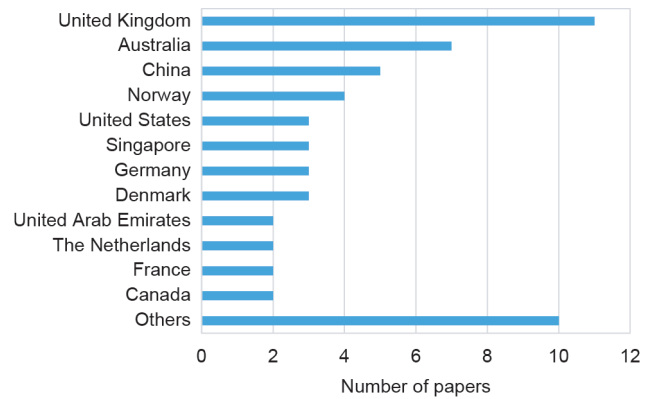


图2. 端对端能源交易相关期刊论文统计（按国家）。

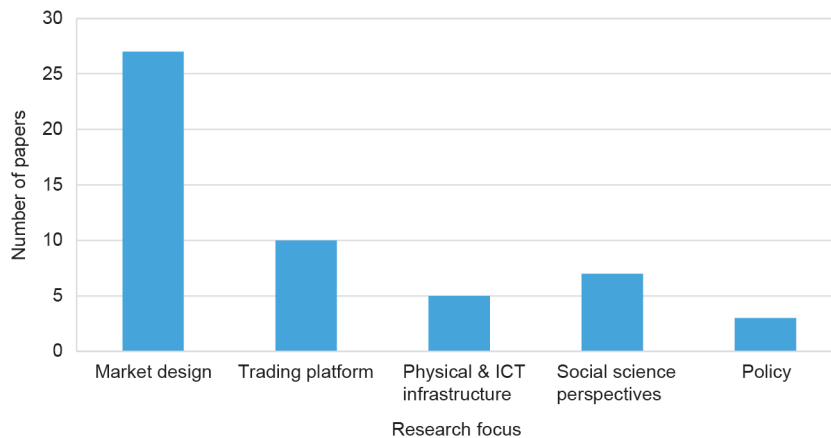


图3. 端对端能源交易相关期刊论文统计（按研究焦点）。

“端对端智能能源配送网络”)[22]。该项目始于2015年,结束于2018年,覆盖了端对端能源交易的4个主要方面,包括市场机制设计、交易平台、物理和信息基础设施以及政策法规。另一个大项目是P2P-3M项目(Peer-to-Peer Energy Trading and Sharing–Multi-times, Multi-scales, Multi-qualities, 即“多时间尺度、多空间范围及多种质量下的端对端能源交易与共享”)[23]。该项目由英国工程与自然科学研究理事会(Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC)资助,始于2016年,将于2020年结束。该项目旨在建立与多样化社会要求相一致的端对端能源交易技术与市场体系。

其他端对端能源交易的相关科研项目包括Energy Collective(能源集合体)[24]、EnerPort(能源端口)[25]、NOBEL(面向相邻地区的电力中介和监测系统)[26]、P2P Energy Trading Schemes for Sustainable Cities(可持续城市的端对端能源交易机制)[27]、Peer Energy Cloud(端对端能源云)[28]以及Street2Grid(街道电网服务)[29]。这些项目覆盖了包括市场机制设计、交易平台、基础设施、社会科学视角以及政策法规等不同方面。更多细节参见Appendix A中的表S2。

另外,从表S2可以看出,绝大多数科研项目(7/8)来自于欧洲。从研究主题的角度看,不同项目有不同的主题,但大多数项目集中于市场机制设计和交易平台这两大主题。也有一些项目聚焦于物理和信息通信基础设施以及政策法规议题,但只有很少的项目(1/8)从社会科学的视角进行考虑。

### 2.3. 工程项目

全球关于端对端能源交易的相关试点和商业化项目的数量近年来迅速增长,项目的资助主体既有高科技初创公司,也有能源和信息工业里的巨头。数据搜集采用了与前文类似的搜索与筛选过程,即首先输入“peer-to-peer”“energy trading”“energy sharing”以及它们的组合与“project”一词一起作为关键词进行搜索;然后对搜索出的内容进行人工检查和筛选,去除掉不相关的结果。值得指出的是,原则上所选项目均为已经启动、正在进行的项目,仍在规划阶段的项目均不入选。相关统计结果如图4和图5所示。更多详情参见Appendix A中的表S3。

如图4所示,美国和欧洲国家的端对端能源交易的相关实践最为活跃,其中美国和德国拥有世界上最多数量的端对端能源交易工程项目。图5显示70%的工程项目

目聚焦于本地层级,具体包括楼宇、社区、微网和配电网等。另外30%的工程项目聚焦于全国层级,具体解决跨不同大区或电力批发市场中发电机组和用户间的端对端能源交易问题。

值得特别注意的是,几乎所有本文中调查到的工程项目(详细列表见表S3)均涉及利用区块链技术对端对端能源交易提供支撑,这表明区块链技术可能是能够实现端对端能源交易的最有前景的技术之一,详细分析见第3.2节。

### 2.4. 关于所绘制的端对端能源交易全球图景的局限性的讨论

在本文所讨论的论文和项目之外,仍可能有其他许多论文和项目事实上与端对端能源交易相关,但没有包含在本文的统计和讨论之中,原因在于如第2.1节至第

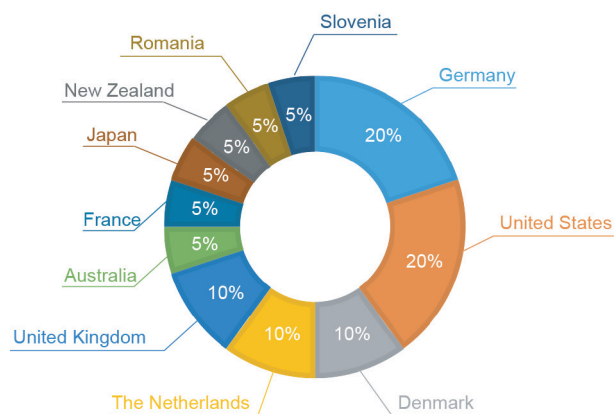


图4. 端对端能源交易工程项目所占比例（按国家）。

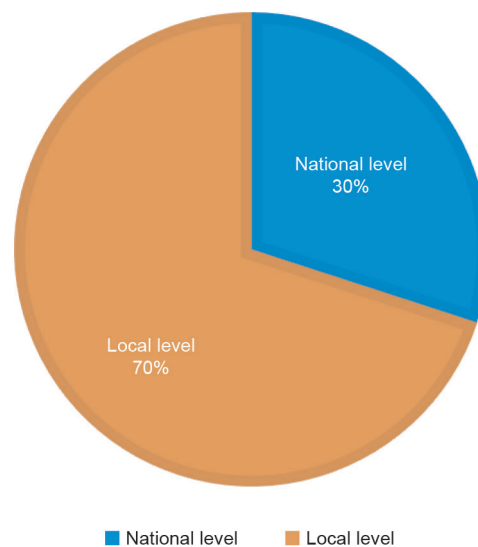


图5. 端对端能源交易工程项目所占比例（按范围）。



2.3节所述,在搜索时使用了“peer-to-peer”(端对端)、“energy trading”(能源交易)、“energy sharing”(能源共享)以及它们的组合作为关键词,但其他一些文献可能用了其他一些关键字,如“energy exchange”(能源交换)[30]、“local electricity market”(本地能源市场)[31]及“prosumer business”(产消者商业模式)[11]等。其他关键词没有被使用的原因是它们的“效率”比较低,即大多数结果并不与端对端能源交易相关。

此外,如第2.1节至第2.3节所述,所有的搜索结果是人工检查和筛选的,因此很大程度上依赖于作者本身知识储备和主观判断。另如第2.1节中所述,在学术论文的筛选过程中,仅阅读了论文的标题、关键词和摘要,因此可能会有一些遗漏,因为一些论文可能事实上与端对端能源交易相关,但却很难从标题、关键词及摘要中判断出来(如文献[32])。

最后,如第2.1节中所述,本文调查的学术论文仅从期刊论文中选取,但还有许多跟端对端能源交易相关的会议论文和预印本论文,如文献[33–37]。此外,本文调查的学术论文仅从IEEE Xplore、ScienceDirect、MDPI和Springer中选取,但其他数据库中也可能有端对端能源交易的相关研究。

虽然具有上述局限性,但我们相信本文仍覆盖了相当数量的与端对端能源交易相关的前沿研究和项目。基于这些调查我们进行了进一步的有益分类、分析并做了展望。

### 3. 端对端能源交易研究的主要方面——综述和展望

基于对现今学术界和工业界端对端能源交易相关研究进展的调研,本文总结了端对端能源交易研究的5个主要方面并进行了分析。5个主要方面包括:市场机制设计、交易平台、物理和信息通信基础设施、社会科学视角以及政策法规。用于总结这些主要方面的材料已在第2节中做了综述,具体的材料列表见Appendix A。在本节下面的内容中,将对各个主要方面先进行阐述,然后对现有相关研究和实践进行分析,最后对未来研究做出展望。本文总结的端对端能源交易研究的主要方面如图6所示。

#### 3.1. 市场机制设计

面向含有高渗透分布式能源的现代电力系统的创新

市场机制是端对端能源交易研究的一个重要方面。下面将从如下角度对端对端能源交易的市场机制设计做出讨论,包括:基于市场集中度的市场分类、电力产品的异质化、市场稳定性、与外部市场的关系以及基于博弈论的视角。

