

## 共享储能商业模式和定价机制研究综述

闫东翔, 陈 玥

(香港中文大学机械与自动化工程学系, 香港 999077)

**摘要:** 储能是提升电力系统灵活性以应对源荷随机波动的重要手段,但目前单用户单储能的配置与运营模式使用户面临着储能投资成本高,以及市场上可供选择的储能容量模块种类有限导致的所需储能容量定制化困难和储能设备利用率低等问题。为应对上述挑战,共享储能作为一种新兴商业范式受到广泛关注。文中给出了共享储能的概念,分析了其在降低用户成本、提高储能利用率、促进可再生能源消纳和提升电网运行稳定性等方面的潜力,并对共享储能的应用场景及国内外工程实践进行了详细阐述。在此基础上,根据共享储能的所有权归属不同,将共享储能的商业模式归纳为用户投资和共享公共储能、用户共享运营商投资的公共储能、用户共享自有储能3类。然后,从价格设计的角度将共享储能定价机制的相关研究归纳为3类,并总结了当前的研究进展与亟待解决的问题。最后,考虑到多共享储能运营商参与和电动汽车作为移动共享储能是2个极具潜力的应用场景,文中有针对性地对未来的研究进行了展望,并指出了所需解决的关键问题和可能的解决方案。

**关键词:** 共享储能; 可再生能源; 商业模式; 定价机制; 容量分配; 博弈论

### 0 引言

随着环境污染与气候变化加剧,大力发展可再生能源、实现能源结构清洁与低碳化转型已经成为重要趋势<sup>[1-2]</sup>。在能源供给侧,可再生能源如风电、光伏等快速发展,2020年全球风电与光伏装机容量较2019年分别增加超过65 GW(增速10.4%)和107 GW(增速18.3%)<sup>[3]</sup>。可再生能源具有间歇性、随机性和波动性,给电网供需平衡带来了愈加严峻的挑战<sup>[4]</sup>。在能源需求侧,随着电动汽车等电气化设备的接入,负荷出现陡然增长且负荷波动变得更为剧烈,不利于电网的安全稳定运行<sup>[5]</sup>。电网需要对线路进行扩容并强化网架结构以应对需求侧的峰值冲击,这无疑增加了投资成本。此外,峰值负荷持续时间一般较短,这也导致了备用设备的利用率低。

储能是应对上述挑战的有效手段,并已广泛应用于电力系统调峰调频、平抑可再生能源出力波动、需求侧响应、提高用户供电可靠性等场景<sup>[6]</sup>。以需求侧配置储能为例,储能通过在电网电价谷时段存储电能、在电价峰时段释放电能供给用户,可以为用户节省用电开支,同时缓解电网的调峰压力。尽管

储能具有极大的潜力,其发展仍面临着如下几个问题:

1) 储能投资成本高。通常一个家庭用户所需要的储能容量较小,无法享受到规模效应带来的成本低廉的好处<sup>[7]</sup>。尽管使用储能可以降低用户用电成本,但其前期高额投入导致的投资回收周期长和投资回报率低,会阻碍储能在用户侧的普及。

2) 用户所需储能容量定制化难。市面上厂家提供的可供用户选择的储能产品容量种类有限,用户难以买到恰好与其负荷曲线相匹配的储能容量模块<sup>[8]</sup>。同时,储能的购买是一次性投资,但用户的用电负荷是逐年变化的,这种不确定性加剧了用户匹配储能的难度。容量过大会使得用户的投资负担大,容量过小则无法满足用户的能源需求。

3) 储能设备利用率低。以峰谷套利型的储能为例,其在电价便宜的时段充电,在电价高昂的时段放电。然而,当用户的负荷波动性较强时,若尖峰电价时段的负荷恰好较低,用户则可能有未使用的储能容量。单用户单储能的配置与运营模式使用户无法将这部分闲置的容量卖给其他用户使用,从而导致储能设备利用率低<sup>[9]</sup>。

以上因素制约着储能的商业化快速发展,而共享经济作为一种提高资源利用效率的崭新范式,为上述问题的解决提供了新思路。共享经济已在租房

收稿日期: 2022-02-19; 修回日期: 2022-07-15。

上网日期: 2022-09-27。

(Airbnb)、交通出行(滴滴、Uber)等领域获得许多成功的应用,受到各界的关注<sup>[10]</sup>。共享储能可通过用户共同分担储能成本、充分利用用电负荷互补性等方式,使得所有用户分享储能所带来的收益,有望突破储能面临的瓶颈问题。本文详细分析了共享储能面临的挑战,给出了共享储能的概念及应用,总结了共享储能在商业模式、定价机制等关键技术方面的研究进展,并对未来的研究方向进行了展望。

## 1 共享储能的概念及应用

### 1.1 共享储能的概念

共享储能通常指代由一个公共储能设备为多个用户提供储能服务的模式<sup>[11]</sup>。该公共储能设备可以由所有用户共同投资运营<sup>[12]</sup>,或者由第三方投资运营<sup>[13]</sup>。共享储能利用不同用户负荷曲线的差异性和互补性,通过统筹优化以提升储能设备的利用率、可再生能源的消纳水平、用户的收益,实现价值创造。另外,当用户拥有自有储能时,用户间通过互联并共享能量以间接实现储能共享的方式<sup>[14]</sup>,也可以归为共享储能的范畴。

### 1.2 共享储能带来的机遇

1)降低用户的一次投资成本。共享储能可以由第三方投资运营,用户通过租赁储能服务的方式获得储能的使用权。当建设一个大型储能设施来服务多用户时,用户可以间接享受到规模效应带来的低成本优势。

2)降低用户的用电成本。储能可用于需求响应,通过在低谷电价时段充电、在高峰电价时段放电,用户可实现峰谷套利,并直接减少其在用电高峰时段的购电量,有效节省用户的用电开支。而共享储能可突破单个储能容量的限制,有望进一步降低用户用电成本。

3)提高储能设备的利用率。单用户单储能的配置与运营模式容易造成储能有闲置的时段或有多余的容量无法被使用,成为闲置资源。共享储能可实现闲置储能资源的优化配置,为用户带来额外的经济效益。

4)节省用户的安装空间。安装一套储能系统难免要占用一定的空间,对于公寓式住宅等可用空间有限的用户来说,尽管普遍具有能耗高的特点,其安装储能的意愿并不高。共享储能不占用用户的空间,通过一个公共储能服务多个用户,可以解决该类用户的困扰。

