

需求侧能量共享:概念、机制与展望

陈 玥^{1,2}, 刘 锋^{1,2}, 魏 韩^{1,2}, 梅生伟^{1,2}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要: 分布式可再生能源的蓬勃发展为建设清洁高效智能电网提供了新途径,但同时也导致了需求侧用户行为更随机、能量管理更困难、设备利用更低效等问题。为应对这些新挑战,充分调动需求侧灵活性,能量共享作为一种分布式运营新范式应运而生。文中给出了需求侧能量共享的概念,分析了其在平抑不确定性、提升运行经济性和提高设备利用效率等方面的潜力,并对能量共享机制的设计要点及基本要求进行了详细阐述。在此基础上,从合作博弈与非合作博弈2个角度将国内外能量共享机制设计相关研究归纳为5类,总结了当前的研究进展与亟待解决的问题。最后,从需求侧能量共享市场内部设计与外部衔接2个方面,对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 分布式能源; 需求侧; 能量共享; 博弈建模; 供需匹配

0 引言

为应对气候变化和能源短缺,大力开发分布式可再生能源已成为未来电力系统的发展方向^[1]。尽管国内分布式能源起步较晚,但势头强劲。2019年国内分布式光伏新增装机容量12.2 GW,同比增长达41.3%;新增生物质能发电装机容量4.73 GW,且有望于2020年达到30 GW^[2]。可再生能源的分布式接入为有效解决全球气候变暖、能源匮乏等问题提供了新途径,但其出力随机性强、单机容量较小、数量庞大、分布广泛等特点给电力系统安全经济运行带来了新挑战,主要体现在如下3个方面。

1) 用户行为更随机。海量分布式可再生能源的接入,促使传统“消费者”向既能生产电能又能消费电能的“产消者”转型^[3]。产消者可通过对电能生产和使用的协调分配,主动参与需求侧能量管理,有望提高能源利用效率^[4]。产消者拥有更灵活的调节手段和更大的调节空间,且自身发电规模较小,其行为难以预测,导致用户行为更具随机性。

2) 能量管理更困难。分布式接入的能源常隶属于不同的主体,利益不一致和信息不对称的现象广泛存在^[5]。各主体单独决策以最大化自身收益,

常造成显著的需求侧供需不匹配问题,即在部分主体生产/调节能力短缺的同时,另一部分主体有大量闲置能力未得到充分利用。

3) 设备利用更低效。需求侧日益增高的可再生能源渗透比,伴随着随机性增大的用户行为,对系统的不确定性消纳能力提出了更高的要求。为保证电能的可靠稳定供应,需配备更多的储能等作为备用,设备利用效率低。

面对上述新挑战,传统零售商集中管理用户的模式^[6]一方面难以满足日益增长的对计算复杂度和信息私密度的要求,另一方面难以协调各参与者间的利益不一致性^[7]。因此,亟需提出一种能打破常规的需求侧运营新模式。事实上,类似的矛盾也广泛存在于日常生活之中,而近年来兴起的共享经济,为解决此类问题提供了新范式^[8]。将“共享”思维引入电力领域,允许用户直接交易,通过竞争形成合理共享市场价格,有望达到邻近供需配对、就地平衡、物尽其用的效果。

本文详细分析了分布式能源海量带来的挑战,提出了需求侧能量共享的概念,总结了当前国内外能量共享机制设计方面的研究进展,并对未来的研究方向进行了展望。

1 需求侧能量共享

1.1 需求侧能量共享的概念

分布式能源海量对需求侧运营模式提出了新要求,一种可能的思路是借鉴共享经济的理念。从

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-09-27。

上网日期: 2020-11-23。

国家自然科学基金委员会—国家电网公司智能电网联合基金资助项目(U1966601); 国家自然科学基金重点项目(U1766203)。

初始的近邻间的简单交换,到以云储能^[9]为代表的集中管理资源、分布式租用的共享平台,再到以Uber和Airbnb为代表的大规模用户间相互交换的共享模式,共享的对象日益丰富、范围日趋广泛。共享经济的本质是资源的拥有者在某段时间内让渡资源的“使用权”,使其暂为“公共资源”,供有需要的人使用;而使用者在不拥有资源“所有权”的前提下得以使用该资源,即实现了资源“所有权”和“使用权”的两权暂时分离。本文将共享的理念拓展至电力领域,并提出“能量共享”的概念。

定义:能量共享是一种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。

在此定义中,能量共享的主体包括可响应负荷、产消者、储能拥有者等有调节能力的参与者;买卖关系是其主要的实现形式(一般认为无偿共享是赠与)。在能量共享中,“闲置”的是优质的生产/调节能力,并最终通过电能的实际使用体现出来,在参与者间形成共享。作为一种基本的电网物理规律,在任何时间点注入电网的发电量总等于用电量(包括储能的存储电量)加上传输损耗,从这个角度,电能总是实时平衡的。同时,为促进电网高效运营,更希望达到的是“理想”的发电/用电量实时平衡,而不只是“实际”发电/用电量实时平衡。所谓“理想”,即是达到发电/用电量实时平衡的“最佳”策略,如成本最低、收益最大等。由于优质生产/调节能力的闲置所导致的“理想”发电/用电量与“实际”发电/用电量间的差额,称为“闲置电能”。

能量共享的两大特征是:①“使用而不拥有”,电能的需求方通过共享暂时性地从让渡方处获得生产/调节能力的使用权,以相对于购买而言较低的成本完成使用目标,如暂时从调节成本低的负荷处获得电能(调节能力),以完成需求侧响应的指令,其对象是优质的生产/调节能力,体现形式是电能;②“不使用即浪费”,其本质是将一种作为沉没成本的闲置电能进行其他用途的再利用。例如:用户a、b参与负荷响应计划,均被要求削减5 p.u.。其中,用户a的单位调节成本为0.1 p.u.,用户b的单位调节成本为0.2 p.u.。则在不允许共享时,二者的调节总成本为1.5 p.u.。当用户a与用户b进行共享时,可由用户a削减10 p.u.,并将多余的从电网购买的5 p.u.电卖给用户b使用。此时,二者调节总成本为1 p.u.。在上述例子中,闲置的优质生产/调节能力为用户a的低成本生产/调节能力,共享的电能是用户a卖给用户b的5 p.u.电能,并通过共享达到了理想状态下的实时平衡,即各用户用最低成本实现了供需平衡。

此外,本文所提共享的概念既包括狭义的共享,

也包括分享。这里,狭义的共享是指由协调者统一管理各方资源,再分租给用户的模式,如共享储能;而分享是指大规模用户之间相互交换自有资源的模式,如Airbnb等。实际上,不同的能源形式如热能、燃气之间均可进行共享。但考虑到电能具有易于传输和高效转换的优点,在积极推进电能替代的大背景下,本文集中讨论电能的共享。其他能源形式的共享可以通过电能作为纽带进行,这对于能量共享的概念和方法并不产生实质性影响。此外,电力领域的“资源”包括风、光等自然资源以及储能、电动汽车等设备资源,而这些资源的共享本质上都是通过共享“电能”实现的。