##### 3.1.1. 集中式市场、分散式市场还是分布式市场?

根据市场的集中程度,可以将端对端能源交易市场分为集中式市场、分散式市场和分布式市场,如图7所示。

###### 3.1.1.1. 集中式市场

集中式市场需要有一个能够与所有参与端对端能源交易的用户通讯的市场协调者。在集中式市场中,市场协调者直接决定用户的能源输入/输出量,甚至直接决定用户设备的运行状态。市场协调者还负责根据提前制定的规则分配端对端能源交易的收益,例如,制定端对端能源交易的价格,从而决定用户的收益[38]。

集中式市场的一大优点是可以最大化整个端对端能源交易集体的“总收益”(social welfare),市场协调者可以将最大化端对端能源交易集体的总收益作为优化其决策的目标函数(如文献[39]中的方法)。进行集中管理的另一优点是市场中用户的发用电模式的不确定性较低,不同于将于后面阐述的分散式或分布式市场[17],集中式市场中用户的运行状态由市场协调者直接决定[39–43]。

集中式市场的一个主要缺点在于随着所管理的分布式能源规模的扩大,它会给集中式管理系统带来指数级的计算和通信负担[19]。集中式市场的其他缺点包括用户隐私和自治性(autonomy)问题:用户隐私方面,市场协调者所收集的相关数据包含了很多用户的隐私,数据的泄露或滥用可能造成用户隐私泄露的风险;用户自治性方面,市场协调者对用户设备的直接控制严重损害了用户的自治性,一些用户对此可能颇为敏感[44]。此外,集中式市场还有较大的“单点故障”(single-point failure)风险(在市场协调者处)。

已有许多研究提出或探讨了端对端能源交易的集中式市场设计。文献[39]提出了一个优化模型,以使装有光伏电池和电池组的家庭的经济利益最大化。该模型为不同用户间的端对端能源交易指定了固定的价格。Lüth等[40]研究了集中式电池和分散式电池在P2P能源交易中的作用和价值,并提出了两个市场设计,即“Flexi用

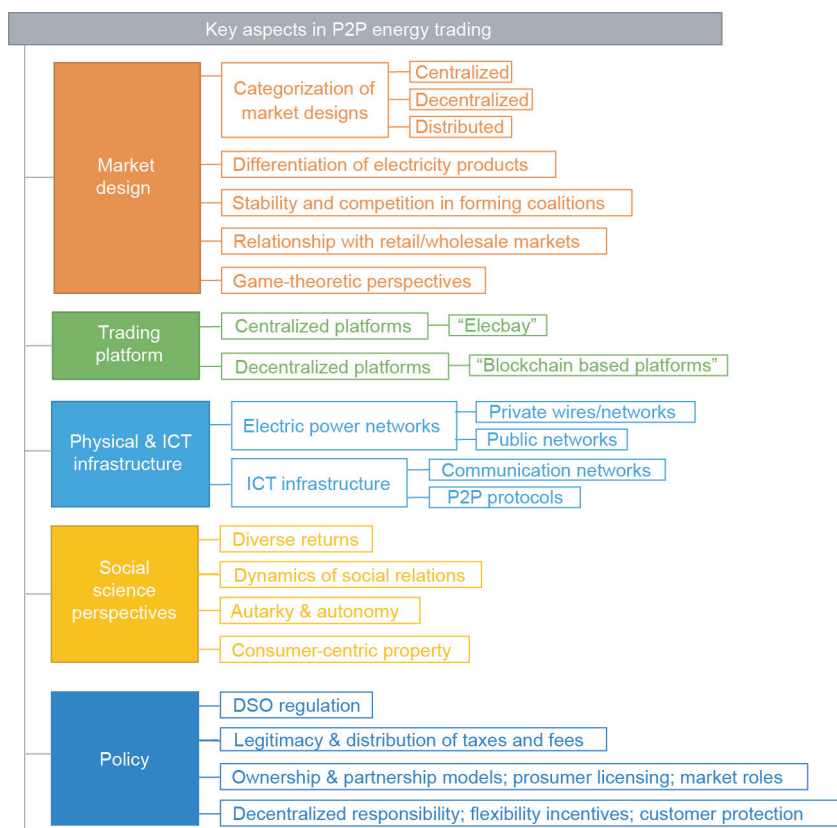


图6. 端对端能源交易主要议题概览。

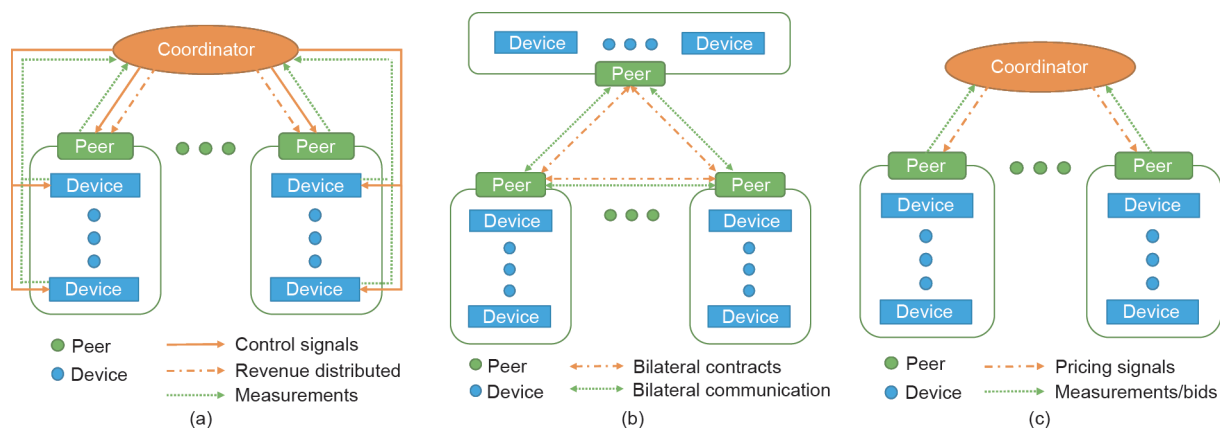


图7. 端对端能源交易市场分类。(a) 集中式市场；(b) 分散式市场；(c) 分布式市场。

户”和“Pool Hub”，这两个都是集中式市场。文献[41]提出在工业物联网中为基于区块链的端对端能源交易配备和使用本地电力储备，主要用于减少区块链的长度和减少电能传输损耗。文献[42]提出了一个名为“Smart electricity Exchange Platform, STEP”（智能电力交换平台）的集中式端对端能源交易市场设计，其中端对端能源交易的价格被提前指定作为约束。文献[38]为实行端对端能源交易的微网社区提出了一个两阶段储能控

制策略，主要优点在于仅需要微网公共耦合点（point of common coupling, PCC）的量测信息以及对储能设备的单向通信信道。文献[43]为集中式端对端能源交易提出了一个名为“energy cost optimization via trade (ECO-Trade)”（通过交易实现能源费用最优化）的算法。通过该算法得到的解99%是最优解，并且更有效率。

从对上述文献的分析可以看出，由于采用了全局优化，集中式市场可以得到一系列包括总收益最大化在内

的好处。未来对集中式市场的研究可以从以下两方面开展：一是让集中式市场在实现端对端能源交易之外再实现一些其他功能，如激励辅助服务、网络阻塞管理、更加公平的用户利益分配等；二是尝试解决集中式市场在可扩展性、可靠性、隐私和自治性等方面的固有缺点和问题。

### 3.1.1.2. 分散式市场

与集中式市场不同，分散式的端对端能源交易市场中没有集中式的市场协调者，用户直接与其他用户进行联系和交易。因此，相比集中式市场，分散式市场中用户的隐私得到很好的保护，并且用户对其自身的设备拥有完全的控制权[45–48]。另外，分散式市场的可扩展性良好，用户可以更容易地“即插即用”[45–48]。

分散式市场也有其自身的缺点。首先，由于没有集中的市场协调者，分散式市场的“效率”往往不高，难以保证端对端能源交易集体总收益的最优性[49]。其次，分散式市场的交易结果对电力系统调度的可见性和可预见性相对较差，使电力系统调度更难管理相应的系统约束以及进行相应的系统运行优化（如文献[45]中所述的双边合同网络）。最后，用户在分散式市场中面临很大的不确定性，这使得一些弱势用户的利益容易得不到保障，例如，在文献[50]中所提出的连续双边拍卖机制中，一些用户的发电或负荷可能被削减。

与集中式市场的研究相比，关于分散式市场的学术论文数量相对较少。文献[45]提出了一种可以适用于远期市场和实时市场的完全分散式双边合同网络。其中，用户偏好的“完全可替代条件”（fully substitutability condition）是所提合同网络有稳定结果的前提。文献[46]提出了一种基于“多边经济调度”（multi-bilateral economic dispatch）模型以及“松弛共识+创新”（relaxed consensus + innovation）方法的分散式端对端能源交易市场解决方案。作者宣称所提方案可以在尊重用户多样性的偏好的同时实现端对端能源交易集体总收益的最大化。文献[47]提出了一种基于区块链的、面向端对端能源交易的“自动贬值”（demurrage）机制，其中以能源为基础的区块链代币的币值随时间的增长而贬值，从而激励用户在有多余本地发电的时刻用电。文献[48]提出了一种端对端能源交易的多代理联盟机制。此外，早在2014年的一个研究中[32]，作者提出了一种微电网间进行端对端能源交易的简单机制，其中端对端能源交易价

格随时间变化而变化，但被提前指定。同时，微电网通过查找一个固定的顺序表决定与哪些微电网进行交易。

从上述文献综述可以看出，相比于集中式市场多采用全局优化的方法，分散式端对端能源交易市场的形式就更为多样化，包括双边合同网络、共识方法、区块链代币自动贬值机制、多代理方法等多种机制。然而完全分散式市场往往无法实现全局最优，因此还有进一步改进现有市场机制或提出新的市场机制以实现更好性能的空间。此外，现有分散式市场在设计过程中往往对用户的行为决策机制有一定的假设，但在现实中，用户的行为决策往往很复杂、有很强的不确定性，因此，分散式市场在实际中的效果有待进一步研究和评估。最后，与集中式市场类似，分散式市场中也可以加入进一步的设计，激励用户为电力系统提供其他支撑辅助服务。