5)促进可再生能源就地消纳。用户的供需具有多样性,如有的用户因配置的光伏容量较小,对外表现为负荷,而另一些用户则具有过剩的可再生能源

发电量。此时,后者可将多余的能量供前者使用或者储存到储能电池中,不必因弃电而造成可再生能源的浪费。

6)提升电网侧运行稳定性。随着可再生能源接入比例的不断提高,可再生能源发电的波动性和不确定性将是影响电力系统稳定运行的主要因素之一。相比于分散控制的单用户小储能,独立建造或聚合分散用户小储能得到的共享储能规模可达到兆瓦级,能够作为可供电网侧调控的资源以增强电网的灵活性。诚然,用户侧共享储能的主要目的是满足用户的储能使用需求。但当共享储能容量规模足够大时,可考虑划分一定比例的容量用于电网侧调控,作为一种与电网侧共享的方式。为保证用户侧储能运营的独立性,此处的“调控”更多是以价格为媒介的间接调控方式。例如,文献[15]以一个配置了1 MW 储能的大型商业用户为研究对象,提出了利用储能同时进行负荷削峰和向电网提供调频服务的收益模型,说明了利用大型用户侧储能参与电网调控的可行性。

基于上述多种优势,共享储能的模式受到了学术界和工业界的广泛关注。

### 1.3 共享储能的应用场景

源、网、荷是电力系统最基本的三要素。文献[16]指出,随着电源、电网和负荷逐渐具备柔性特征,电力系统的控制模式将由传统的源随荷动逐渐变为“源-网-荷”互动。文献[17]指出,随着储能的发展应用,可以有效地实现需求侧管理、促进可再生能源应用和提高系统运行稳定性等,将给电力系统规划、调度、控制等方面带来重大变革。储能技术的应用将贯穿于电力系统发电、输电、配电、用电的各个环节,可缓解高峰负荷供电需求,提高现有电网设备的利用率和电网的运行效率<sup>[18]</sup>。文献[19]进一步提出了“源-网-荷-储”协调优化的理念,通过统筹考虑、协调规划,可以更经济、高效、安全地提高电力系统的功率动态平衡能力。储能作为一种灵活资源,可以应用于电源侧、电网侧、负荷侧,进而实现“源-网-荷-储”的协调统一,如图1所示。

#### 1.3.1 电源侧共享储能

与传统火电、水电相比,风电、光伏等可再生能源出力受天气条件影响大,具有间歇性、波动性和随机性。这使得新能源场站的可调控能力差,给电网规划与调度带来挑战。同时,短时间内功率过剩或缺额的频繁出现,导致了大量的弃风弃光,影响了电网运行的经济性。可再生能源将作为新型电力系统中的重要发电主体,其接入比例将不断提高。因此,亟需有效的技术手段解决可再生能源的并网消纳问

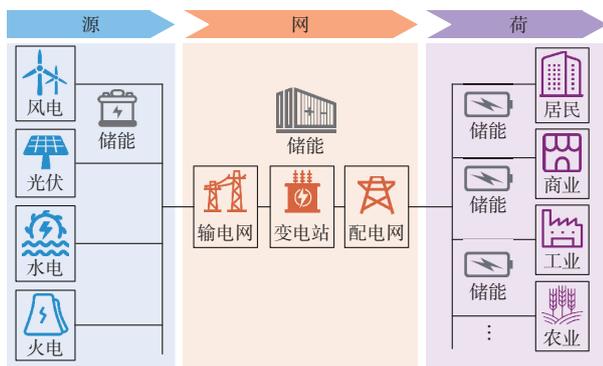


图1 共享储能电力系统中的应用场景

Fig. 1 Application scenarios of shared energy storage in power systems

题。有效手段之一是在新能源场站中配置储能:储能可将可再生能源的生产和消纳环节解耦,提高新能源场站电能的消纳和外送能力<sup>[20]</sup>。然而,常规的配套储能项目一般仅服务于单一新能源场站,各电站的储能装置彼此没有直接联系,商业模式较为简单,并不足以实现储能的高效利用。

采用共享储能模式后,地理位置相距较近的新能源场站可作为共享储能的目标用户。文献[21-22]分别从运行模式和容量规划2个方面对电源侧共享储能进行了研究。文献[21]指出,共享储能是解决新能源消纳难题的有效措施:一方面,可利用共享储能在新能源发电过剩时存储电量,在用电高峰或新能源出力低谷时段释放电量,解决弃风弃光的问题;另一方面,当共享储能存在闲置容量时,其可参与电力调峰辅助服务。但该文献未考虑输电成本和网损的影响。文献[22]研究了发电侧风电厂共享储能的容量规划问题,提出了风电厂的合作博弈模型,验证了共享储能模式可以降低风电厂对储能容量的需求,并提高所有参与者的总收益。但是,该文献假设储能共享仅在联盟内部进行,未计及共享储能参与其他电力辅助服务进一步提高收益的情形。

### 1.3.2 电网侧共享储能

随着可再生能源的大量接入和电气化设备数量的急剧增加,电网输电线路将出现重载、过载现象,变电站面临用电峰谷差增大、电能质量恶化等问题,电网供电可靠性降低。解决上述问题的传统方法是弃风弃光、线路升级扩容和预留备用等<sup>[7]</sup>,但这导致了可再生能源的利用率低或投资效益不理想的问题。在电网侧变电站内部署储能是一种新的解决思路,输电网可以利用储能缓解线路阻塞和提供调频服务,配电网也可以利用储能实现负荷侧的削峰填谷。但是,如何在最大限度地利用储能资源的同时

满足上述各种不同的服务需求是亟须解决的关键问题。

文献[23-25]研究了输电网与配电网共享储能的问题。其中,文献[23]期望利用共享储能缓解输电网线路阻塞和实现配电网经济运行,并提出了一种多阶段调度方案。文献[24]从提高大电网可靠性的角度出发,通过协调配电网侧的共享储能降低大电网的失负荷概率。但是,以上文献均没有考虑在输电网与配电网共享储能容量时所造成的线路损耗问题。文献[25]探讨了如何利用储能解决输电线路阻塞的问题。研究结果表明,实施阻塞管理虽然会带来运行成本的增加,但保障了线路运行的安全性。文献[26]指出,通过与用户分摊电网侧共享储能电站的建造成本,可在提高用户供电可靠性的同时节约电网投资运营成本。但其分析结果是建立在储能每天完成2次完整充放电的假设基础上的,而实际情况将更为复杂。