前文中提到,共享可实现资源“所有权”和“使用权”的暂时分离,具体而言,在能量共享中,“所有权”和“使用权”的主体都是电能。本文从以下3个方面阐明所提能量共享模式与常规能源市场、直接共享能量发生装置的区别。

1)从目的和角色上来说: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,发电厂生产电能的目的是为了销售;而在能量共享之中,参与者生产电能的首要目的是自己使用,其次才是出售(购买)多余(不足)部分的电能。此外,在能量共享中,参与者的市场角色可以由市场出清内生决定而不必事先确定,并且一个参与者可在销售方和购买方2个市场角色间灵活转换。

2)从权利的角度来理解:这里的“所有权”是对该能量发生装置产生的所有电能的整体所有权,而非针对单个时段的电能。值得注意的是,传统观点认为,所有权的主体一般是“有形的物”,即能够生产电能的设备、自行车、充电宝等看得见摸得着的物。但随着科技的进步和社会的发展,无形能源如电能、热能、天然气等被广泛使用。这些能源具备很高的经济价值,具有可支配性,且属于动产,因此也可作为“所有权”的主体。例如,“偷电行为”构成盗窃罪正是认可了电能的所有权而将盗电行为视为盗窃财物。电能的所有权者和使用权者的区别在于,前者拥有处分的权利,即可以决定是否及何时出售电能。其次,所提能量共享可实现所有权和使用权的“暂时”分离,即两权重合是常态,分离是例外;而在常规能源交易中,两权分离是常态。

3)以现实中的例子来更好地说明常规能源交易、能量共享和共享能量发生装置3种模式的区别,如图1所示。在出行领域,存在3种商业模式:出租车、顺风车和汽车租赁。如果将“能量发生装置”类比为“汽车”,“电能”类比为“运载服务”,那么,“常规能源交易”可类比为出租车,提供运载服务对出租车司机而言是工作,是主要收入来源;“能量共享”可类

比为顺风车,提供运载服务对顺风车司机而言是兼职,是额外收入,是对顺风车的闲置运载能力的再利用;“共享能量发生装置”可类比为汽车租赁,是需求方直接驾驶汽车,而非仅作为乘客享受运载服务。由于电能的特殊性,即电能通过物理网络传输至用户,使用电能并不需要直接占有能量发生装置,且能量发生装置不易搬运,因此直接租用占有能量发生装置是不现实且不必要的。本文所提能量共享是通过电能“所有权”和“使用权”的暂时分离实现的。

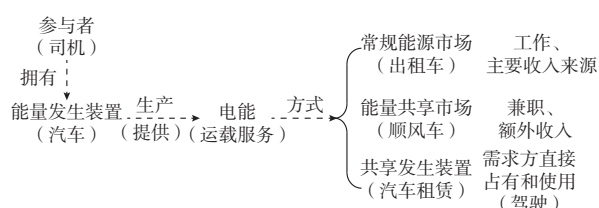


图1 电力市场与交通市场类比
Fig. 1 Similarity between electricity market and transportation market

能量共享与常规能源交易的区别主要体现在“不使用即浪费”。面对日益增长的负荷需求,能量共享鼓励各参与者提供闲置的优质生产/调节能力,是对“现有”资源的更优化配置;而常规能源交易则是通过增大电网投资建设、创造新资源来实现的。“使用而不拥有”的特点将参与者共享能量与参与者增大自身生产/调节能力区别开来。如当产消者负荷增加时,前者对应于从其他产消者处购买闲置电能,后者对应于配备容量更大数量更多的发电设备以增加出力。电能双边交易和集中交易是能源市场2种常见的运行方式。鉴于电能的特殊属性(消耗品),不管是本文所提能量共享还是常规能源市场,不管是以双边交易还是集中交易的方式进行,都是对电能的“一次性交割”。在常规能源市场中,参与者的市场角色是事先确定的,即发电厂作为销售方,用户作为购买方。在能量共享市场中,参与者是销售还是购买可无须事先确定,而由市场出清内生给出。此外,能量共享市场既可以通过集中方式进行(所有参与者申报意愿,市场出清决定哪些作为销售方哪些作为购买方,以及相应的电量和价格),也可以以双边交易的方式进行(双方参与者根据各自的情况商议哪一方销售/购买,交割量为多少等),因此具有较高的灵活性。

1.2 能量共享带来的机遇

需求侧能量共享带来的机遇体现在3个方面。

1)平抑不确定性。单一分布式可再生能源出力具有随机性、间歇性和波动性,但不同电源出力之间具有互补特性^[10]。例如,风力发电出力较大的时段主要为风速较大的夜间,而光伏发电则集中在白

天。如果允许配备分布式风机的产消者与配备分布式光伏的产消者进行能量共享,则可有效平抑二者整体出力的不确定性^[11]。

2)提升运行经济性。当产消者参与到需求侧管理中时,有的产消者调节负荷带来的负效用较低,而有的产消者负荷刚性大、负效用高。通过允许二者进行能量共享,负效用较低的产消者调节更多,并将多余的“调节量”出售给负效用较高的产消者,可实现产消者的共赢,提升整体经济性。

3)提高设备利用率。为保证大型数据中心的安全稳定运行,常为每个中心单独配备不间断电源(UPS)。但这些备用电源在寿命周期内被使用的频率极低,资源浪费严重。现实中,多个数据中心同时出现故障的概率较低,通过允许数据中心间共享后备电源,可在确保安全性的前提下有效提高设备的利用效率。类似的,文献[9]针对家庭用户和小商业用户提出了“共享储能(云储能)”的概念,由储能提供商建立储能共享资源池,而用户可以根据意愿进行使用并付费,以达到降低提供储能服务成本的效果。在储能共享中,用户并不直接物理占有该储能以使用,其本质仍是共享所存储的电能,即共享储能可视为能量共享的一种特殊实现形式。

需要指出的是,所提能量共享是一种考虑物理交割(网络约束)的商业模式,但不一定是建立商业“同盟”关系。即各参与者并非一定结成“同盟”合作关系,而仍是追求各自利益的最大化。以上述风电和光伏联合平抑不确定性为例:当配备分布式风电机组(光伏)的产消者单独运行时,由于负荷不足可能需要弃风(弃光),但若允许二者交换电能,双方都可以获得一定的收益。从此视角看,实际上是释放了双方的灵活性。但值得注意的是,双方均应是自利的决策主体,并不一定按照可实现二者总成本最小化的方式交换电能,即不一定是合作的。此外,所提能量共享模式并不直接产生物理上的改变,即不需要另外增设备或者搭建线路。但各参与者可能会根据共享下的效用变化调整自己的行为,如因可进行共享而增加风电装机,从而可能间接产生物理上的改变。