### 3.1.1.3. 分布式市场

分布式市场是一种介于集中式市场和分散式市场之间的市场机制。与集中式市场的协调者直接控制用户的能源输入/输出量或直接控制用户设备不同，分布式市场的协调者往往通过价格信号间接影响用户的行为[17]。与完全分散式市场相比（如与文献[17,45]相比），分布式市场具有一个市场协调者，因此用户的用电行为可以得到更好的协调。与集中式市场相比（如与文献[17,43]相比），分布式市场往往需要更少的量测数据，并且也不直接控制用户设备，因此可以更好地保障用户的隐私和自治性。总之，分布式市场结合了集中式市场和分散式市场的特点，是一种居中的解决方法。

已有许多研究对分布式端对端能源交易市场进行了探讨。文献[51]提出了一个迭代式的双边拍卖机制，最大化参与端对端能源交易的电动汽车的总收益。文献[52]提出了一种应用于工业物联网和能源区块链的、基于斯坦伯格（Stackelberg）博弈和信用贷款（credit-based loans）的定价策略。文献[53]提出了3种用于微电网社区端对端能源交易的定价机制，包括账单共享机制（bill-sharing）、中间价机制（mid-market rate）和基于拍卖的定价机制。文献[54]基于对电动汽车线性投标价格函数的假设，采用一种二次规划模型为端对端能源交易进行定价。文献[55]提出了针对多种能源产品端对端能源交易的分布式价格导向优化机制。文献[56]提出了一种基于非合作博弈（non-cooperative game）、演化博弈（evolutional game）和斯坦伯格博弈的端对端能源交



易迭代式定价机制。文献[57]提出一种共识交换乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)进行内源性(endogenous)端对端经济调度。文献[58]提出了一种事件触发的本地市场,在这种情况下,市场中的能源零售商基于事件触发的双边拍卖模型决定临时市场的费率。文献[59]提出了一种基于价格需求响应的微电网端对端能源共享模型,其中的动态内部定价模型基于微电网中能源的供求比。

从上述文献综述可以看出,分布式市场的一个关键问题是设计一种合适的端对端能源交易定价机制。此外,建立合理的用户行为决策模型和合理的定价模型实施机制(如一次性/迭代式执行机制、同步/异步执行机制等)也十分重要。文献[17]给出了分布式端对端能源交易市场的抽象层次化模型,并提出了一套多代理仿真框架和评估指标体系,用于仿真和评估分布式端对端能源交易市场设计。

分布式市场的未来研究方向包括设计一种能够同时激励端对端能源交易和辅助服务的机制。分布式市场的设计还需考虑用户实际的行为决策模型以及现实的市场实施机制。此外,分布式市场的收敛性也是重要的研究课题,以避免市场发散带来的不良后果。

### 3.1.2. 电力产品的异质化

现行电力市场中的电力产品主要通过时间进行异质化区分。在电力批发市场中,覆盖不同时间范围的电力产品(如短期合同、中期合同和长期合同)往往具有不同的价格。在电力零售市场中,分时电价、实时电价、尖峰电价等机制在世界上许多国家和地区采用[60]。电力产品有时也根据用户的累计用电量进行区别,一个典型的例子是在中国[61]、加拿大[62]、南非[63]等国家

实行的阶梯电价机制。

端对端能源交易市场的出现为电力产品的进一步异质化提供了机会——端对端能源交易市场规模较小,往往服务于具有具体特点的特定用户群体,因此适合试点各种灵活的市场设计。已有少量研究对端对端能源交易市场中电力产品的异质化做了探讨。文献[55]提出了一种端对端能源交易中的多类别能源管理方法,其中的电力产品分为“绿色电力”“补贴电力”和“电网电力”3类。文献[46]提出的基于共识的方法可以适用于电力产品的异质化——一种可能的方案即是基于用户间的欧氏距离征收不同水平的附加费,从而对电力产品进行区别。

未来研究方向包括为电力产品的异质化提出不同的端对端能源交易市场机制设计,以及提出不同的电力产品异质化方法,如基于电能质量的异质化方案、基于供电可靠性的异质化方案等。电力产品的异质化的相关内容总结如图8所示。

### 3.1.3. 组成端对端能源交易联盟过程中的竞争性和稳定性

几乎所有端对端能源交易的现有研究都假设一个地区中仅有一个统一的端对端能源交易市场(如文献[39–42,45–48,51–59])。然而现实中很有可能一个地区中有多个端对端能源交易服务提供商,而这些服务提供商各自建立端对端能源交易市场,彼此竞争,招揽用户。在这种情况下,端对端能源交易市场的稳定性,即其将用户留在市场之中的能力,就显得尤为重要。

已有少量研究对这一问题进行了探讨。文献[43]所提的端对端能源交易机制可以保证参与端对端能源交易的用户所得的收益不会比直接与大电网交易更差,但没法保证一部分用户脱离交易机制自组新的联盟,以获取

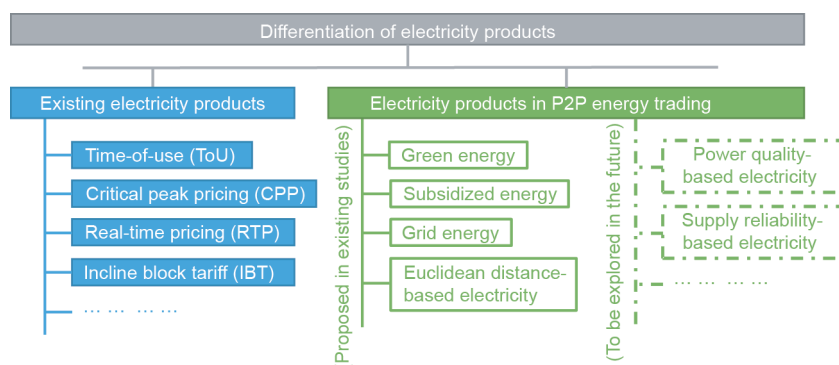


图8. 电力产品的异质化。



更大的利益。文献[64]验证了所提的基于经典联盟理论 (canonical coalition game) 的端对端能源交易机制的内核以及稳定性, 但其采用的利益分配机制能否阻止部分用户脱离而自组联盟还需进一步分析。

未来研究可以集中在确保端对端能源交易的稳定性 (至少在特定条件下)。对集中式市场而言, 市场的稳定性主要取决于联盟内的利益分配机制。对分散式市场或分布式市场而言, 市场的稳定性主要在于设计合理的市场交易规则和定价机制。此外, 一个区域内的用户会如何自组织而成立端对端能源交易联盟也有待进一步研究, 这有助于更加准确地评估端对端能源交易对用户个体以及社会整体的影响。

#### 3.1.4. 端对端能源交易市场与现行的电力批发/零售市场的关系

现今已有许多关于未来电力市场形态的研究和讨论, 但未来电力市场的最终形态仍是一个开放的课题[65–67]。尽管如此, 可以预见的是, 传统的电力批发-零售市场体系将与端对端能源交易在未来很长的一段时间内同时存在。因此, 探究端对端能源交易市场与现行电力批发/零售市场间的关系是端对端能源交易研究领域的一个重要课题。

在现有的端对端能源交易相关研究中, 往往假设用户首先与其他用户进行端对端能源交易, 然后再与电力批发或零售市场进行个体或集体交易以进行功率和能量的平衡 (取决于端对端能源交易市场的规模及具体的市场设计)。换言之, 传统电力批发/零售市场为端对端能源交易市场扮演了一个“最后平衡者” (residual balancer) 的角色。文献[68]所提的基于社区的市场是此类关系的一个范例。其他的例子包括文献[38,39,43,48,53,54,56] (与电力零售市场互动) 以及文献[40,42,55] (与电力批发市场进行互动)。

另外, 也有一些更加“通用”的端对端能源交易市场设计, 不仅可以针对需求侧装有分布式能源的用户间的端对端能源交易, 同时也可以用于大型发电机组和电力零售商间的相关交易。文献[68]提出的“完全端对端市场”就是这样的一种市场。文献[45]显性地指出所提的双边合同网络方法可以应用于能源产消者、零售商及大型发电机组间的直接能源交易。文献[46]所提的市场机制也可以应用于大型发电机组与用户的直接能源交易。此外, 虽然没有明确说明, 但文献[47]所提的市场

机制是通用的, 未来有潜力拓展到需求侧用户间交易以外的场景。

在现有的将电力批发/零售市场作为最后平衡者的研究中, 通常假设端对端能源交易市场的总体规模和影响还非常小, 因此, 进一步将端对端能源交易市场中的用户当作是电力批发/零售市场的“价格接受者” (price taker)。然而, 随着未来分布式能源渗透率的逐渐提高和端对端能源交易市场的进一步发展, 端对端能源交易市场的影响难以被忽略, 因此需要在未来将端对端能源交易市场考虑为影响电力批发/零售市场的“价格制定者” (price maker)。此外, 针对那些同时可以囊括大型发电机组和电力零售商的端对端能源交易市场机制, 需求侧端对端能源交易和现有电力批发/零售市场的关系也有待进一步厘清。

#### 3.1.5. 端对端能源交易的博弈论视角

博弈论方法可以模拟具有相冲突利益的实体间的决策过程, 并激励各实体相互竞争或合作以达成特定的目标, 因此在端对端能源交易的应用中有很大的潜力[69]。已有一些研究对博弈论方法在端对端能源交易中多方面的应用做了探讨。