### 1.3.3 负荷侧共享储能

随着人们生活水平的不断提高和电动汽车等大功率用电设备的逐渐普及,用户用电负荷及用电成本持续攀升。尽管在用户侧部署分布式可再生能源发电设备,如屋顶光伏等,可抵消一部分用电负荷,但光伏出力曲线与用户负荷曲线并不重合,在某些时段反而会导致峰谷差增大。一种更为实用的解决方案是将储能与分布式可再生能源发电相结合:储能在日间吸收光伏的剩余能量并在晚上用电高峰时段释放,配合需求响应策略,可节省用户的用电开支。但如前文所述,目前常见的单用户单储能的配置与运营模式面临着成本高、安装空间受限等问题。

在负荷侧部署共享储能以服务多方用户的方式,使得用户无须安装自有储能也可享受同样的储能服务。文献[14]指出,共享储能在方便服务用户、发挥储能效益、降低投资成本等方面具有巨大的潜力。文献[27]对比了用户侧使用共享储能服务与独立配置储能2种方式的差异,指出引入共享储能可以显著降低用户群的日运行成本。文献[28]以社区综合运营商为研究对象,通过实施共享储能降低了社区用户的用能费用。

此外,在故障或应急场景下,大容量共享储能可以与可再生能源场站或用户组成微电网。此时,共享储能有能力提供事故备用电源、黑启动等故障和应急场景服务。文献[29]提出在线路故障情况下,通过储能可保障区内重要负荷的供电、缓解线路短时拥塞。文献[30]研究了在停电时利用多类型储能协同配合,实现负荷恢复。文献[31]提出了通过风电场中配置的大容量储能系统为附近电厂热电机组

进行黑启动的方案。以上方案可在共享储能设计中加以借鉴。但相比一般储能而言,共享储能还涉及多方参与者的交互和博弈,这也是在第3章定价机制中所重点讨论的问题。

### 1.4 国内外共享储能典型工程实践

中国于2019年在青海省开展了电源侧共享储能的示范工程项目,国网青海省电力公司组织3家新能源发电商开展共享储能调峰辅助服务试点交易<sup>[20]</sup>。2019年,在中国湖南省长沙市进行了电网侧电池储能电站的共享商业模式试点。据测算,储能商每天收益可达1.2万元,每年可获利近367.2万元<sup>[4,25]</sup>。此外,英国、欧盟、美国和澳洲等都相继开展了共享储能的工程试点和应用<sup>[12]</sup>。英国在2012年启动的SoLa BRISTOL项目<sup>[32]</sup>,旨在通过在用户侧部署储能装置并共享储能的方式,克服配电网侧线路的过热、过负荷问题,同时为用户提供经济的电力服务。欧盟在2016年资助的SHAR-Q项目<sup>[33]</sup>通过连接部署在社区内的分布式储能来构建一个储能共享平台,用于减少社区内所需的储能容量。美国加州公用事业公司SMUD在2019年推出了共享储能项目<sup>[34]</sup>,允许参与项目的客户共同投资一个户外储能系统,参与的客户可以使用该户外储能节省用电开支,而无须投资建设自有储能。2019年,特斯拉启动了Connected Solutions项目<sup>[35]</sup>,该计划拟通过向客户提供激励,将美国马萨诸塞州的电池连接起来。在电力需求高峰期,电力供应商可以利用这些并网电池中存储的能量,减少峰值负荷时期的电力供应。澳大利亚公用事业公司ShinHub在2020年开展了储能共享项目<sup>[36]</sup>,将分布式储能集成到虚拟电厂中向电网提供电力辅助服务。

共享储能在以上场景中的成功应用需要行之有效的商业模式支撑。共享储能参与者的所属关系不同,所采用的商业模式也将有所区别。第2章将对共享储能商业模式的研究现状进行梳理。

## 2 共享储能的商业模式

本章根据公共储能与用户参与者的所属关系不同将共享储能的商业模式划分为3类:用户投资和共享公共储能、用户共享运营商投资的公共储能、用户共享自有储能。

### 2.1 用户投资和共享公共储能

该方式下所有用户共同投资一个公共储能设备,以一个公共储能设备满足多个用户的储能需求,结构如图2所示。通过对已有研究进行综述,此方式下的运行策略可分为基于容量分配和基于能量统一汇聚2类。

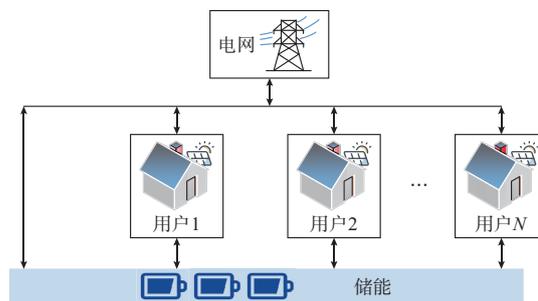


图2 用户共同投资运营的共享储能架构  
Fig. 2 Architecture of shared energy storage with joint investment and operation by users

#### 2.1.1 基于容量分配的方式

基于容量分配的方式要求预先分配好各用户可使用的储能容量,然后各用户根据分配好的容量独自制定储能充放电计划。

文献[10]提出了一种基于平均容量的分配方式。首先,每个用户从共享储能处获得相等的容量;然后,各用户可再对分配的容量进行微调以降低自身的用电成本。但是,用户可使用的储能容量受限于预先的分配值,可能存在某一时刻其中一方用户具有闲置的储能容量,而另一方用户恰好出现储能容量不足的情况。由于储能容量分配已确定,无法进行能量交换,导致储能无法被充分利用。文献[37]针对一个共享储能系统同时服务居民用户和小型商业用户的情景,提出了一种用户内部基于协商流程确定储能容量份额的优化方法。在初始容量分配方案的基础上,不同用户之间通过协商的方式逐步改进分配方案。相比于固定不变的容量份额分配方式,该变容量的方法可随时动态调整分配给不同用户的储能容量份额,有效提高了共享储能的使用率,但随着参与者数量的增长,计算也将变得更复杂。另外,考虑到储能具有运行灵活、响应快的优点,除服务负荷用户以降低其用电成本外,储能还可参与到多种电力服务市场之中。文献[38]旨在将储能容量份额合理地分配到3种电力市场(能量套利市场、辅助服务市场、配电网市场)中,分别用于峰谷套利、提供调频服务、缓解线路阻塞,不同时间段的容量份额不同,可采用投资组合理论最大化储能收益并降低可能的风险成本。