1.3 能量共享涉及的基本框架

结合电力系统运行特性,能量共享涉及的基本框架可表示为如图2所示的3层结构。其中,最底层为物理层,包含电力系统运行的网络架构及相关约束。能量共享市场的出清结果最终需通过物理网络完成交割,由基尔霍夫定律决定的物理约束会影响能量共享市场均衡,因此物理层为能量共享框架最基本也是不可或缺的组成部分。当能量共享发生在一个小范围(如小区)内时,可以对问题进行简化,

忽略电力系统网络约束的限制;但当能量共享发生在较大范围(如跨城市)时,需将网络约束纳入考虑,且由于物理层的主体为电网调度,假设其知晓网络架构及相关约束是合理的^[12-13]。最上层为交易层,该层直接面向参与者,组织参与者进行竞价出清过程。交易层主要由供求关系等经济规律主导,主体为参与者,可不直接考虑物理网络约束。中间层为调度层,对上接收参与者报价,起到支撑交易层的作用;对下根据物理约束进行安全校核,起到承接物理层的作用。

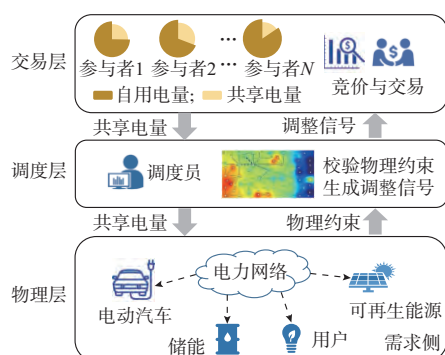


图2 能量共享涉及的基本框架
Fig. 2 Fundamental framework involved in energy sharing

事实上,对于交易层中的单个参与者而言,一般无法获知物理网络的相关约束,且是否满足该约束条件还取决于其他参与者的决策行为,因此要求交易层中的主体在决策时考虑物理网络约束是不现实的。现行电力市场也并不直接在交易层中考虑物理约束,而是通过调度层进行安全校核保证出清结果可行。在能量共享市场中,尽管参与者可不直接考虑物理网络约束,但该约束的信息可蕴含在市场价格之中。当市场机制设计合理时,各参与者决策下的市场均衡自动满足物理网络约束。

上述3层间的交互依赖于信息与计算机技术。能量共享模式面临着多主体数据标准不一、难以对接,位置分散信息难以收集,相对独立信息不对称等问题。而“互联网+能量共享”的新思路,可为解决上述难题提供技术手段,起到支撑电力物联网的作用。文献[14]总结了储能云网平台涉及的底层技术及应用场景。具体来说,海量信息的采集与处理涉及数据实时处理技术^[15];大数据挖掘、机器学习、深度学习^[16]等技术可揭示部分隐藏信息,削弱信息的不对称性;区块链技术^[17]具有去中心化、集体维护、数据透明等优点,完美契合地理位置分散的各主体能量共享这一应用场景的需求。能量共享是一个全新的概念,相关技术路线均有待探索。本文重点分析其机制问题,对于支撑信息与计算机技术,仅简单

列举其面临的难题和可能的解决方案,供感兴趣的读者深入探索挖掘。

1.4 能量共享的特征及基本要求

基于上述交易-调度-物理3层框架,除共享市场的共性特点(如所有权与使用权的暂时分离)外,能量共享还具有以下特征。

1)能量要求实时平衡。在当前技术条件下,电能大规模长时间存储成本较高。因此,与Uber等具有一定时间缓冲余地的共享形式不同,能量共享要求满足实时平衡。

2)出清结果满足物理约束。为保证能量共享结果具备物理可行性,在进行能量共享市场出清时,需考虑相关物理约束。特别地,当进行跨区域共享时,出清结果必须满足传输线约束,出清价格还应正确反映线路堵塞情况。

以共享储能为例,有2类主流的形式:一是由协调者统一管理储能,用户根据需求“租用”该储能^[18],此方式并不涉及储能装置的物理移交;二是用户之间交换储能设备使用,如用户a将电池交给用户b使用一段时间。在当前技术条件下,电能无法大规模长时间存储,从电能的产生和消耗来看,上述2种方式仍需满足“实时平衡”。此外,由于储能装置体积一般较大,第2类直接共享储能设备的方式具有一定的局限性。能量共享的本质是电能在一个区域内的重新高效分配,这里更关心的是稍大范围内的能量共享问题。故本文所涉及的能量共享指的是交换能量发生装置所产生的电能而不是装置本身,该电能仍通过网络传输,需满足“物理约束”。实际上,无论共享储能的形式如何,只要使用的电能仍需要通过网络传输,理论上就不可避免需要满足“物理约束”。即使是对于后一种形式的共享(即直接共享储能装置)而言,当用户a将储能装置交给用户b使用后,两者所需从电网购买的电能仍会发生变化,而变化后的电能依然需要满足“实时平衡”和“物理约束”等。

结合上述特征,能量共享机制有如下基本要求:

①各参与者可自由选择购买/销售,其最终作为购买方还是销售方由能量共享市场根据其申报的意愿内生确定;②能量共享市场有效出清,即既满足实时功率平衡要求,也满足相关物理约束;③机制易于执行,均衡性质良好。这要求能量共享机制应便于实施,尽可能保护用户信息私密性,且能有效激励参与者加入。鉴于1.3节中的现实情况和上述需求分析,需提出行之有效的市场机制加以引导,将物理网络约束信息蕴含于共享价格之中,通过“无形的手”间接调节参与者行为,使得共享参与者无须直接考虑物理网络约束,但所达到的市场均衡自发满足该

约束。

一般意义下,能量共享仍属于电力市场的范畴,但它是一种区别于传统买卖的商业模式,体现在以下几个方面。

1)共享侧重于对现有资源的更优化配置。如面对日益增长的负荷需求,能量共享鼓励各参与者提供闲置的现有优质生产能力;而常规能源交易则是通过增大电网投资建设等方式,以增大发电能力。能量共享为达到实时平衡提供了更多的选择。

2)参与者在参与共享的时候,其角色并不事先固定,可能时而为销售方时而为购买方,是资源优化配置的“内生”结果。在传统能源买卖中,进入市场时参与主体已明确哪些是销售方(如发电厂)、哪些是购买方(如用户),再经由市场出清确定交易量和交易价格,一般通过以量定价或以价定量的方式进行,因此其角色是“外生”的。在能量共享市场中,进入市场时参与者的最佳市场角色是未知的,是由共享市场出清“内生”确定的。以参与负荷响应计划为例,假设用户a、b、c的调节成本分别为高、中、低,若用户a和b共享,则用户a为购买方而b为销售方;若用户b和c共享,则用户b为购买方而c为销售方。若如传统能源买卖那样要求事先确定市场角色,则会限制参与者的灵活性,从而产生“闲置资源”的浪费,增加不必要的成本。因此,市场角色、交易量和交易价格同时由共享市场内生决定更为合理。