基于非合作博弈的方法已被应用于模拟用户在端对端能源交易中的行为, 从而对端对端能源交易市场设计的性能做出评估。文献[20]计算了一个微电网中装有本地光伏和灵活负荷的能源产消者间的纳什均衡, 用于评估端对端能源交易的结果。文献[56]也用基于非合作博弈的方法对端对端能源交易中的用户行为进行了模拟。另外, 基于非合作博弈的拍卖方法也被一些文献[50]作为分布式端对端能源交易市场机制的核心基础。

基于斯坦伯格博弈的方法被一些研究用于建立分布式端对端能源交易市场中的定价机制。相关的例子包括文献[52] (其中, 市场协调者作为“领导者”, 而用户作为“跟随者”) 和文献[56] (其中, 卖电者作为“领导者”, 而买电者作为“跟随者”)。

如3.1.3节中所述, 基于合作博弈的方法可以作为分析端对端能源交易市场机制稳定性和竞争问题的理论基础。文献[64]采用经典联盟博弈作为构建端对端能源交易市场机制的基础, “内核”的概念被用于分析所构建市场的稳定性。

如文献[69]所总结, 已有各种各样的基于博弈理论

的方法被提出，但仅有非常小的一部分用于端对端能源交易的相关研究中。博弈理论是宝贵的资源库，未来可被进一步用于模拟用户的交易行为以及用于设计和评估端对端能源交易市场机制。

### 3.2. 交易平台

交易平台是端对端能源交易市场机制可以在现实中得以实施的基础。已有许多研究对支撑端对端能源交易的平台做了探讨。

根据所采用的支撑技术，端对端能源交易平台可以分为集中式平台和分布式平台。集中式平台方面，文献[20]提出了一个面向并网微电网端对端能源交易的集中式软件交易平台的概念设计，名为Elecbay。与电商平台eBay类似，电力生产者在Elecbay上放置需要卖出的电力，而电力消费者在Elecbay上下订单，订单指明了电力消费者想要购买的电能的数量和价格。电力零售商和配电网运营商也与Elecbay平台有通信，以平衡微电网内部无法平衡的功率和能量以及处理可能的网络约束越限问题。

另有许多研究和实践聚焦于利用区块链技术为端对端能源交易构建分布式的交易平台。综述文献[70]建立了基于区块链技术的微电网应用的分析框架，并总结了相关研究在学术界和工业界的潜在挑战和未来发展方向。区块链技术是一种创新的分布式账本技术，可以为不同主体间的交易建立一个可信任的、分布式的环境。从长期来看，支撑微电网中的端对端能源交易是区块链技术最重要的应用之一[71]。

区块链技术的去中心化特性与端对端能源交易的去中心化特性高度贴合。总的来说，用区块链技术支撑端对端能源交易有以下好处：

(1) 区块链技术可以取代端对端能源交易所需的第三方中介，从而节省相关间接费用，以及避免由第三方中介产生的道德风险；

(2) 区块链中的交易记录以链的形式存储于网络中的多个节点，由“共识机制”生成，受密码学保护，因此相关交易记录具有透明、防篡改以及免于单点故障风险的特点；

(3) 区块链平台支持可以自动执行的智能合约应用，从而可以降低合约订立、执行、合规等相关费用[72]，这对涉及大量低价值交易的端对端能源交易尤为有利。

考虑到上述特性，目前全球有许多利用区块链技术

支持端对端能源交易的工业试点和项目。其中一个非常著名的项目是由Transactive Grid公司主导的纽约的布鲁克林微电网项目。该项目建立了一个基于以太坊的区块链平台，并在平台上部署了智能合约、发行了相关代币用于支持端对端能源交易[73]。该项目分为两个阶段，第一阶段包括10个用户，第二阶段规模大大扩大，包括300个居民用户及一些商业用户。此外，全球还有许多不同规模、不同焦点的其他此类项目，详情参见表S3。文献[74]对全球这方面的项目也做了系统性综述，作为区块链技术在能源系统中应用的范例。

除了工业界的实践，也有许多学术研究探讨如何利用区块链技术支持端对端能源交易。文献[52]和[54]利用区块链技术建立了工业物联网中的端对端能源交易平台。文献[52]提出了一种基于联盟链的交易平台，用于支持微电网、能源收集网络（energy-harvesting network）以及电动汽车向电网提供辅助服务的网络（vehicle-to-grid network）。该研究还提出了一个基于信用的支付体系用于克服区块链技术在交易确认延迟上的缺点。文献[54]提出用安装本地储能方案解决基于区块链的端对端能源交易平台的区块链过长的问题，降低相关间接费用。文献[51]设计了一种用于电动车间端对端能源交易的联盟链平台，提升交易安全性和对隐私的保护。文献[75]在支持端对端能源交易的区块链平台中引入了多签名（multi-signature）和匿名信息流（anonymous messaging stream）技术，实现了很高的安全和隐私保护水平。

尽管如前文所述，学术界和工业界已经在利用区块链技术构建端对端能源交易平台方面做了很多努力，但遗憾的是仍然没有足够的证据证明基于区块链技术的分布式交易平台一定优于像Elecbay那样的集中式交易平台。尽管区块链技术具有可信任、透明、冗余度、防篡改以及去中心化等诸多优点，但是是否这些优点真的为端对端能源交易平台所必需仍是一个有待进一步厘清的问题。另外，用户愿意为这些优点付出多大的经济成本也是另一个需要考虑的问题。另一方面，尽管如前文所述，区块链技术可以支撑智能合约的部署，从而带来一系列好处，但事实上智能合约也可以部署在集中式的平台上（虽然基于区块链的智能合约可能具有更高的可信度）。最后，区块链技术本身也有许多缺点，如公有链往往需要较高的时间甚至能源开销以达成“共识”，而联盟链或私有链在可信度上有所妥协。因此，需要具

体情况具体分析——需要根据实际的应用环境和应用需求，具体分析什么样的交易平台最适合所要开展的端对端能源交易。

### 3.3. 物理和信息通信基础设施

在交易平台上达成端对端能源双边交易后，合同中的电量需要在指定的时间通过电力网络从一个用户送往另一个用户。在此过程中，需要一系列量测和通信设备的支持，以确保能源传输可以按时准确地进行。因此，物理和信息通信基础设施对实现端对端能源交易至关重要。

#### 3.3.1. 电力网络和相关技术安排

电力网络用于传输用户在端对端能源交易中所达成的电量。相关解决方案可以分为两类，如图9所示。

##### 3.3.1.1. 私有电力网络和相关控制策略

在物理上实现用户端对端电力传输的一个方案是在用户之间建设私有电力线路或网络。尽管随着分布式能源渗透率的提高和造价的降低，许多国家重新开启了关于建设私有电力网络的讨论，但电力系统的一些基本特征仍然没有改变——电力系统具有高沉没成本和低边际运行费用，具有规模经济、范围经济和密度经济的特性[76]。此外，未来投资、供电安全性、气候变化和政策法规等方面的长期不确定性进一步提升了建设私有电力网络的风险[77]。因此，为实现端对端能源交易而大规模建设私有电力网络依然不是一个经济的解决方案。目前，世界上大部分的电网也仍然在政府的监管下以自然垄断的方式运行。即使考虑到端对端能源交易的快速发展，目前这一结论也没有要改变或松动的迹象。

尽管如此，已有一些学术研究验证了私有电力网络在连接居民房舍和孤立微网上的技术可行性和相关控制策略。文献[78]提出了一套基于直流的开放能源系统，其中每户装有户内光伏和储能的房舍通过一个双向的DC-DC换流器与一个直流母线相连，并配有具有相应控制功能的软件系统。通过这个设计，电力可以在相连的居民房舍间流动。文献[79]提出了可以使互联直流微电网运行在不同电压水平的控制策略。文献[80]设计了一套可以控制互联孤立微电网间潮流的鲁棒控制体系。文献[81]提出通过将直流微电网互联提升供电可靠性。值得指出的是，文献[79-81]并非是直接针对端对端能源交易的相关应用，但它们建立的互联网络可以作为实现孤立微电网间端对端能源交易的物理基础设施。

总而言之，私有电力网络在技术上可以支持端对端能源交易，但在短期内看不到蓬勃发展的可能。尽管如此，已有一些学术研究在硬件配置和控制策略上做了有益探索。

##### 3.3.1.2. 公共电力网络和相关技术安排

另一个可以实现端对端能源交易相关电力传输的物理解决方案是利用公共电网，这也是世界上大多数国家目前采用的方案。在该解决方案中，公共电网就像一个巨大的“池子”，电力生产者往池中注入电力，而电力消费者从池中取用电力。池子中的电力基本是同质的，因此用户不能也无需区分自己所消耗的电力在物理上由谁供应。未来随着电力产品异质化(如3.1.2节所述)和电力路由设备[82,83]和算法[84,85]的发展(更多详情见文献[13,86])，这一情况可能会发生变化，但目前这些变化仍处于非常初级的阶段。

因此，一些人认为基于公共电网的端对端能源交易仅是一种虚拟的能量交易，并没有物理上的端对端电力

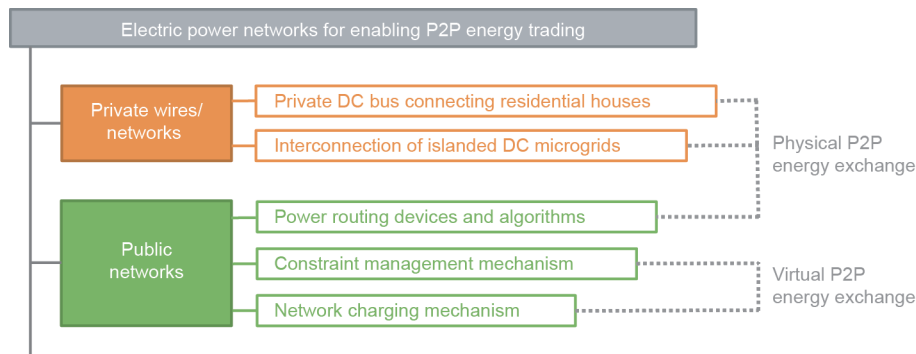


图9. 现有关于端对端能源交易物理基础设施的研究。



传输,因此更多的是一种市场和商业上的安排,而不是一种技术上的安排。然而,不同的端对端能源交易市场规则会激励用户采用不同的发用电模式,从而最终影响电网中的潮流分布。进一步地,即使不考虑用户在发用电模式上的灵活性,参与端对端能源交易的用户在不同程度上、以不同方式使用了公共电网,而这些都要被考虑到端对端能源交易的市场规则设计之中。