除储能容量分配方式外,用户与共享储能系统的实时运行与控制也受到了很多研究的关注。由于负荷、可再生能源发电存在不确定性,难以准确预测,文献[39]提出了一种基于李雅普诺夫优化的、以时间平均成本最小化为目标的在线控制方法。另外,考虑到用户的隐私保护问题,相比于需要知悉用户私有信息的集中式解决方案,分布式优化方法被

广泛采用<sup>[40]</sup>。分布式优化方法只需要多主体之间交互少量的信息即可实现全局最优<sup>[41]</sup>,但其实施需要用户之间的多次通信交互与迭代,这离不开信息通信技术的有效支撑<sup>[42]</sup>。

### 2.1.2 基于能量统一汇聚的方式

基于能量统一汇聚的方式是指共享储能汇集所有用户与储能的能量交互曲线,然后确定共享储能的整体充电和放电计划,而不是拆分容量的方式。文献[13]以住宅用户共同投资运营公共储能为例,研究结果显示,相比于用户单独投资储能,用户共同投资运营共享储能可以使总成本降低2.4%。文献[43]研究了住宅区部署共享储能的典型场景,各用户通过输电线路与共享储能设备以及电网相连,共享储能统一汇集用户的充放电需求,省去了将储能容量预先分配给各用户的步骤。文献[44]进一步针对住宅用户部署共享储能的场景,构建了最小化用电成本和碳排放的多目标优化问题,利用共享储能充当集中的能量缓冲装置,应对可再生能源发电和负荷的波动,间接实现了用户间的用能互补。由于属于集中调控,该方式下用户对储能使用的独立自主性有所下降。

## 2.2 用户共享运营商投资的公共储能

家庭用户、小规模商业用户等所需储能容量往往较小,且对储能设备的价格较为敏感,难以从市面上买到恰好符合其容量需求的储能模块。因此,由第三方负责投资建设并运营的共享储能模式(见图3)不失为一种有效的解决方案。在此方式下,共享储能由独立于各用户的第三方机构即共享储能运营商负责投资建设、运行和维护。运营商为用户提供储能服务,服务方式大致可分为2类:一是向用户提供储能使用容量;二是向用户提供充放电服务。由于用户众多,共享储能的使用率得以提高。同时,用户用电负荷的多样性和用户之间用电行为的互补性为共享储能运营商选择储能投资容量、充放电功率和时机提供了优化空间。

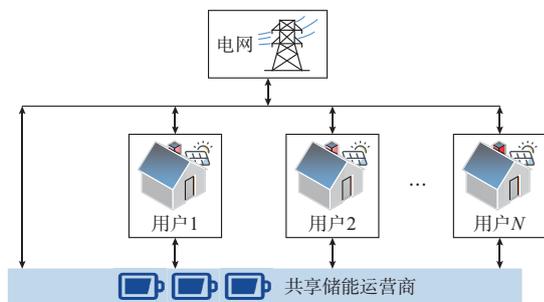


图3 运营商管理共享储能的架构  
Fig. 3 Architecture of shared energy storage managed by operator

### 2.2.1 向用户租赁储能使用容量的方式

文献[9]提出了一种基于价格的两阶段方法。共享储能运营商在第1阶段以投资运行总成本最小化为目标设定其投资容量和用户购买储能使用容量的价格,用户在第2阶段根据发布的价格策略性地调整其所需要购买的储能使用容量。文献[45-46]站在共享储能运营商的角度,提出了云储能的概念、运营机制及其容量优化设计方法。用户使用云储能运营商提供的虚拟储能来代替用户侧的实体储能,并根据自身储能使用需求确定储能充放电功率及时机,以达到使用云端虚拟储能就如同使用实体自安装储能一样的效果。在这种方式下,云储能运营商主要向用户提供虚拟储能容量,不干涉用户对虚拟储能的充放电行为,用户使用储能的充放电功率由用户自身的需求决定。

在文献[45]的研究中,共享储能运营商将所有用户的储能充放电策略聚合起来,根据聚合的结果,以总成本(共享储能的年投资成本加上通过电网为共享储能充放电的年运行成本,减去提供充电服务所获得的收益)最小化为目标,统筹进行共享储能容量的优化设计。该研究侧重于证明投资建设共享储能相比于单独为用户配置储能可以节约更多的运行成本。文献[47]提出了一种在线储能容量分配方法,允许用户每天改变租赁的储能容量,与文献[45-46]相比更为灵活。总体上,共享储能模式优于分散式的储能模式,用户决定所使用的储能容量并向储能运营商购买,但该方式下的用户可能进行频繁的充放电,会对电池寿命造成一定的影响。2.2.2节中租赁充放电服务的方式可以对用户的储能充放电行为加以约束。

基于容量分配的方式(2.1.1节)和向用户租售储能使用容量的方式(2.2.1节)的相同之处在于:都是用户从共享储能获得一部分储能使用容量;不同之处在于,2种方式中共享储能的所有者主体不同,2.1.1节中共享储能由用户共同投资和享有,用户的容量分配更关注公平性,如文献[11]提出的基于平均容量的分配方式及其改进,而2.2.1节中的共享储能由第三方独立运营商投资和运营,运营商旨在最大化自身收益或最小化成本,用户的储能使用容量受到实际使用需求和独立运营商的共同影响。因此,2种方式虽有相似之处,但存在本质区别。

### 2.2.2 向用户租赁充放电服务的方式

在该方式下,共享储能运营商根据用户实际产生的充放电行为进行收费。文献[48]以配有储能和光伏设施的公寓住宅楼为研究对象,将储能等设施的运营商与用户之间的交互作用建模为双层优化问

题。其中,储能等分布式能源设施为第三方所有,住宅楼内的用户可以选择从储能等设施或电网购电以满足其日常用电需求。考虑到投资建设一个规模化的共享储能设施的费用较为昂贵,共享储能运营商通过调整储能充放电服务价格可以间接影响用户的储能需求,从而在减少投资成本与保证用户效益之间寻求最佳的平衡。考虑到多个用户之间的策略性交互关系及其对实时电价的影响,文献[49]进一步将双层 Stackelberg 模型中的下层建模为一个非合作博弈问题,其纳什均衡解作为用户最终的策略。此时,运营商和用户、用户内部都存在利益冲突,使该方式与租赁容量的方式相比更为复杂。文献[50]指出,可以利用价格机制调动用户参与共享储能交易的积极性,并提出了一种基于强化学习的方法求解共享储能服务的价格。但相比于优化的方法,其需要花费较多的训练时间和训练次数方能得到一个收敛的解。