上述区别导致:①买卖过程(建模)的改变,由于市场角色不确定导致无法以量定价,也难以以价定量,需设计新的买卖竞价模式以实现市场角色、交易量、交易价格三者同时内生决定;②购销决策模型的改变,单个参与者不知道市场中的其他参与者的情况,也无法确定自己在共享中是销售还是购买,因此增加了决策难度。

由于上述优点和挑战,能量共享的新模式受到国内外学者广泛关注^[19-20],相关研究项目包括英国 Piclo 项目^[21]、P2P3M 项目^[22]、美国 TransActive Grid 项目^[23]等等。该模式成功实施的关键在于能量共享机制的设计。在给定机制下,各参与者策略性调整其行为以最大化自身收益;在均衡处,各参与者均不能通过单方面改变其行为获利。工程博弈论为分析多参与者下的市场均衡提供了理论和技术支撑^[24-25]。第2章将对国内外能量共享机制设计的研究现状进行梳理,将5种典型机制归纳为合作博弈和非合作博弈2类,如附录A表A1所示。

2 能量共享机制

2.1 基于合作博弈的能量共享

在合作博弈中,参与者通过形成小群体,集中加

入管理,提高其收益。具体来说,群体内部参与者首先共同签订再分配协议,接着,各参与者在计及可能获得的再分配的前提下进行优化决策,如附录B图B1所示。合作博弈成功的关键在于有效的再分配机制的设计,使得参与者单独决策的均衡结果符合整体决策目标,如社会福利最大化。基于合作博弈的能量共享可用下述模型表示:

$$\begin{cases} \max_{s_i, b_i} & -c_i(s_i, b_i, b_{-i}) + f_i(b) \\ \text{s.t.} & s_i + q_i(b) = D_i \\ & g_i(s_i, q_i(b)) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $c_i(\cdot)$ 为参与者*i*的成本函数; $f_i(\cdot)$ 为参与者*i*获得的再分配; s_i 为参与者*i*自身生产的电量; b_i 为其能量共享竞价; b_{-i} 为除参与者*i*外其余参与者的竞价; $b := (b_i, \forall i)$; D_i 为参与者的负荷量; $g_i(\cdot)$ 为运行条件方程; q_i 为获得的共享电量, $q_i > 0$ 代表其为购买方, $q_i < 0$ 代表其为销售方, $q_i = 0$ 代表其不参与能量共享, q_i 的值由所有参与者竞价**b**决定,因此在目标函数中包含了竞标售电、竞标购电和不参与共享3种情况。每个参与者力图最大化其净收益。约束 $s_i + q_i(b) = D_i$ 为电量平衡条件, $g_i(s_i, q_i(b)) \leq 0$ 为相关运行约束。

上述基于合作博弈的能量共享问题式(1)中,最关键的因素是再分配机制 $f_i(\cdot)$ 的设计。一个有效的再分配机制应根据参与者的贡献进行公平分配,并鼓励参与者合作。著名的 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 机制是其中典范^[26],可证明该机制满足激励相容原则,即每个参与者均会按照其真实成本进行申报,而不会通过隐藏私人信息获利,且可实现参与者整体最优。但该机制的缺点是难以保证预算平衡,即为确保该市场持续运行,常需从外部额外提供补助。基于 Shapley 值制定再分配方案是另一种常见的策略,其反映了每个参与者在合作中的边际贡献期望^[27]。文献[28]对分布式储能进行优化,最小化其合作运行成本。文献[29]将共享储能纳入综合能源系统之中,以用户整体经济性最优为目标,设计了相应的用户费用分摊方法。文献[30]针对智能电网中的2种场景,分别提出了共享储能成本的再分配方案。针对微电网运行,在考虑网络约束的前提下,文献[31]提出了相邻节点间能量共享的激励方案。文献[32]将产消者间的能量共享建模为带有平衡约束的数学问题(mathematical programs with equilibrium constraints, MPEC),并将合作收益在零售商和产消者间分配。文献[33]采用 Shapley 值法分配虚拟电厂的合作收益。文献[34]利用随机采样的方法近似点对点能量交易下的 Shapley 值。文献[35]进一步对比了基于 Shapley 值的再分配机

制与3种传统的分配机制(账单分享、中间市场利率和供求比率)的效果。文献[36]利用K-means聚类技术提高了计算效率。

上述关于再分配机制的设计可以分为以下3类。

1) Shapley值法^[31,33-35]。根据参与者对所参与的每个联盟的边际贡献的平均值,对收益进行分配。设 $P(N)$ 为集合 $N=\{1,2,\dots,n\}$ 的排列,共有 $n!$ 种,对于集合中某个选定的元素 i 和 $\pi \in P(N)$,令 $S_\pi(i)$ 为排列 π 中元素 i 之前元素构成的集合。对任意子集 $C \subseteq N$,定义 $\delta_i(C)=v(C \cup \{i\})-v(C)$,其中 $v(\cdot)$ 为价值函数,则对于合作博弈 $G=\langle N, v \rangle$,参与者 i 的Shapley值可由下式计算得到。

$$\delta_i(G)=\frac{1}{n!} \sum_{\pi \in P(N)} \delta_i(S_\pi(i)) \quad (2)$$

2) 核仁(nucleolus)法^[28,36]。旨在最小化最大的不满意度。设 $x, y \in X$ 为2种分配方式, X 为分配方式集合。对 n 个参与者组成的 2^n 个联盟下的不满意度进行排序,得到 $\theta(x)=(\theta_1(x), \theta_2(x), \dots, \theta_{2^n}(x))$ 和 $\theta(y)=(\theta_1(y), \theta_2(y), \dots, \theta_{2^n}(y))$ 。若满足 $\theta_i(x) \leq \theta_i(y), \forall i$ 且 $\exists i, \theta_i(x) < \theta_i(y)$,则 $\theta(x) < \theta(y)$ 。核仁法所得分配满足:

$$\varphi(G)=\{x \in X | \theta(x) \leq \theta(y), \forall y \in X\} \quad (3)$$

3) 启发式的设计方法。文献[29]根据用户电、热总能耗量来决定用户在合作团体中分得的能耗费用。文献[30]的再分配方案与储能的单位成本、电力市场价格、用户的消费量和储能的使用量相关。文献[32]通过计算用户参与共享时和单独与零售商交易时的成本差,对用户和零售商进行利益再分配。此类方法较之前2种方法计算简便,操作易行。