因此,已有许多研究在端对端能源交易的市场规则中考虑了相关技术安排。文献[50]基于灵敏度分析提出了一种检验一桩端对端能源交易是否会触发网络越限的机制,从而决定相应的端对端能源交易是否应该被批准。同时,该文献还探讨了如何更好地反映端对端能源交易对电力网络的使用程度,从而更合理地分配网络费用,激励用户更有效率地利用网络。文献[87]考虑了配电网络的三相不平衡潮流,将配电网络表达为一个多层的辐射状的图,进而为端对端能源交易提出了一套透明的电网损耗分配方案。文献[57]提出了包括平均计费、电力距离计费和区域计费在内的多种端对端能源交易过网费计算方案。所提方案的一大特点是这些方案都是“外源性的”(exogenous),因此可以很好地与大电网现行的规则相结合。文献[46]在其基于共识的端对端能源交易中提出了许多电力产品异质化的方案,其中过网费的加入和考虑可以作为一种电力产品异质化的依据。

尽管上述研究已经在端对端能源交易机制中考虑电力网络的相关问题方面做了非常有益的探索,但如何在端对端能源交易市场中考虑网络约束的处理还有待进一步研究。目前研究所提的网络费用分配模型,如基于网损的模型和基于距离的模型,依然比较简单,但事实上网络费用涉及诸如沉没成本回收、推迟网络升级改造、节点价格和分时价格(locational and ToU cost)等许多复杂因素,因此还有待进一步研究。此外,关于在不同场景下是采用私有网络还是公共网络(或是二者的结合)作为端对端能源交易物理基础设施的讨论和研究可以继续。孤立微电网互联以及新型电力路由设备和算法等可以支撑端对端能源交易的新型解决方案在未来也可以深入研究。

### 3.3.2. 信息通信基础设施和相关技术安排

端对端能源交易在协商、执行和清算等各个阶段均涉及大量的通信和信息。对集中式和分布式端对端能源交易市场而言,市场协调者与各个用户间需要大量的双

边通信;对分散式市场而言,各个用户间也需要大量的通信。因此,信息通信基础设施及其对端对端能源交易的影响是重要的研究课题[20]。

目前仅有少量研究在这一领域做了探索。文献[88]对支撑端对端能源交易和共享的点对点通信架构做了比较研究,在IEEE 1547.3-2007的要求之下评估了结构化(structured)和非结构化(unstructured)的点对点通信协议。评估结果表明两类通信协议都展现了良好的性能,可以支撑端对端能源交易的进行。文献[89]研究了端对端能源交易的投标和控制系统对信息通信基础设施的要求,在OPNET里建模和仿真了具有不同特性(如介质和带宽)的通信网络解决方案。结果表明现有信息通信基础设施,如有线宽带网络(wired broadband network)和基于GPRS的智能量测网络,足以支撑端对端能源交易的相关需求,不需要额外的大量投资。

未来研究方面,通信负荷和投资需求可以作为评价端对端能源交易市场机制和交易平台的一个重要维度。非理想通信条件[如通信延迟、畸变(distortion)和失败]对端对端能源交易的影响有待进一步评估。此外,面向端对端能源交易的通信网络优化配置和运行也有待进一步研究。

### 3.4. 社会科学视角

近年来,能源科学与社会科学研究相结合的重要性日益凸显。作为现代电力系统中一种创新的市场机制,端对端能源交易涉及大量的小用户,因此为能源-社会科学的相关研究和实践提供了新的研究课题和应用场景。已有一些研究从社会科学的视角对端对端能源交易进行了研究。

一个主要的研究方向是采用人类学方法对在端对端能源交易中的行为作出更贴近实际的建模,避免目前常用的理性人假设带来的偏差。有5篇论文在这个方向上做了探讨。文献[90]报道了在印度的两个离网村庄所做的为期11个月的人种学上的干预研究(an ethnographic “research intervention” study)。研究显示端对端能源交易带给人的回报不仅是经济上的回报,而是一个复杂的社会文化过程。除了现金回报,对另外两种回报模式——“实物回报”(in-kind return)和“无形回报”(intangible return)也进行了评估。研究最后建议端对端能源交易应考虑多样化的回报模式,考虑社会关系动态对端对端能源交易的影响。该研究说明了采用人类学方

法对设计和评估端对端能源交易市场的重要性。

文献[30]也从经济人类学 (economic anthropology) 的角度对居民房舍间的能源交换做了研究, 并发现了一种不同于“市场能源交换” (market energy exchange) 的另一种能源交换模式——“相互能源交换” (mutual energy exchange)。在市场意义上的端对端能源交易主要由理性的参与者参加, 并且常常由相应的公用事业公司塑造和监管。相反地, “相互能源交换”是能源提供者和能源接受者之间的一种社会化和个人化的能源交易模式, 由交易双方协商和塑造。“相互能源交换”牵涉各种社会关系和多样的文化价值。这些结论的取得均基于在印度农村进行的一个人类学干涉研究 (ethnographic intervention)。

文献[44]报道了对248个德国家庭的在线调查结果并进行了分析研究, 旨在研究人们购买私有储能设备的动机。相关研究成果对端对端能源交易也颇有启迪意义。研究表明“自足性” (autarky) (亦即能源供应的独立性) 和“自治性” (autonomy) (亦即用户自主控制用户设备的能力) 是两个重要的影响因素, 但只有自足性显著影响用户对私有储能设备的投资意愿。基于这些结果, 作者认为人们对自足性的偏好将降低端对端能源交易的可能性, 因为作者认为这使得人们在给自己的本地发电定价时会倾向于给出高于其实际价值的价格。基于这些结果, 我们认为可以有以下一个推论: 考虑到人们对自治性的损害并不敏感, 因此3.1.1.1节提到的集中式端对端能源交易市场对用户自治性的损害可能并不是一个严重的问题。

最后, 文献[64]从动机心理学 (motivational psychology) 的角度对端对端能源交易进行了评估, 并发现端对端能源交易满足“经济理性” (rational-economic) 和“正向增强” (positive reinforcement) 这两个性质。基于这些结果, 作者认为其提出的端对端能源交易市场是一个以用户为中心的 (consumer-centric) 机制。

从社会科学的视角对端对端能源交易进行研究的另一个方向是从宏观的角度研究端对端能源交易对社会发展的影响。文献[91]探讨了能源演进过程及其对全球社会经济结构的影响, 得到了如下结论: 基于“端对端微网” (P2P microgrid) 的“端对端电网” (P2P energy grid) 是未来很有潜力的能源供给新模式, 可以使社会从“基于商品或服务的集中式能源生产体系” (commodity/service-based centralized energy production) 向“基

于共享资源的能源生产和管理体系” (commons-based energy production and management) 转型。

### 3.5. 政策法规

目前电力行业的相关政策法规主要是针对传统垂直和单向的电力系统设计的, 因此越来越难以适应具有高渗透分布式能源的现代电力系统的需求。如何改革现有的政策法规体系以更好地适应电力行业内的各种变化正引发越来越多的讨论[21,69,70,92], 但截至目前, 在全球范围内还未见大规模的根本性变化, 原因有两个。第一, 政策法规的改革牵涉整个电力供应链上的众多利益主体的利益, 因此任何剧烈的改革都非常敏感, 需要非常小心; 第二, 新技术 (如3.2节阐述的区块链技术) 和新商业模式 (如3.1节阐述的各种端对端能源交易机制) 还在迅速发展, 尚未成型, 因此如何调整相关政策法规以适应新技术和新商业模式的变化还不明朗。

已有一些研究对端对端能源交易的相关政策法规问题做了探讨[21,69,70,92]。文献[21]强调端对端能源交易市场是支持配电系统调度更好地协调和管理分布式能源的潜在有力手段, 并建议调整配电系统的相关法规, 从而将配电系统的网络投资回收与其所提供的激励用户的信号联系起来。该研究还指出, 能够同时惠及配电系统调度、能源产消者且能同时实现社会和电力系统目标的政策法规调整还有待更深入的研究。

文献[69]指出, 将端对端能源交易考虑到现有的能源政策中非常重要, 要解决如下几个问题: 第一, 哪些或怎样的市场机制设计是被允许的; 第二, 如何分配各种税费; 第三, 如何处理端对端能源交易市场和传统电力市场的关系。该研究还指出, 政府可以根据端对端能源交易对可再生能源利用、环境保护及现行电力市场/系统的实际影响, 决定是采取鼓励、引导还是抑制的政策。

文献[70]认为政策法规是一个更广泛的概念——“制度” (institutions的一环), 制度既包括正式的政策、标准和法规, 也包括非正式的范式和惯例。该研究指出目前端对端能源交易方面的政策法规落后于技术的发展, 因此需要进行改革。该研究建议端对端能源交易相关政策法规的可能改革方向包括: ①厘清所有权模型和各主体间的关系模型; ②能源产消者的证照管理; ③各市场主体角色的界定和相关安排。