### 2.3 用户共享自有储能

此方式下,每个用户安装有单独的储能设备,用户之间可以进行能量交易,如图4所示。

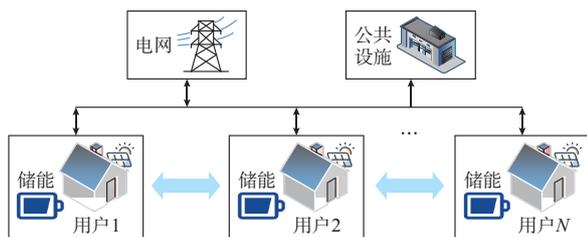


图4 用户自有储能共享的架构  
Fig. 4 Architecture of shared energy storage owned by each user

用户共享自有储能可分为自有储能用户群体内部共享储能、自有储能用户群体向外部(如电网)共享储能2种方式。在前者中,用户既可能将自有的储能共享给其他用户使用,又可能共享使用其他用户的储能,即共享是双向的;在后者中,用户将自有储能共享给电网等使用,而电网侧的储能则一般不会共享给用户使用,即共享是单向的。

#### 2.3.1 自有储能用户群体内部共享储能

出于对电网运行稳定性的考虑,在某些情况下(如电压、频率超过允许的范围),来自用户侧的分布式可再生能源发电被禁止并网。此时,用户过剩的发电量只能被削减或弃用,导致能量利用率变低。通过用户之间共享储能,结合合理的运营方式,可以有效降低所有用户的用电成本,提高分布式可再生能源发电的就地消纳水平,而不是将过剩的电能直接反馈给电网端,减少了对电网的冲击。

文献[15]针对工业园区内多个负荷用户进行储能投资决策的场景,比较了有储能共享与没有储能共享2种情况下的总成本。结果显示,用户之间储能共享可以有效减少储能的安装容量,并提高用户的平均收益。但是,该研究对分时电价曲线进行了简化处理,可能使得该研究结果无法适应真实的情况。文献[51]基于实际分时电价数据,研究了微电网之间的能量共享问题,其中每个微电网可看作是一个配置有储能装置的参与者。相比于各微电网独立运行即无储能共享的场景,微电网之间通过储能共享的方式有效降低了所有用户的总成本。

#### 2.3.2 自有储能用户群体向外部共享储能

用户与外部共享储能是指用户将自身的一部分储能容量供外部设施使用,从而实现储能的多功能利用。文献[52-53]研究了单一用户将自有的部分储能容量共享给配电网侧使用的场景,属于“一对一”的情况。其中,文献[52]提出一种基于比例的方式将储能容量一分为二,一部分储能容量用于负荷侧需求响应,另一部分储能容量供配电网用于变压器端的削峰填谷。通过容量共享有效地减少了用户的购电成本并缓解了电网侧的调峰压力,实现了用户侧和电网侧的双赢。考虑到配电网的运行状态和电网价格的时变特性,文献[53]进一步提出一种动态储能容量分配方法。研究结果显示,在典型冬季日下,结合共享储能的灵活运行方式,可以为用户多节省16.11欧元的用电开支。

随着储能的不断普及和在用户侧的持续渗透,出现多个家庭用户都配有储能的情况。因此,多个用户共享自有储能给公共设施利用的这种“多对一”的情况成为可能。文献[54]针对社区内多个家庭用户共用公共用电设施的场景,提出一种社区用户将自身储能共享给公共设施使用的拍卖机制,用于确定各家庭用户愿意与社区公共设施共享储能容量的比例。以此类推,目前针对“多对多”场景,即多用户与多外部设施共享储能研究的相关文献较少。

表1总结了以上3类方式的优缺点。此分类方式的优势在于,可体现共享储能所有权和使用权的主体归属关系及物理特征的不同,而这正是导致共享储能参与者的利益诉求和采用的策略有所区别的关键。进一步,针对三大类中的每一类,结合不同的利益诉求,又进行了策略层面上的细分,从而更全面地反映各类共享储能方式的特点。

## 3 共享储能的定价机制

在上述共享储能的诸多商业模式下,用户之间、用户与共享储能运营商之间通过储能共享,提升了

表 1 3类共享储能商业模式的对比与总结  
Table 1 Comparison and summary of three kinds of business modes for shared energy storage

共享储能商业模式	特征	优点	缺点	相关文献
用户投资和共享公共储能	1)用户共享一个集中式公共储能 2)储能所有权属于所有用户 3)需要一个协调角色负责所有用户与共享储能的运行	1)降低所有用户的总投资成本 2)储能利用效率较高	容量分配的方式虽然简单易行,但用户可使用的储能容量受限于预先的分配容量,灵活性不足;能量统一汇聚的方式下,用户对储能使用的独立自主性下降	[10,13,37-39,43-44]
用户共享运营商投资的公共储能	1)用户共享一个集中式公共储能 2)共享储能由第三方投资运营	用户无须投资建设储能	1)运营商需要承担所有投资运营风险 2)定价机制设计困难	[9,14,45-50]
用户共享自有储能	1)用户自有储能 2)间接实现储能共享	用户享有储能的全部所有权和使用权,使用灵活	1)用户承担的成本高 2)储能利用效率较低	[15,51-54]

储能的利用率,降低了用户的用电成本,提高了系统的总运行效益。考虑到用户和共享储能运营商作为独立的决策主体,追求自身成本最小化或收益最大化,彼此间存在利益冲突,因此,如何设计有效的激励机制以调动参与共享储能的积极性是关键。共享储能的定价机制或成本分配方案的相关研究大致可以分为以下3类,划分依据如下:

1)基于边际价格的方式。首先,求解一个集中优化问题,并将相关约束对偶变量的值作为价格。为实现此定价,需要收集所有用户的负荷、储能需求等信息。考虑到用户隐私保护和通信、计算复杂度等,此方式适用于小型系统,如共享储能社区。

2)基于博弈论的方式。这类方式侧重于考虑参与者之间的竞争关系,期望通过合适的机制协调参与者的行为。此方法不一定能实现社会最优,但一般可实现隐私保护。

3)其他基于经验规则的定价机制。与上述两种方式具有成熟、普适的方法/理论相比,这类方法的特点是根据经验规则或专家的知识,针对共享储能特定场景的特点,构造适用于特例的定价机制。

### 3.1 基于边际价格的定价机制

边际定价方案因其公平性和对拥堵定价的能力而被广泛应用于电力市场中<sup>[55]</sup>。包含用户和共享储能系统的社区可看作一个小型的电力市场,该市场旨在通过优化资源分配最大限度地提高整个社区的效益。类似地,市场内部交易的电价可通过负荷分配问题最优解对应的对偶变量值决定,此对偶变量的值反映了边际成本。文献[43]以最小化社区的总用电成本为目标,对共享储能社区按照边际成本定价,并通过不动点方法交替固定电价和负荷需求2个变量进行迭代求解。但是,该方法需要较多的迭代次数,当参数选择不合理时面临求解不收敛的风险。