基于合作博弈的能量共享机制可实现参与者整体福利最大化,但对于复杂系统而言,尤其是在面临信息不对称、用户隐私保护等情况下,如何设计有效的再分配方案亟待解决。

2.2 基于非合作博弈的能量共享

基于非合作博弈的能量共享机制考虑各参与者的利益冲突及策略行为下的均衡,大致可分为基于拍卖的模式和基于双边合同的模式。基于拍卖的能量共享模式又可进一步分为以平台为主导的和以参与者为主导的。下文将分别介绍各种模式。

2.2.1 平台主导的拍卖模式

该模式可描述为一个两阶段决策过程,如图3所示。在第1阶段中,平台作为先行者,发布能量共享的购买或销售价格,旨在最大化自身收益或最优社会福利;在第2阶段中,接收到能量共享价格后,每个参与者决定其共享电量以最小化自身成本/

负效用。在该机制下,平台作为先决策的一方拥有主动权,因此称为“平台主导”的能量共享模式;参与者是价格的被动接受者。该两阶段决策问题可以建模为下述Stackelberg博弈问题。

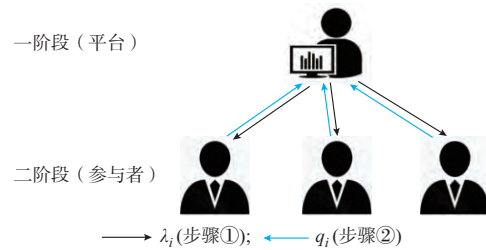


图3 平台主导-拍卖模式的能量共享
Fig.3 Energy sharing based on platform-dominating auction mode

一阶段(平台):

$$\begin{cases} \max_{\lambda, \forall i} c_u(\lambda, q(\lambda)) \\ \text{s.t. } g_u(\lambda, q(\lambda)) \leq 0 \\ \sum_i q_i(\lambda_i) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $c_u(\cdot)$ 为平台定价出清的目标函数; λ_i 为一阶段决策问题式(4)的决策变量,对应于每个参与者的能量共享价格,令 $\lambda:=(\lambda_i, \forall i)$;令 $q:=(q_i, \forall i)$ 对应参与者共享电量,由各参与者的优化问题式(5)决定; $g_u(\cdot)$ 为平台运行条件; $g_u(\lambda, q(\lambda)) \leq 0$ 为相关运行约束; $\sum_i q_i(\lambda_i) = 0$ 表示能量共享市场的出清条件。

二阶段(参与者):

$$\begin{cases} \min_{s_i, q_i} c_i(s_i) + t_i(\lambda_i, q_i) \\ \text{s.t. } s_i + q_i = D_i \\ g_i(s_i, q_i) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $t_i(\cdot)$ 为参与者 i 参与能量共享的支付; $s_i + q_i = D_i$ 为供需平衡条件; $g_i(s_i, q_i) \leq 0$ 为运行限制约束。为得到此Stackelberg博弈问题的市场均衡,一种常见的方法是将二阶段参与者问题式(5)用其Karush-Kuhn-Tucker(KKT)最优性条件替代,进而将整个问题转化为混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题,并通过成熟商业软件或者利用启发式算法进行求解。

此类能量共享机制,以平台为主导,并考虑其最优定价^[37]、客户忠诚度计划^[38]等问题。文献[39]在计及电力市场价格和可再生能源出力不确定性的前提下,将能量共享问题建模为一个两阶段鲁棒优化问题。文献[40]证明了两阶段能量共享问题的Stackelberg均衡存在且唯一。文献[41]揭示了以平台净利润最大化为目标设计的共享价格可能导致社会福利下降的现象,并给出了相应的福利损失上

界。结合实际应用场景,文献[42-43]讨论了分布式光伏用户之间的能量共享效率。文献[44]探讨了当二阶段产消者可以结成小联盟时,对能量共享效果的影响。文献[45]采用 Stackelberg 博弈描述共享储能社区的能源管理,其中储能提供商为领导者(leader),用户为跟随者(follower)。文献[46]构建了实现共享储能的拍卖机制,并将拍卖商和用户之间的关系建模为 Stackelberg 博弈。此类机制的优点是由平台统一决策出清,可使共享结果达到社会最优,且便于拓展考虑物理网络约束和实现预算平衡。缺点是需要统一的调控者(平台)协调;当参与者众多时计算量大;参与者是价格是接受者,其参与能量共享市场的能动性受到抑制。

2.2.2 参与者主导的拍卖模式

与平台主导的能量共享机制相对应的另一类机制是由参与者主导的拍卖模式。在此机制下,不存在独立的第三方平台,如附录B图B2所示,或者第三方平台仅提供辅助支撑服务,如图4所示。参与者可以通过其策略性行为影响其他参与者的决策,进而影响能量共享均衡价格。

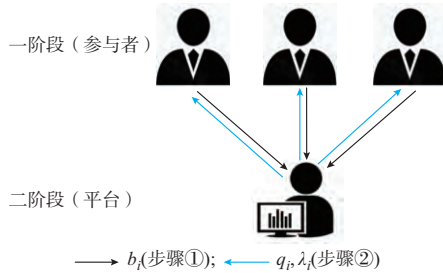


图4 参与者主导-拍卖模式的能量共享(有第三方平台)
Fig.4 Energy sharing based on participant-dominating auction mode (with third-party platform)

1)当不存在独立第三方平台时,一般来说参与者在市场中的地位需要事先确定,即一部分参与者作为销售方,另一部分参与者作为购买方。销售方在考虑购买方可能反应的情况下设计并发布销售价格,购买方根据发布的价格决定各自的购买量,如附录B图B2所示。该两阶段决策过程可以建模为下述多主-多从博弈问题。

销售方 i :

$$\begin{cases} \max_{s_i, \tilde{\lambda}_{ij}, \forall j \in \mathcal{B}} -c_i(s_i) + \sum_{j \in \mathcal{B}} \tilde{t}_{ij}(\tilde{\lambda}_{ij}, \tilde{q}_{ij}(\tilde{\lambda}_{ij})) \\ \text{s.t. } s_i = D_i + \sum_{j \in \mathcal{B}} \tilde{q}_{ij}(\tilde{\lambda}_{ij}) \\ \tilde{g}_i(s_i, \tilde{\lambda}_{ij}, \tilde{q}_{ij}(\tilde{\lambda}_{ij}), \forall j \in \mathcal{B}) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