最后, 文献[92]分析了区块链技术下电力用户角色

的转变，并对其对欧盟电力相关法规的影响做了分析。尽管这一研究主要针对区块链技术下的电力系统，但其结果对端对端能源交易相关法规的改革具有很好的借鉴意义。该研究指出，在欧盟关于电力行业的相关法律架构中，不存在“一体通用”(one-size-fits-all)的完美方案，相关法规的改革应主要回答以下3个问题：①如何在电力供应和传输中定义和分配分散式的责任；②如何为用户投资和利用灵活性提供激励；③如何在用户的责任和对用户的保护中寻求合理的平衡。

总之，尽管上述研究对端对端能源交易的相关政策法规问题从不同角度做了探讨，但主要还是比较高层次的讨论，具体的政策法规细节和具体应如何进行改革有待进一步的研究。截至目前，在全球范围内还未见关于端对端能源交易的大规模政策法规改革。

## 4. 结论

作为有望解决人类社会“能源三元悖论”的一种重要手段，端对端能源交易在近年得以涌现并快速发展。基于对相关学术论文、研究项目和工程实践的综合调研，总结并分析了端对端能源交易的全球发展现状。调研结果显示，端对端能源交易吸引了全球学术界和工业界越来越多的关注，该领域的学术论文和科研、工程项目增长迅速。

本文总结并讨论了端对端能源交易的5个主要方面，包括市场机制设计、交易平台、物理和信息通信基础设施、社会科学视角以及政策法规。针对每个方面，对现有相关研究和实践均进行了批判性分析并就未来的发展方向做出了展望。研究结果显示尽管已有很多研究从不同角度对端对端能源交易做了许多工作，但仍有许多问题有待进一步研究和解决，因此端对端能源交易在未来将是一个不断上升和发展的领域，在学术界和工业界都会有许多机会。关于端对端能源交易全球发展图景和主要研究方面的结论详述如下。

### 4.1. 端对端能源交易全球发展图景

本文展示的端对端能源交易全球发展图景建立在对超过30篇学术论文、8个科研项目和20个工程项目的调研的基础上。学术论文方面，在2018年，端对端能源交易的相关论文有一个爆发式增长，并且这一趋势在2019年得以延续，显示端对端能源交易在全球学术

界已成为一个热点研究议题。英国、澳大利亚、中国、美国、新加坡和欧洲其他国家贡献了该领域大多数的期刊论文。大多数论文主要聚焦于端对端能源交易市场机制设计。

科研项目方面，诸如欧盟地平线2020计划的P2P-SmarTest项目和英国P2P-3M项目等的科研项目在各国展开，覆盖了端对端能源交易的所有主要方面。

许多端对端能源交易的相关试点和工程项目在全球展开，其中大多数项目在欧洲和美国。在所调研的项目中，70%的项目聚焦于本地范围内的端对端能源交易，30%的项目聚焦于更大的区域范围甚至全国范围内的端对端能源交易。几乎所有所调研的工程项目都利用区块链技术支持端对端能源交易，显示了区块链技术在端对端能源交易中的巨大潜力。

### 4.2. 市场机制设计

端对端能源交易的市场机制可以分为集中式市场、分散式市场以及分布式市场。集中式市场的优点在于能够实现整个端对端能源交易集体总收益的最大化，以及其结果的稳定性和低不确定性；集中式市场的缺点在于计算和通信负担重、可扩展性和可靠性较差，以及在隐私和安全性上的隐患。分散式市场基本上与集中式市场有完全相反的优缺点。分布式市场是集中式市场和分散式市场的中间方案，结合了二者的优缺点。端对端能源交易市场机制设计方面的未来研究方向包括克服和改善各类市场机制的固有缺点，以及兼容更多的功能，例如，为电力系统进一步提供包括削峰填谷、频率响应、电压支撑等在内的辅助服务。

电力产品的异质化是端对端能源交易很有潜力的一个发展方向。现有研究和实践主要从时间、距离和类型（如绿色电力、补贴电力和电网电力等不同类型）三方面对电力产品进行区别。未来可以对电力产品进行进一步的异质化，如基于电能质量的异质化、基于供电可靠性的异质化等。

市场稳定性是端对端能源交易应用于实际的一个重要问题。为提升市场稳定性，针对集中式市场和分散式/分布式市场，未来可分别在利益分配机制和定价机制方面进行深入研究。另外，在端对端能源交易中，用户会如何组成联盟（或用户会如何在多个端对端能源交易服务提供商间进行选择）是另一个重要议题。

已有许多研究对端对端能源交易市场与现行电力批



发/零售市场间的关系进行了探讨，但随着端对端能源交易市场在未来的大范围铺开，端对端能源交易市场将不再能被视作“价格接受者”。未来研究应将端对端能源交易视作“价格制定者”，并对其与现行电力批发/零售市场的关系做更深入的探讨。

非合作博弈、斯坦伯格博弈和合作博弈方法已在一些端对端能源交易研究中应用。博弈论包含许多方法，适合解决端对端能源交易中各利益冲突主体的互动、竞争和合作问题，在端对端能源交易的研究和实践中具有很大的潜力。

#### 4.3. 交易平台

端对端能源交易平台可以分为集中式平台和分布式平台。集中式平台的工作原理类似eBay等电商平台，具体例子如文献[20]所提的ElecBay。另有许多学术论文和工程项目探讨和建立了基于区块链技术的分布式端对端能源交易平台。在学术论文中，基于区块链技术的平台被应用于如工业物联网等的多种应用场景，另外也提出了多种可以缩短区块链长度、提升区块链隐私和安全性保障水平的具体技术。在工程项目中，许多基于区块链技术的交易平台投入了实际测试和使用。

尽管绝大多数学术研究和工程项目青睐基于区块链技术的分布式交易平台，但在实际应用中，针对每一个应用，应进行具体的成本效益分析，以决定采用集中式还是分布式交易平台。尽管区块链技术具有很多优点（如可信性、透明度、冗余度以及防篡改、减少中间环节等），但其成本（如共识机制牵涉的时间和能源成本）和一些缺点也应被考虑。另外值得指出的是，不应将智能合约的优点和区块链技术的优点混为一谈，事实上，集中式交易平台也可以部署智能合约。

端对端能源交易平台的未来研究方向包括：①在成本效益分析的基础上，为具体应用场景选择合适的端对端能源交易平台；②分析并解决基于区块链技术的分布式交易平台在高时间/能源开销、有限可扩展性、信息安全等方面的问题和缺点；③将智能合约和区块链技术分开来看，具体分析应该用集中式交易平台还是基于区块链技术的分布式平台部署智能合约。

#### 4.4. 物理和信息通信基础设施

支撑端对端能源交易的物理电力网络可以分为私有电力网络和公共电力网络。已有学术研究对支撑楼宇和

孤立微网间端对端能源交易的私有电力网络及相应的控制策略做了探讨，但在现实中并没有在短期内大规模铺开的可能。公用电力网络是目前支撑端对端能源交易的主要现实方案。目前公用电网扮演了一个“大池子”的角色，参与端对端能源交易的用户并没有真正在物理上端对端地交换电能。目前已有研究对使用公共电网支撑端对端能源交易的相关技术安排做了探讨，包括网络约束越限检查、网络损耗和使用的分配算法等，旨在使相关市场机制更好地反映用户对公共电网的实际使用程度，以及激励用户尽量以对电网有利的方式使用电网。未来的相关研究可在端对端能源交易的相关网络费用中考虑更现实的因素，包括沉没网络投资回收、推迟网络升级改造和分时价格等。关于使用私有电力网络还是公共电网支撑端对端能源交易的讨论在未来可以继续。此外，电力路由设备和算法的研究进展可能在未来使物理上的端对端能源交换成为可能。

#### 4.5. 社会科学视角

端对端能源交易牵涉大量的小用户，因此为能源-社科的相关研究和实践提出了新的问题，并提供了新的应用场景。现有的社会学、人类学和心理学研究建议在端对端能源交易中考虑多样化的回报模式（包括现金回报、实物回报和无形回报）以及社会关系的动态。研究还发现除了在市场机制中实现的端对端能源交易，还有另一种“相互能源交易”存在，其交易模式主要由交易双方共同塑造，涉及各种社会关系及多样化的文化价值。现有研究还调查分析了人们对能源“自足性”和“自治性”的态度及其对端对端能源交易的影响。端对端能源交易从动机心理学的角度看是一种以用户为中心的机制。此外，端对端能源交易被认为是一种可以促进社会从“以商品为中心的能源生产”向“以共享为中心的能源生产”转型的重要架构。

现有针对端对端能源交易的社会学、人类学和心理学研究仅考虑了非常有限的文化背景（印度农村和德国）和有限的端对端能源交易模式和机制。因此未来的相关研究可以涵盖更加广泛的文化背景，以及包括更加多样的端对端能源交易机制和场景，如电动汽车间的端对端能源交易以及基于拍卖机制的端对端能源交易等。

#### 4.6. 政策法规

当前电力行业中的相关政策法规主要面向传统电力

系统，因此需要改革以适应端对端能源交易的发展。鉴于政策法规改革的巨大影响和端对端能源交易仍处于不成熟的阶段，目前全球范围内仍没有大规模的关于端对端能源交易的政策法规调整。现有研究表明，对于端对端能源交易，没有“一体通用”的解决方案，需要具体情况具体分析。

未来政策法规方面关于端对端能源交易的研究和发展方向包括：①定义端对端能源交易市场和其中的能源生产消费者的角色与责任；②探索端对端能源交易市场与现行电力市场，以及其他诸如配电系统运营商之类的主体的关系；③制定适宜于端对端能源交易的税费分摊机制；④纳入灵活性的激励机制；⑤给端对端能源交易中的弱势用户提供保护。

## Acknowledgements

This work was supported in part by the Horizon 2020 project P2P-SmarTest, EPSRC Supergen Hub on Energy Networks (EP/S00078X/1) and MISTRAL (EP/N017064/1).