### 3.2 基于博弈论的定价机制

在共享储能的研究中,存在用户与共享储能运营商等多个利益主体,如何分析多方利益主体在使用共享储能时的策略性行为,提出合适的成本利益分配或定价协调机制,是共享储能场景中需要解决的关键问题之一。目前,利用博弈论进行共享储能定价的研究可按照博弈的类型分为基于非合作博弈和基于合作博弈的方式两大类。

#### 3.2.1 基于非合作博弈的方式

##### 1)基于拍卖理论的定价机制

拍卖本质上是一个不完全信息条件下的非合作博弈的纳什均衡。拍卖理论已经广泛应用于智能电网的能源管理中,特别是电力市场交易和需求侧管理之中<sup>[56]</sup>。根据拍卖物品的类型,拍卖可以分为单一类型拍卖和组合拍卖。在单一类型拍卖中,拍卖物品单一如只有储能容量,而在组合拍卖中,可拍卖物品更多样,可包括储能容量、充电功率、放电功率等<sup>[57]</sup>。按照卖方和买方的对应关系,拍卖又可以分为单向拍卖和双向拍卖。单向拍卖即单一卖家、多方买家的“一对多”结构,双向拍卖则具有“多对多”的市场结构。因此,单向拍卖常面临着卖家垄断问题,而双向拍卖尽管可避免垄断问题,但需要统一调控平台协调,当参与者众多时计算量大<sup>[58]</sup>。

在进行拍卖前,将参与者划分为买方和卖方,可以根据参与者的净负荷的正负确定。然后,投标人进行密封投标,这保证了其他投标参与者的出价情况对投标者保密。投标上标注有买方和卖方各自的报价和对应的需求电量或发电量信息,这些投标被第三方拍卖商或平台集中收集和管理,并利用预先定好的交易规则匹配交易双方,决定最终的交易价格和交易数量。上述过程中交易规则是关键,文献[54]利用 Vickrey 拍卖规则确定共享储能价格,文献[59]则根据匹配好的买卖双方价格差的绝对值大

小顺序进行交易价格的确定。文献[60]将双向拍卖理论应用于储能共享中,储能运营商和用户在拍卖商的组织下进行组合双向拍卖,并提出了在买卖双方之间均分社会福利的定价机制。由于参与者的市场地位(作为买方或卖方)需事先确定,基于拍卖的方式限制了参与者的灵活性<sup>[61]</sup>。

## 2) 基于 Stackelberg 博弈的方式

Stackelberg 博弈是非合作博弈中的典型代表。将 Stackelberg 博弈应用于共享储能中,可研究用户与共享储能运营商之间的相互作用和双方的最优策略。具体来说,共享储能运营商作为先行者,通过制定价格以最大化运营收益;用户作为跟随者,通过调整储能的充放电策略,以最小化用电成本。运营商定价的高低将会影响用户对储能的使用,运营商和用户之间构成 Stackelberg 博弈关系。Stackelberg 博弈的求解可通过:

(1) 将下层问题以其 KKT 条件替代,将双层问题转换为单层问题求解。

(2) 通过上下两层交互迭代的方式求解:

步骤 1: 初始化共享储能使用价格;

步骤 2: 跟随者根据先行者发布的价格,优化决策储能的充放电策略,并反馈给先行者;

步骤 3: 先行者根据跟随者反馈的充放电策略,在考虑自身决策调整可能会对跟随者策略的影响的情况下,调整优化共享储能价格,以最大化自身收益;

步骤 4: 若在相邻 2 次迭代中价格或策略变化很小,则退出迭代并报告最优策略,否则返回步骤 2。

值得注意的是,与求解纳什均衡不同,在求解 Stackelberg 均衡时,先行者更新策略时需考虑跟随者可能的反应。步骤 3 可通过遗传算法<sup>[62]</sup>等实现。

文献[48]研究了在住宅楼内实施共享储能的问题,其中,提供共享储能服务的第三方作为 Stackelberg 博弈模型中的先行者,期望通过调整价格实现收益最大化;用户作为跟随者以用电成本最小化为目标,策略性地调整自身对储能和电网的购电计划,并通过基于拍卖理论的定价机制求解该问题。文献[63]将电力零售商视为用户与社区共享储能系统的接口,由电力零售商集中代表用户作为跟随者进行需求响应决策,并提出通过基于 Stackelberg 博弈的方式,即上下层迭代的方式,求解该博弈问题。需要注意的是,在基于非合作博弈的定价机制下,各参与者独立决策,以自身成本最小化为目标,彼此间存在利益冲突,可能导致博弈均衡偏

离社会最优点<sup>[64]</sup>,即调度决策无法实现社会福利最大化,或者难以保证资源配置的公平性。

## 3.2.2 基于合作博弈的方式

基于合作博弈的定价机制能够促使共享储能参与者合作,从而以更低的社会总成本实现储能资源的高效分配。为此,需设计公平、有效的再分配机制,合理地衡量每个参与者的贡献。

### 1) 基于 Shapley 值的分配方法

Shapley 值法是根据博弈参与者对其所参与的联盟的边际贡献,对所得合作收益进行分配的方式,可兼顾分配的合理性和公平性。文献[65]将 Shapley 值法应用于社区共享储能的功率分配和定价机制中。文献[66]在研究多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊问题时,提出了基于线路功率损耗的改进 Shapley 值法,考虑了各微电网由于地理位置差异而导致向共享储能充放电的线路损耗不同。常规的 Shapley 值法只考虑了边际成本因素,而假设所有参与者的风险偏好是相同的,文献[67]提出一种改进的 Shapley 值法,将参与者的不同风险偏好类型纳入分配模型中。基于 Shapley 值的分配方式存在且唯一,但其计算复杂度随着参与者数量的增加而迅速增长。Shapley 值法侧重于分配的公平性,但不一定是稳定的分配。事实上,某些空核博弈不存在稳定分配方式,但仍可计算其 Shapley 值。此时,某些成员通过组成的小联盟可以获得比在大联盟中更多的收益,因此,小联盟对某些成员来说可能更具吸引力,而大联盟不稳定。文献[68]证明,当博弈为凸博弈时,Shapley 值法的分配是稳定分配。