购买方 j :

$$\begin{cases} \min_{s_j, \tilde{q}_{ij}, \forall i \in \mathcal{S}} c_j(s_j) + \sum_{i \in \mathcal{S}} \tilde{t}_{ij}(\tilde{\lambda}_{ij}, \tilde{q}_{ij}) \\ \text{s.t. } s_j + \sum_{i \in \mathcal{S}} \tilde{q}_{ij} = D_j \\ \tilde{g}_j(s_j, \tilde{q}_{ij}, \forall i \in \mathcal{S}) \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: \tilde{q}_{ij} 为购买方 j 向销售方 i 购买的电量; $\tilde{\lambda}_{ij}$ 为对应共享价格; $\tilde{t}_{ij}(\cdot)$ 为购买方 j 向销售方 i 的支付; $\tilde{g}_i(\cdot)$ 和 $\tilde{g}_j(\cdot)$ 分别为销售方 i 和购买方 j 的运行条件方程; \mathcal{S} 和 \mathcal{B} 分别为销售方和购买方构成的集合;销售方 i 的决策变量为其自产电量 s_i 和给予每个购买方 j 的能量共享价格 $\tilde{\lambda}_{ij}$;购买方 j 的决策变量为其自产电量 s_j , 以及从每个销售方 i 购买的电量 \tilde{q}_{ij} ;销售方旨在最大化其收益,购买方旨在最小化其成本;问题式(6)和式(7)中,约束 $s_i = D_i + \sum_{j \in \mathcal{B}} \tilde{q}_{ij}(\tilde{\lambda}_{ij})$ 及 $s_j + \sum_{i \in \mathcal{S}} \tilde{q}_{ij} = D_j$ 为能量平衡约束;约束 $\tilde{g}_i(s_i, \tilde{\lambda}_{ij}, \tilde{q}_{ij}(\tilde{\lambda}_{ij}), \forall j \in \mathcal{B}) \leq 0$ 及 $\tilde{g}_j(s_j, \tilde{q}_{ij}, \forall i \in \mathcal{S}) \leq 0$ 为相关运行限制。

文献[47]采用演化博弈刻画购买方动态选择销售方的过程。文献[48]将受物理约束限制的一组产消者抽象为虚拟微电网,并将产消者间的能量交换过程建模为 Stackelberg 博弈。文献[49]采用纳什讨价还价博弈研究了电动汽车充放电的能量共享。在此类机制下,由于参与者的市场角色须事先确定,限制了其供需地位动态切换的灵活性。文献[50]进一步基于快速交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)在各产消者地位对等的情况下,给出能量共享分配的方法,以最小化社会总成本。此类机制的优点是无须统一调控者,容易达到预算平衡,且决策过程符合单个参与者的个体利益。缺点是参与者的市场地位(作为销售方/购买方)须事先确定,限制了参与者的灵活性;无统一调控者协调干预,难以考虑物理网络约束;参与者之间的相互匹配需时复杂。

2)当存在第三方共享平台时,首先参与者作为“先行者”向平台报价;收集到所有报价后,平台对能量共享市场进行出清,给出相应的均衡价格和共享电量,如图4所示。因参与者间的策略性行为会影响到其他参与者的策略集,上述过程可建模为下述广义纳什博弈^[51]。

参与者 i :

$$\begin{cases} \min_{s_i, b_i} c_i(s_i) + t_i(q_i(b), \lambda_i(b)) \\ \text{s.t. } g_i(s_i, q_i(b), \lambda_i(b)) \leq 0 \\ s_i + q_i(b) = D_i \end{cases} \quad (8)$$

平台:

$$\begin{cases} \max_{\lambda, q} c_u(\lambda, q(b)) \\ \text{s.t. } g_u(\lambda, q(b)) \leq 0 \\ \sum_i q_i(b) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

参与者 i 的决策变量为自产电量 s_i 和报价 b_i ;共享电量 q_i 和能量共享价格 λ_i 均为 b 的函数。当平台收到所有参与者的竞价 $b_i, \forall i$ 后,其在运行约束和市场出清条件的限制下,求解优化问题式(9),给出共享电量 $q:=(q_i, \forall i)$ 和能量共享价格 $\lambda:=(\lambda_i, \forall i)$ 。

此类竞价机制与传统电力市场^[52]的发电厂和用电方同时竞价出清的模式类似。其主要区别体现在2个方面:①能量共享市场的参与者在自产电量和通过共享获取能量之间取舍,而传统发电厂仅生产电量;②能量共享市场的每个参与者可以自由地选择作为销售方还是购买方,其市场地位在共享市场出清过程中根据申报自动确定。在文献[53]提出的新型城镇配电系统交易机制中,产消者通过非合作博弈竞价争取最大售电收益,电网收取过网费并提供保底供电服务。文献[54]给出了考虑储能投资成本和实时市场收益的共享储能广义纳什博弈模型,并证明了该博弈均衡的若干性质。文献[55]提出一种基于广义供求函数的能量共享机制,并严格证明了该机制下市场均衡的存在性、唯一性、渐近特性、递减特性等性质。文献[56]将一种分布式点对点共享机制刻画为广义纳什博弈,并证明了变分均衡集与社会最优解集相同。在广义纳什博弈下,各参与者的策略集依赖于其他参与者所选择的策略,均衡通常不唯一且可能以低维流形的形式出现^[24],其均衡性质及求解方法都是亟待解决的难题。此类机制下,用户不再是价格的被动接受者,而可以通过竞标影响均衡价格,更有利于激发起能动性;决策结果符合参与者个体利益;由统一调控者协调出清,易于达到预算平衡。同时,此机制须统一的调控者(平台)进行协调,当参与者众多时计算量大;单个参与者决策时并不直接考虑物理网络约束,如何将相关约束信息蕴含于交易价格之中进行间接引导是一大难点;参与者以自身利益最大化为目标进行竞价,均衡结果难以实现社会最优。

2.2.3 双边合同模式

与基于拍卖的能量共享模式不同,基于双边合同的模式主要依赖于申报、撮合完成交易配对。首先,参与者登记为销售方或购买方,在交易时段向平台进行申报,并寻找最佳匹配方。当一个合同配对成功后,经过平台运行者的允许,交易达成,相应的申报从列表中去除^[57]。此机制可在异步模式下运行,符合参与者个体利益,且易于达到预算平衡,其关键点在于如何进行匹配以及匹配结果的可行性。

文献[58]提出了一种基于双边合同的日前-实时市场模型。文献[59]提出了一种以风险最小化为目标的参与者匹配方案。总体上,由于配对过程较难刻画分析,此类机制相关研究较少,且在该机制下,参与者的市场地位(作为购买方/销售方)需事先确定。如何对参与者进行匹配以及如何保证出清结果符合物理网络约束都是设计的难点。

3 研究展望

需求侧能量共享为提高系统资源利用效率,应对海量分布式可再生能源接入所带来的挑战开辟了新途径,相关研究方兴未艾。未来研究可从能量共享市场内部设计与与外部的衔接关系2个方面进一步深入挖掘。