## Compliance with ethics guidelines

Yue Zhou, Jianzhong Wu, and Chao Long at Cardiff University participated in the P2P-SmarTest project under the Horizon 2020 programme of European Commission. Yue Zhou, Jianzhong Wu, Chao Long, and Wenlong Ming declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.06.002>.

## References

- [1] World Energy Council. World energy trilemma [Internet]. London: World Energy Council; 2017 [cited 2019 Jul 3]. Available from: <https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/world-energy-trilemma-index>.
- [2] International Energy Agency. WEO-2014 special report: world energy investment outlook [Internet]. Paris: International Energy Agency; 2014 Jun 3 [cited 2019 Mar 20]. Available from: <https://webstore.iea.org/weo-2014-special-report-world-energy-investment-outlook>.
- [3] Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Overview [Internet]. Beijing: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization; [cited 2019 Mar 20]. Available from: <https://en.geidco.org/>.
- [4] Ofgem. Ofgem's future insights paper 3 local energy in a transforming energy system [Internet]. London: Ofgem; 2017 Jan 30 [cited 2019 Mar 25]. Available from: <https://www.ofgem.gov.uk/publications-and-updates/ofgem-futureinsights-series-local-energy-transforming-energy-system>.
- [5] Economist Intelligence Unit. The global energy conversation part II: solutions to 2050 [Internet]. London: The Economist group; [cited 2019 Jul 3]. Available from: [http://www.economist.com/sites/default/files/gec2\\_2011\\_summary\\_paper\\_a4\\_v20\\_web.pdf](http://www.economist.com/sites/default/files/gec2_2011_summary_paper_a4_v20_web.pdf).
- [6] Energy UK. Pathways for the GB electricity sector to 2030 chapter 2: whole system approach [Internet]. London: EnergyUK; [cited 2019 Jul 3]. Available from: <https://www.energy-uk.org.uk/publication.html?task=file.download&id=5719>.
- [7] Hong B, Zhang W, Zhou Y, Chen J, Xiang Y, Mu Y. Energy-Internet-oriented microgrid energy management system architecture and its application in China. *Appl Energy* 2018;228:2153–64.
- [8] 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. *Energy Policy* 2018;118:516–33.
- [9] US Energy Information Administration. Electricity explained: how electricity is delivered to consumers [Internet]. Washington, DC: US Energy Information Administration; [cited 2019 Jul 14]. Available from: [https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=electricity\\_delivery](https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=electricity_delivery).
- [10] Cui X. The UK electricity markets: its evolution, wholesale prices and challenge of wind energy [dissertation]. Stirling: University of Stirling; 2010.
- [11] Rodríguez-Molina J, Martínez-Núñez M, Martínez J, Pérez-Aguilar W. Business models in the smart grid: challenges, opportunities and proposals for prosumer profitability. *Energies* 2014;7(9):6142–71.
- [12] Wang C, Wang D, Zhou Y. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system. *Autom Elctr Power Syst* 2015;39(9):2–9. Chinese.
- [13] Zhong W, Yu R, Xie S, Zhang Y, Tsang DHK. Software defined networking for flexible and green energy Internet. *IEEE Commun Mag* 2016;54(12):68–75.
- [14] UK Research and Innovation. Peer-to-peer energy trading and sharing 3M (multi-times, multi-scales, multi-qualities) [Internet]. Swindon: UK Research and Innovation; [cited 2019 Jul 15]. Available from: <https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FN03466X%2F1>.
- [15] Verv Energy. The sharing economy: let's talk about the 'peer-to-peer' in energy trading [Internet]. [cited 2019 Jul 15]. Available from: <https://medium.com/@VervEnergy/the-sharing-economy-lets-talk-about-the-peer-to-peer-in-energytrading-e4e679307f89>.
- [16] Zhou Y, Wu J, Long C, Cheng M, Zhang C. Performance evaluation of peer-to-peer energy sharing models. *Energy Procedia* 2017;143:817–22.
- [17] Zhou Y, Wu J, Long C. Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework. *Appl Energy* 2018;222: 993–1022.
- [18] Electricity's future may be peer-to-peer. *Electr J* 2016;29(6):3–4.
- [19] Papadaskalopoulos D, Strbac G. Decentralized participation of flexible demand in electricity markets—part I: market mechanism. *IEEE Trans Power Syst* 2013;28(4):3658–66.
- [20] Zhang C, Wu J, Zhou Y, Cheng M, Long C. Peer-to-peer energy trading in a microgrid. *Appl Energy* 2018;220:1–12.
- [21] Morstyn T, Farrell N, Darby SJ, McCulloch MD. Using peer-to-peer energytrading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. *Nat Energy* 2018;3(2):94–101.
- [22] European Commission. P2P-SmarTest [Internet]. Brussels: European Commission; [cited 2019 Mar 20]. Available from: <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-energy/grids/p2p-smartest>.
- [23] Li F, Strbac G, Jeon J, McCulloch M, Adebisi B, Li R. Peer-to-peer energy trading and sharing 3M (multi-times, multi-scales, multi-qualities) [Internet]. Swindon: EPSRC; 2016 Sep 1 [cited 2019 Mar 20]. Available from: <https://gow.epsrc.ukri.org/NGBOViewGrant.aspx?GrantRef=EP/N03466X/1>.
- [24] The Energy Collective. The energy collective project—towards direct sharing and trading of electric energy! [Internet]. Copenhagen: The Energy Collective; [cited 2019 Mar 20]. Available from: <https://the-energy-collective-project.com/>.
- [25] Verma P, O'Regan B, Hayes B, Thakur S, Breslin JG. EnerPort: Irish Blockchain project for peer-to-peer energy trading. *Energy Inf* 2018;1(14):1–9.
- [26] European Commission. Neighbourhood Oriented Brokerage Electricity and monitoring system [Internet]. Brussels: European Commission; [cited 2019 Mar 20]. Available from: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/94044/factsheet/en>.
- [27] The University of Queensland. Peer-to-peer energy trading schemes for sustainable cities (2017–2020) [Internet]. St Lucia: The University of Queensland; [cited 2019 Mar 20]. Available from: <http://researchers.uq.edu.au/research-project/31099>.
- [28] Software-Cluster. Peer energy cloud—efficient energy management from the cloud [Internet]. Weilerbach: Software-Cluster; [cited 2019 Mar 20]. Available from: <http://oldweb.software-cluster.com/en/research/projects/partnerprojects/peer-energy-cloud>.
- [29] UK Research and Innovation. Street2Grid—an electricity blockchain platform for P2P energy trading [Internet]. Swindon: UK Research and Innovation; [cited 2019 Mar 20]. Available from: <https://gtr.ukri.org/projects?ref=EP%2FS001778%2F1>.