### 2) 基于核仁(nucleolus)的分配方法

Shapley 值法得到的分配方案不能保证用户不会背离联盟,即不能保证联盟的稳定性,另一种可行的分配方法是核仁法。核仁法是一种旨在最小化合作博弈中联盟的最大不满意程度的分配方法。文献[69]提出一种基于合作博弈的模型研究风电和光伏电站的共享储能容量分配问题,并利用核仁法进行利益分配。文献[70]综合考虑共享储能的规划、运行与成本分配问题,构建了合作博弈模型并基于核仁法进行事后成本分配,以解决各参与者的分配公平问题。核仁法可以避免利益分配上的平均主义,能保证分配结果的存在性、唯一性和稳定性,但随着参与者数量的增加,核仁法同样面临着计算量大的问题。

### 3) 基于纳什讨价还价的分配方法

纳什讨价还价(Nash bargaining)是一种博弈参与者期望通过达成一致协议,在最大化个人利益的同时避免谈判破裂的方法。该方法可提高每个参与者的经济效益<sup>[71-72]</sup>,同时限制每个人的受益程度,保证了结果的公平性。文献[71]指出,纳什讨价还价方法可以产生帕累托有效且公平的结果。针对光伏产消者和社区共享储能场景,文献[72]提出了基于纳什讨价还价的利益共享模型,鼓励用户和社区共享储能参与合作。由于纳什讨价还价旨在提升所有参与者的收益,该方法可以有效激励和引导参与者合作,但该方法要求已知每个参与者谈判破裂点的收益值,在现实中较难实施。

### 3.3 其他基于经验规则的定价机制

#### 1) 中间市场价格

区别于从电网买卖电量的价格,该方式用于确定共享储能参与者内部交易即买卖储能充放电量的价格。基于中间市场价格的方式直接将电网购电的价格和向电网售电的价格的平均值确定为内部电量交易价格<sup>[73]</sup>。因此,参与者可以以低于从电网买电的价格从其他参与者处购电,以高于向电网售电的价格卖电给其他参与者,实现了用电成本的减少。该方式较为直接,而且由于不同时间段从电网的购电价格不同,该方法得到的共享价格自然也是随时间变化的,可以归纳为一种分时定价机制。

#### 2) 账单分摊方式

账单分摊机制根据用户消耗(生产)的电量来分担总成本(收益)<sup>[59]</sup>。首先,分别计算出有储能共享和没有储能共享2种情况下的电网购售电量;然后,根据两者的比例对电网的购售电价进行一定的修正;最后,每个用户依据修正后的电价进行用电成本的核算,故计算上较为滞后。

#### 3) 供需比率动态定价机制

供需比率动态定价(supply demand ratio dynamic pricing, SDRDP)机制是一种根据社区内不同时间段的能源供需情况决定内部交易价格的方式。与中间市场价格类似,SDRDP机制的内部交易价格同样被限制在从电网购电价格和向电网售电价格之间,但同时考虑了用户之间供需比的差异性<sup>[74]</sup>。若用户的供需比率小于1,则说明该用户需要从其他用户处购买电量。用户供需比率越低,说明其购电意愿越强烈,可承受的购电价格越高。若用户的供需比率大于1,则供需比率越高的用户在当前时段的发电量更为过剩,该用户出售这部分过

剩能量的意愿也更为强烈。因此,其售电价格可以比供需比率稍低的用户更低一些。从以上分析可以看出,SDRDP机制相比于中间市场价格机制能够进行更细致的利益分配。

文献[75]对以上3种基于经验规则的定价机制进行效益比较,得出SDRDP机制总体上最优,其次是基于中间市场价格的方式,最后是账单分摊方式。基于供需比率和中间市场价格的方式都能保证参与者的收益增加和成本下降。

## 4 研究展望

共享储能为提高储能设备利用效率、应对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。未来研究可针对多共享储能运营商参与、电动汽车聚合作为移动共享储能2个场景深入挖掘。

#### 1) 多共享储能运营商参与的运营机制

目前的研究大多针对多个用户与单个共享储能运营商的情形,但考虑到当前储能成本仍然较高,单一共享储能运营商的情况需要较大投资,对储能投资者而言经济上不友好,不利于共享储能模式的推广。因此,多个储能运营商分别投资运营多个小共享储能设施并共同服务一群用户的方案有望成为应对该问题的思路之一。目前,关于多共享储能运营商的研究尚不多见。

针对上述问题及其衍生出来的相关问题,给出以下可行的研究方向和具体措施。

(1)由于每个储能运营商都可以为用户提供储能服务,而储能运营商的目的是最大化自己的收益,多个储能运营商之间无形中存在着竞争关系,故不同储能运营商之间的策略可以利用非合作博弈理论进行建模与分析。

(2)对于多个共享储能运营商的情形,用户的选择必将多样化,每个用户可选择一个或多个运营商,由每个运营商满足用户的一部分需求。因此,用户与储能运营商之间的优化匹配问题需要进行详细研究,而这种优化匹配可以通过建立指派问题进行研究。

(3)考虑到用户的负荷类型不同,对于爬坡大的负荷需要储能快速响应,对储能冲击大,有损储能的寿命,而波动小的负荷对储能相对友好,故对于不同类型的负荷,共享储能运营商可选择提供差异化的储能服务收费,而不是目前一视同仁的收费模式。

## 2) 电动汽车作为移动共享储能

随着纯电动汽车的普及和性能提升,除去交通工具属性以外,电动汽车的移动储能属性得到重视。一方面,电动汽车的车载电池包容量不断提升,如特斯拉的电动汽车电池包容量已达到100 kW·h;另一方面,电动汽车一天内大部分时间处于停车状态,而停车场所在的商业建筑、工业园区等又恰好属于大用电负荷用户。此时,若利用闲置的处于停车状态的电动汽车群为这类用户提供需求响应服务,可在降低用户用电支出的同时为电动汽车赚取额外收益。

电动汽车聚合作为共享储能可视为一种具有前景的方案,不仅提高了电动汽车的利用效率,为电动汽车创造了额外收益,而且商业建筑也无须再额外购置储能或减少购买储能的容量,实现商业建筑与电动汽车用户的双赢。在这一特定场景下可能的研究方向包括:

(1) 电动汽车作为共享储能的运营机制,特别是如何在运营机制中考虑电动汽车充电和出行相关的时空关联型的不确定性因素,是亟待研究的问题。因此,需要对与电动汽车相关的不确定性因素进行详细的研究,建立电动汽车的随机出行模型,进而利用处理不确定性的技术手段如随机优化、鲁棒优化指导电动汽车聚合作为共享储能的优化运行。