1) 能量共享市场内部设计

能量共享市场内部可分为市场主体(包括共享平台和参与者)及传递流(包括能量流、信息流和价值流)两部分,如图5所示。

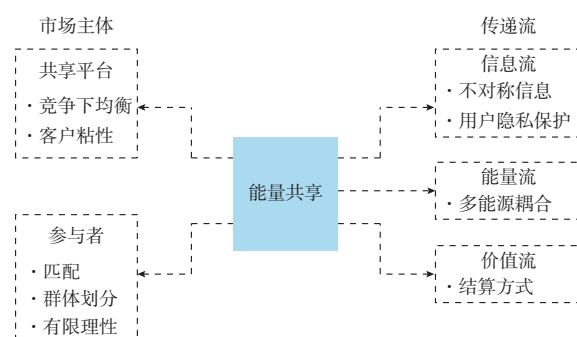


图5 能量共享市场内部未来研究方向
Fig. 5 Future research direction inside energy sharing market

针对市场主体,目前研究主要考虑单个平台下完全理性参与者的市场均衡分析,可能的拓展方向包括:①当存在多个能量共享平台时,平台间竞争下的市场均衡分析,这涉及多个带均衡约束的均衡问题(equilibrium programs with equilibrium constraint, EPEC)的复杂联立求解;②各平台如何尽可能多地抢占市场并保持客户粘性,这涉及用户补贴计划的设计问题;③如何有效划分参与者群体,使得每个能量共享群体内部均衡下的资源分配效率最高;④当参与者为有限理性时,会对市场均衡产生怎样的影响,可结合展望理论进行分析。

针对传递流,目前研究主要考虑对称信息下单种能源以现金计价的共享模式,可能的拓展方向包括:①多种能量同时进行共享时的市场机制设计,这将涉及综合能源系统的建模及均衡分析;②考虑非对称信息下的共享机制设计,具体可考虑逆向选择和道德风险两类问题;③采用现金结算外的其他价

值结算方式(如信用积分)下的共享机制设计。

2) 能量共享市场与外部的关系

能量共享市场可分布式地实现资源的更高效分配,具有广阔的发展前景。为实现能量共享市场的应用,如何将其与现有的电力系统运行调度和市场交易体系相结合是关键。针对运行调度而言,大量分布式可再生能源接入下的不确定性给电网安全稳定运行带来冲击,而且面向海量分布式电源时,传统的集中调度模式效率低下且实施困难。能量共享可由每个参与者单独决策,市场均衡自发达到接近社会最优的效果,有望解决这一问题。如何将传统的集中调度与分布式的能量共享方案相结合,是需要深入研究的问题。针对市场交易,对内大量参与者进行能量共享提高资源分配效率,对外参与者群体可与传统能源市场进行交易,参与到能量管理中来。为此,需回答各参与者群体如何参与传统能源市场交易,交易的成本/收益如何在参与者群体内部有效分配等系列问题,涉及工程博弈论的系列理论和分析工具。

4 结语

需求侧能量共享为适应海量分布式可再生能源接入下的新挑战提供了范式参考。本文给出了需求侧能量共享的概念,分析了其可能带来的机遇,阐明了其设计的基本要求与关键点,并对国内外相关研究进行综述。在此基础上,对能量共享未来研究方向进行了展望。所提需求侧能量共享方案,通过“所有权”和“使用权”的暂时分离,达到物尽其用的效果,具有广阔的发展前景。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

- [1] 康重庆,姚忠良.高比例可再生能源电力系统的关键科学与理论框架[J].电力系统自动化,2017,41(9):2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [2] 国家能源局.“十三五”生物质能源发展规划[R].2016.
National Energy Administration. The 13th Five-Year Plan for biomass energy development[R]. 2016.
- [3] 李彪,万灿,赵健,等.基于实时电价的产消者综合响应模型[J].电力系统自动化,2019,43(7):81-88.
LI Biao, WAN Can, ZHAO Jian, et al. Real-time electricity price based integrated response model for prosumers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 81-88.
- [4] 殷爽睿,艾芊,王大鹏,等.考虑空调负荷虚拟储能的产消者鲁棒日前申报策略[J].电力系统自动化,2020,44(4):24-34.
- [5] YIN Shuangrui, AI Qian, WANG Dapeng, et al. Day-ahead robust bidding strategy for prosumer considering virtual energy storage of air-conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 24-34.
- [6] CHEN Y, WEI W, LIU F, et al. Optimal contracts of energy mix in a retail market under asymmetric information[J]. Energy, 2018, 165: 634-650.
- [7] ZHANG Y, GATSIS N, GIANNAKIS G B. Robust energy management for microgrids with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4 (4) : 944-953.
- [8] 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.
- [9] HAMARI J, SJÖKLINT M, UKKONEN A. The sharing economy: why people participate in collaborative consumption [J]. Journal of the Association for Information Science and technology, 2016, 67(9): 2047-2059.
- [10] 康重庆,刘静琨,张宁.未来电力系统储能的新形态:云储能[J].电力系统自动化,2017,41(21):2-8.
KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8.
- [11] 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.
- [12] CHEN Y, WEI W, LIU F, et al. Analyzing and validating the economic efficiency of managing a cluster of energy hubs in multi-carrier energy systems[J]. Applied Energy, 2018, 230: 403-416.
- [13] GUERRERO J, CHAPMAN A C, VERBI G. Decentralized P2P energy trading under network constraints in a low-voltage network [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10 (5): 5163-5173.
- [14] NIKOLAIDIS A, 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, 2019, 34 (5): 4109-4118.
- [15] 杨德胜,范叶平,李玉,等.基于泛在电力物联网的储能云网平台应用研究[J].电力信息与通信技术,2019,17(11):25-31.
YANG Desheng, FAN Yeping, LI Yu, et al. Research and application of energy storage cloud network platform based on ubiquitous power Internet of Things [J]. Electric Power ICT, 2019, 17(11): 25-31.
- [16] 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