- [30] Singh A, Strating AT, Romero Herrera NA, van Dijk HW, Keyson DV. Towards an ethnography of electrification in rural India: social relations and values in household energy exchanges. *Energy Res Soc Sci* 2017;30:103–15.
- [31] Da Silva PG, Ilic' D, Karnouskos S. The impact of smart grid prosumer grouping on forecasting accuracy and its benefits for local electricity market trading. *IEEE Trans Smart Grid* 2014;5(1):402–10.
- [32] Velik R, Nicolay P. Grid-price-dependent energy management in microgrids using a modified simulated annealing triple-optimizer. *Appl Energy* 2014;130:384–95.
- [33] Luo Y, Itaya S, Nakamura S, Davis P. Autonomous cooperative energy trading between prosumers for microgrid systems. In: Proceedings of the 39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops; 2014 Sep 8–11; Edmonton, AB, Canada; 2014. p. 1–4.
- [34] Mihaylov M, Jurado S, Avellana N, van Moffaert K, de Abril IM, Nowé A. NRGcoin: virtual currency for trading of renewable energy in smart grids. In: Proceedings of the 11th International Conference on the European Energy Market; 2014 May 28–30; Krakow, Poland; 2014. p. 1–6.
- [35] Cui T, Wang Y, Nazarian S, Pedram M. An electricity trade model for multiple power distribution networks in smart energy systems. In: Proceedings of the 2014 IEEE PES General Meeting; 2014 Jul 27–31; National Harbor, MD, USA; 2014. p. 1–5.
- [36] Mohn T, Piasecki R. A smarter grid enables communal microgrids. In: Proceedings of the 2011 IEEE Green Technologies Conference; 2011 Apr 14–15; Baton Rouge, LA, USA; 2011. p. 1–6.
- [37] Ilic D, Da Silva PG, Karnouskos S, Griesemer M. An energy market for trading electricity in smart grid neighbourhoods. In: Proceedings of the 2012 6th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies; 2012 Jun 18–20; Campione d'Italia, Italy; 2012. p. 1–6.
- [38] Long C, Wu J, Zhou Y, Jenkins N. Peer-to-peer energy sharing through a twostage aggregated battery control in a community Microgrid. *Appl Energy* 2018;226:261–76.
- [39] Nguyen S, Peng W, Sokolowski P, Alahakoon D, Yu X. Optimizing rooftop photovoltaic distributed generation with battery storage for peer-to-peer energy trading. *Appl Energy* 2018;228:2567–80.
- [40] Lüth A, Zepter JM, del Granado PC, Egging R. Local electricity market designs for peer-to-peer trading: the role of battery flexibility. *Appl Energy* 2018;229:1233–43.
- [41] Hou W, Guo L, Ning Z. Local electricity storage for blockchain-based energy trading in industrial Internet of things. *IEEE Trans Ind Inf* 2019;15(6):3610–9.
- [42] Zepter JM, Lüth A, del Granado PC, Egging R. Prosumer integration in wholesale electricity markets: synergies of peer-to-peer trade and residential storage. *Energy Build* 2019;184:163–76.
- [43] Alam MR, St-Hilaire M, Kunz T. Peer-to-peer energy trading among smart homes. *Appl Energy* 2019;238:1434–43.
- [44] Ecker F, Spada H, Hahnel UJJ. Independence without control: autarky outperforms autonomy benefits in the adoption of private energy storage systems. *Energy Policy* 2018;122:214–28.
- [45] Morstyn T, Teytelboym A, McCulloch MD. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading. *IEEE Trans Smart Grid* 2019;10(2):2026–35.
- [46] Sorin E, Bobo L, Pinson P. Consensus-based approach to peer-to-peer electricity markets with product differentiation. *IEEE Trans Power Syst* 2019;34(2):994–1004.
- [47] Devine MT, Cuffe P. Blockchain electricity trading under demurrage. *IEEE Trans Smart Grid* 2019;10(2):2323–5.
- [48] Luo F, Dong ZY, Liang G, Murata J, Xu Z. A distributed electricity trading system in active distribution networks based on multiagent coalition and blockchain. *IEEE Trans Power Syst* 2019;34(5):4097–108.
- [49] Guerrero J, Chapman A, Verbič G. A study of energy trading in a low-voltage network: centralised and distributed approaches. In: Proceedings of the 2017 Australasian Universities Power Engineering Conference; 2017 Nov 19–22; Melbourne, VIC, Australia; 2017. p. 1–6.
- [50] Guerrero J, Chapman AC, Verbič G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network. *IEEE Trans Smart Grid* 2019;10(5):5163–73.
- [51] Kang J, Yu R, Huang X, Maharjan S, Zhang Y, Hossain E. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains. *IEEE Trans Ind Inf* 2017;13(6):3154–64.
- [52] Li Z, Kang J, Yu R, Ye D, Deng Q, Zhang Y. Consortium blockchain for secure energy trading in industrial Internet of things. *IEEE Trans Ind Inf* 2018;14(8):3690–700.
- [53] Long C, Wu J, Zhang C, Thomas L, Cheng M, Jenkins N. Peer-to-peer energy trading in a community microgrid. In: Proceedings of the 2017 IEEE PES General Meeting; 2017 Jul 16–20; Chicago, IL, USA; 2017. p. 1–5.
- [54] Alvaro-Hermana R, Fraile-Ardanuy J, Zufiria PJ, Knäpen L, Janssens D. Peer-to-peer energy trading with electric vehicles. *IEEE Intell Transp Syst Mag* 2016;8(3):33–44.
- [55] Morstyn T, McCulloch MD. Multi-class energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences. *IEEE Trans Power Syst* 2019;34(5):4005–14.
- [56] Paudel A, Chaudhari K, Long C, Gooi HB. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: a game-theoretic model. *IEEE Trans Ind Electron* 2018.
- [57] Baroche T, Pinson P, Latimier RLG, Ahmed HB. Exogenous cost allocation in peer-to-peer electricity markets. *IEEE Trans Power Syst* 2019;34(4):2553–64.
- [58] Chen T, Su W. Indirect customer-to-customer energy trading with reinforcement learning. *IEEE Trans Smart Grid* 2019;10(4):4338–48.
- [59] Liu N, Yu X, Wang C, Li C, Ma L, Lei J. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers. *IEEE Trans Power Syst* 2017;32(5):3569–83.
- [60] Paterakis NG, Erdinç O, Catalão JPS. An overview of demand response: keyelements and international experience. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:871–91.
- [61] Zhang S, Qin X. Lessons learned from China's residential tiered electricity pricing reform [Internet]. Winnipeg: The International Institute for Sustainable Development; 2015 [cited 2019 Jul 10]. Available from: [https://www.iisd.org/gsi/sites/default/files/ffsr\\_china\\_lessons\\_learned\\_may\\_2015.pdf](https://www.iisd.org/gsi/sites/default/files/ffsr_china_lessons_learned_may_2015.pdf).
- [62] BC Hydro. Evaluation of the residential inclining block rate [Internet]. [cited 2019 Jul 10]. Available from: <https://www.bchydro.com/content/dam/BCHydro/customer-portal/documents/corporate/regulatory-planningdocuments/revenue-requirements/10-RIB-Evaluation-report.pdf>.
- [63] Smart Energy International. Introduction of inclining block tariffs benefits low income domestic customers in South Africa [Internet]. Rondebosch: Smart Energy International; 2012 Jun 15 [cited 2019 Jul 10]. Available from: <https://www.smart-energy.com/regional-news/africa-middle-east/introduction-of-inclining-block-tariffs-benefits-low-income-domestic-customers-in-southafrica/>.
- [64] Tushar W, Saha TK, Yuen C, Liddell P, Bean R, Poor HV. Peer-to-peer energy trading with sustainable user participation: a game theoretic approach. *IEEE Access* 2018;6:62932–43.
- [65] Wu FF, Varaiya PP, Hui RSY. Smart grids with intelligent periphery: an architecture for the energy Internet. *Engineering* 2015;1(4):436–46.
- [66] Jones R, Haley B, Kwok G, Hargreaves J, Williams J. Electrification and the future of electricity markets: transitioning to a low-carbon energy system. *IEEE Power Energy Mag* 2018;16(4):79–89.
- [67] Litvinov E, Zhao F, Zheng T. Electricity markets in the United States: power industry restructuring processes for the present and future. *IEEE Power Energy Mag* 2019;17(1):32–42.
- [68] Sousa T, Soares T, Pinson P, Moret F, Baroche T, Sorin E. Peer-to-peer and community-based markets: a comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;104:367–78.
- [69] Tushar W, Yuen C, Mohsenian-Rad H, Saha T, Poor HV, Wood KL. Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading: the potential of game theoretic approaches. *IEEE Signal Process Mag* 2018;35(4):90–111.
- [70] Ahl A, Yarime M, Tanaka K, Sagawa D. Review of blockchain-based distributed energy: implications for institutional development. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;107:200–11.
- [71] Brilliantova V, Thurner TW. Blockchain and the future of energy. *Technol Soc* 2019;57:38–45.
- [72] Walport M. Distributed ledger technology: beyond block chain [Internet]. London: GOV.UK; 2016 Jan 19 [cited 2019 Jul 10]. Available: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/492972/gs-16-1-distributed-ledger-technology.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/492972/gs-16-1-distributed-ledger-technology.pdf).
- [73] Mengelkamp E, Gärtner J, Rock K, Kessler S, Orsini L, Weinhardt C. Designing microgrid energy markets: a case study: the Brooklyn microgrid. *Appl Energy* 2018;210:870–80.
- [74] Andoni M, Robu V, Flynn D, Abram S, Geach D, Jenkins D, et al. Blockchain technology in the energy sector: a systematic review of challenges and opportunities. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;100:143–74.
- [75] Aitzhan NZ, Svetinovic D. Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams. *IEEE Trans Depend Secure Comput* 2018;15(5):840–52.
- [76] Kahn AE. The economics of regulation: institutional issues. New York: Wiley; 1971.
- [77] Nepal R, Foster J. Electricity networks privatization in Australia: an overview of the debate. *Econ Anal Policy* 2015;48:12–24.
- [78] Werth A, Kitamura N, Tanaka K. Conceptual study for open energy systems: distributed energy network using interconnected DC nanogrids. *IEEE Trans Smart Grid* 2015;6(4):1621–30.
- [79] Kumar M, Srivastava SC, Singh SN, Ramamoorthy M. Development of a control strategy for interconnection of islanded direct current microgrids. *IET Renew Power Gener* 2015;9(3):284–96.
- [80] Hossain MJ, Mahmud MA, Milano F, Bacha S, Hably A. Design of robust distributed control for interconnected microgrids. *IEEE Trans Smart Grid* 2016;7(6):2724–35.
- [81] Konar S, Ghosh A. Interconnection of islanded DC microgrids. In: Proceedings of 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference; 2015 Nov 15–18; Brisbane, QLD, Australia; 2015. p. 1–5.
- [82] Nguyen PH, Kling WL, Ribeiro PF. Smart power router: a flexible agent-based converter interface in active distribution networks. *IEEE Trans Smart Grid* 2011;2(3):487–95.
- [83] Sánchez-Squella A, Ortega R, Griño R, Malo S. Dynamic energy router. *IEEE Control Syst Mag* 2010;30(6):72–80.
- [84] Ma J, Song L, Li Y. Optimal power dispatching for local area packetized power network. *IEEE Trans Smart Grid* 2018;9(5):4765–76.
- [85] Wang R, Wu J, Qian Z, Lin Z, He X. A graph theory based energy routing



- algorithm in energy local area network. *IEEE Trans Ind Inf* 2017;13 (6):3275–85.
- [86] Abdella J, Shuaib K. Peer to peer distributed energy trading in smart grids: a survey. *Energies* 2018;11(6):1560.
- [87] Nikolaidis AI, Charalambous CA, Mancarella P. A graph-based loss allocation framework for transactive energy markets in unbalanced radial distribution networks. *IEEE Trans Power Syst* 2019;34(5):4109–18.
- [88] Jogunola O, Ikpehai A, Anoh K, Adebisi B, Hammoudeh M, Gacanin H, et al. Comparative analysis of P2P architectures for energy trading and sharing. *Energies* 2018;11(1):62.
- [89] Zhang C. Peer-to-peer energy trading in electrical distribution networks [dissertation]. Cardiff: Cardiff University; 2017.
- [90] Singh A, Strating AT, Herrera NAR, Mahato D, Keyson DV, van Dijk HW. Exploring peer-to-peer returns in off-grid renewable energy systems in rural India: an anthropological perspective on local energy sharing and trading. *Energy Res Soc Sci* 2018;46:194–213.
- [91] Giotitsas C, Pazaitis A, Kostakis V. A peer-to-peer approach to energy production. *Technol Soc* 2015;42:28–38.
- [92] Diestelmeier L. Changing power: shifting the role of electricity consumers with blockchain technology—policy implications for EU electricity law. *Energy Policy* 2019;128:189–96.