- applications in distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 115-120.
- [16] 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.
- [17] 韩冬, 张程正浩, 孙伟卿, 等. 基于区块链技术的智能配电网交易平台架构设计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 89-96.
- HAN Dong, ZHANG Chengzhenghao, SUN Weiqing, et al. Framework design of smart distribution trading platform based on blockchain technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 89-96.
- [18] LIU J, ZHANG N, KANG C, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: a business case study[J]. Applied Energy, 2017, 188: 226-236.
- [19] PARAG Y, SOVACOL B K. Electricity market design for the prosumer era[J]. Nature Energy, 2016, 1(4): 1-6.
- [20] SOUSA T, SOARES T, PINSON P, et al. Peer-to-peer and community-based markets: a comprehensive review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 104: 367-378.
- [21] Piclo website [EB/OL]. [2020-05-28]. <https://piclo.uk/>.
- [22] P2P3M website [EB/OL]. [2020-02-20]. <https://p2pconnecting.com/>.
- [23] 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.
- [24] 梅生伟, 刘锋, 魏巍. 工程博弈论基础及电力系统应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- MEI Shengwei, LIU Feng, WEI Wei. Engineering game theory and applications in power systems[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [25] TUSHAR W, YUEN C, MOHSENIAN-RAD H, et al. Transforming energy networks via peer-to-peer energy trading: the potential of game-theoretic approaches [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(4): 90-111.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 王仕俊, 平常, 薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 77-84.
- WANG Shijun, PING Chang, XUE Guobin, et al. Synergic optimization of community energy internet considering the shared energy storage[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 77-84.
- [30] CHAKRABORTY P, BAEYENS E, POOLLA K, et al. Sharing storage in a smart grid: a coalitional game approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4379-4390.
- [31] MEI J, CHEN C, WANG J, et al. Coalitional game theory based local power exchange algorithm for networked microgrids [J]. Applied Energy, 2019, 239: 133-141.
- [32] QI W, SHEN B, ZHANG H, et al. Sharing demand-side energy resources: a conceptual design[J]. Energy, 2017, 135: 455-465.
- [33] 王晔, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 155-162.
- WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 155-162.
- [34] HAN L, MORSTYN T, MCCULLOCH M. Estimation of the Shapley value of a peer-to-peer energy sharing game using coalitional stratified random sampling [EB/OL]. [2020-06-16]. <https://arxiv.org/pdf/1903.11047.pdf>.
- [35] LONG C, ZHOU Y, WU J. A game theoretic approach for peer to peer energy trading[J]. Energy Procedia, 2019, 159: 454-459.
- [36] HAN L, MORSTYN T, CROZIER C, et al. Improving the scalability of a prosumer cooperative game with K-means clustering[C]// 2019 IEEE Milan PowerTech, June 23-27, 2019, Milan, Italy: 1-6.
- [37] 方燕琼, 甘霖, 艾芊, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 61-69.
- FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 61-69.
- [38] FANG Z, HUANG L, WIERMAN A. Loyalty programs in the sharing economy: optimality and competition [J]. Performance Evaluation, 2020, 143.
- [39] CUI S, WANG Y W, XIAO J W, et al. A two-stage robust energy sharing management for prosumer microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(5): 2741-2752.
- [40] CUI S, WANG Y W, LIU N. Distributed game-based pricing strategy for energy sharing in microgrid with PV prosumers[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 12(3): 380-388.
- [41] FANG Z, HUANG L, WIERMAN A. Prices and subsidies in the sharing economy[J]. Performance Evaluation, 2019, 136: 102037.
- [42] LIU N, YU X, WANG C, et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3569-3583.
- [43] LIU N, YU X, WANG C, et al. Energy sharing management for microgrids with PV prosumers: a Stackelberg game approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(3): 1088-1098.
- [44] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. Grid influenced peer-to-peer energy trading [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1407-1418.
- [45] 徐瑞龙, 田佳强, 朱亚运, 等. 基于博弈论的共享储能社区微电网能源管理[C]//第二届中国系统仿真技术及其学术

- 年会,2019年8月20日,乌鲁木齐,中国.
- XU Ruilong, TIAN Jiaqiang, ZHU Yayun, et al. Energy management for a community microgrid with a shared energy storage based on game theory[C]// 20th CCSSTA, August 20, 2019, Urumchi, China.
- [46] TUSHAR W, CHAI B, YUEN C, et al. Energy storage sharing in smart grid: a modified auction-based approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(3): 1462-1475.
- [47] PAUDEL A, CHAUDHARI K, LONG C, et al. Peer-to-peer energy trading in a prosumer-based community microgrid: a game-theoretic model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(8): 6087-6097.
- [48] 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, 2020, 11(2): 1264-1275.
- [49] DUTTA P, BOULANGER A. Game theoretic approach to offering participation incentives for electric vehicle-to-vehicle charge sharing [C]// 2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), June 15-18, 2014, Dearborn, USA: 1-5.
- [50] CUI S, WANG Y W, XIAO J W. Peer-to-peer energy sharing among smart energy buildings by distributed transaction[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6491-6501.
- [51] FACCHINEI F, KANZOW C. Generalized Nash equilibrium problems[J]. Annals of Operations Research, 2010, 175(1): 177-211.
- [52] CARAMANIS M C, BOHN R E, SCHWEPPE F C. Optimal spot pricing: practice and theory [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982(9): 3234-3245.
- [53] 陈修鹏,李庚银,夏勇.基于主从博弈的新型城镇配电系统生产者竞价策略[J].电力系统自动化,2019,43(14):97-104.
- CHEN Xiupeng, LI Gengyin, XIA Yong. Stackelberg game based bidding strategy for prosumers in new urban distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 97-104.
- [54] KALATHIL D, WU C, POOLLA K, et al. The sharing economy for the electricity storage[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 557-567.
- [55] CHEN Y, MEI S, ZHOU F, et al. An energy sharing game with generalized demand bidding: model and properties [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2055-2066.
- [56] LE CADRE H, JACQUOT P, WAN C, et al. Peer-to-peer electricity market analysis: from variational to generalized Nash equilibrium [J]. European Journal of Operational Research, 2020, 282(2): 753-771.
- [57] 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.
- [58] MORSTYN T, TEYTELBOYM A, MCCULLOCH M D. Bilateral contract networks for peer-to-peer energy trading[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(2): 2026-2035.
- [59] RYU Y, LEE H W. A real-time framework for matching prosumers with minimum risk in the cluster of microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2832-2844.
- 陈 玥(1992—),女,通信作者,博士,主要研究方向:协同优化、博弈论与能源经济。E-mail:cy11@tsinghua.org.cn
- 刘 锋(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向:分布式优化与控制。E-mail:lfeng@tsinghua.edu.cn
- 魏 韡(1985—),男,博士,副教授,主要研究方向:运筹学与能源经济。E-mail:wei-wei04@mails.tsinghua.edu.cn
- (编辑 王梦岩)

Energy Sharing at Demand Side: Concept, Mechanism and Prospect

CHEN Yue^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, WEI Wei^{1,2}, MEI Shengwei^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The prevalence of distributed renewable energy provides a new way to construct clean and efficient smart grids. Meanwhile, it also leads to some difficulties at the demand side such as more random behaviors of end users, more difficult energy management, and less efficient equipment utilization. To deal with these new challenges and fully invoke demand-side flexibility, energy sharing which is an innovative distributed operation paradigm emerges as a response. This paper presents the concept of demand-side energy sharing and analyzes its potential in smoothing uncertainty, enhancing operation economy and improving equipment utilization efficiency. The key points and basic requirements in designing energy sharing mechanism are elaborated. On this basis, the domestic and international research on energy sharing mechanism design is summarized into five categories from the perspectives of cooperative game and non-cooperative game. Current research progress and remaining problems are also concluded. Further, future research direction is previewed from two aspects, i.e. the internal design and external connection of the demand-side energy sharing market.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China-State Grid Corporation of China Joint Fund for Smart Grid (No. U1966601) and National Natural Science Foundation of China (No. U1766203).

Key words: distributed energy; demand side; energy sharing; game modeling; supply-demand matching