(2) 电池频繁充放电会加速电池的老化,影响电池的性能,对电动汽车用户不利。因此,需要融合精确的电池衰减模型将电池容量衰减因素纳入考虑,进行详细的成本效益分析,为电动汽车用户参与共享储能提供决策参考。

此外,当前的大多数文献集中在共享储能商业模式层面的研究,更深入地讨论共享储能导致的额外潮流损耗、拥塞及其导致的额外成本分摊等问题的文献较少,随着共享储能的发展和实际部署,上述问题同样值得深入研究。

共享储能的蓬勃发展离不开先进的技术支撑和政策保障。所需依赖的技术支撑包括:一是先进信息技术。作为信息流动的载体,共享储能系统的数据采集、决策计算和控制执行中的数据流需要信息通信技术的支撑;二是储能技术本身。储能技术的不断发展与突破可进一步提升储能的性能、降低储能的成本、促进储能的普及,进而带动共享储能的发展;三是隐私保护技术。共享储能参与者众多,若采用集中式管理,各用户的私有数据面临泄露的风险,随着隐私保护逐渐受到社会的关注,亟需相应

的隐私保护技术作为支撑。共享储能的发展需要依赖的政策保障包括:首先,分时电价是用户侧储能得以进行峰谷套利的的基础,因此需要有实时电价或峰谷电价等电价机制的支持;其次,持续推进分布式可再生能源发展的相关政策,也可带动共享储能的发展,这是因为应对可再生能源发电的间歇性、波动性、不确定性需要储能的配合。此外,为使用户较好地理解与接纳共享储能,也需要制定相关政策提高对用户的宣传力度。

## 5 结语

共享储能为降低用户用电成本、提高储能设备的利用率、促进可再生能源消纳、保障电网安全可靠运行提供了可行方案。本文给出了共享储能的概念,分析了其可能带来的机遇,介绍了共享储能的应用场景与工程实践,并对共享储能商业模式和定价机制方面的相关研究进行了综述。在此基础上,对共享储能未来的研究方向进行了展望。所提共享储能商业模式,通过用户之间的供需互补和运营商的协调运行,可实现参与者双赢的局面,具有广阔的发展前景。

本文研究受香港中文大学科研启动基金、香港中文大学科研直接资助基金(4055169)资助,特此感谢!

## 参考文献

- [1] 鲁宗相,黄瀚,单葆国,等.高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J].电力系统自动化,2017,41(9):12-18.  
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (9): 12-18.
- [2] 徐潇源,王哈,严正,等.能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J].电力系统自动化,2021,45(16):2-13.  
XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (16) : 2-13.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [4] TANG Y Y, ZHANG Q, MCLELLAN B, et al. Study on the impacts of sharing business models on economic performance of

- distributed PV-battery systems [J]. Energy, 2018, 161: 544-558.
- [5] 郭毅, 胡泽春, 张洪财, 等. 居民区配电网接纳电动汽车充电能力的统计评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2458-2464.  
GUO Yi, HU Zechun, ZHANG Hongcai, et al. A statistical method to evaluate the capability of residential distribution network for accommodating electric vehicle charging load [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2458-2464.
- [6] 贾龙, 胡泽春, 宋永华, 等. 储能和电动汽车充电站与配电网的联合规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 73-84.  
JIA Long, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Joint planning of distribution networks with distributed energy storage systems and electric vehicle charging stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 73-84.
- [7] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3361-3371.  
LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3361-3371.
- [8] ZHAO D W, WANG H, HUANG J W, et al. Virtual energy storage sharing and capacity allocation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1112-1123.
- [9] LAI S Y, QIU J, TAO Y C. Individualized pricing of energy storage sharing based on discount sensitivity [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(7): 4642-4653.
- [10] JO J, PARK J. Demand-side management with shared energy storage system in smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4466-4476.
- [11] DAI R, ESMAEILBEIGI R, CHARKHGARD H. The utilization of shared energy storage in energy systems: a comprehensive review [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3163-3174.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] KALATHIL D, WU C Y, POOLLA K, et al. The sharing economy for the electricity storage [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 556-567.
- [15] SHI Y Y, XU B L, WANG D, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains [C]// 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), August 5-8, 2018, Portland, USA.
- [16] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6.  
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [17] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.  
ZHANG Wenliang, QIU Ming, LAI Xiaokang. Application of energy storage technologies in power grids [J]. Power System Technology, 2008, 32(7): 1-9.
- [18] 程时杰. 大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 3-8.  
CHENG Shijie. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 3-8.
- [19] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠, 等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.  
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. “Generation-Grid-Load-Storage” coordinative optimal operation mode of energy Internet and key technologies [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [20] 董凌, 年珩, 范越, 等. 能源互联网背景下共享储能的商业模式探索与实践[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 38-44.  
DONG Ling, NIAN Heng, FAN Yue, et al. Exploration and practice of business model of shared energy storage in energy Internet [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 38-44.
- [21] 邱伟强, 王茂春, 林振智, 等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 244-255.  
QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255.
- [22] 孙偲, 陈来军, 邱欣杰, 等. 基于合作博弈的发电侧共享储能规划模型[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(4): 360-366.  
SUN Cai, CHEN Laijun, QIU Xinjie, et al. A generation-side shared energy storage planning model based on cooperative game [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 360-366.
- [23] ELLIOTT R T, FERNÁNDEZ-BLANCO R, KOZDRAS K, et al. Sharing energy storage between transmission and distribution [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 152-162.
- [24] XU Y X, SINGH C. Power system reliability impact of energy storage integration with intelligent operation strategy [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1129-1137.
- [25] 杨俊, 黄际元, 秦泽宇, 等. 电网侧电池储能电站的共享商业模式研究[J]. 大众用电, 2020, 35(3): 20-22.  
YANG Jun, HUANG Jiyuan, QIN Zeyu, et al. Research on sharing business model of grid-side battery energy storage power station [J]. Popular Utilization of Electricity, 2020, 35(3): 20-22.
- [26] 张福民, 裴雪辰, 王博. 主动配电网与输电网协调调度与阻塞

- 管理[J].电测与仪表,2020,57(3):46-53.  
ZHANG Fumin, PEI Xuechen, WANG Bo. Coordinated dispatch and congestion management of active distribution network and transmission network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(3): 46-53.
- [27] 李淋,徐青山,王晓晴,等.基于共享储能电站的工业用户日前优化经济调度[J].电力建设,2020,41(5):100-107.  
LI Lin, XU Qingshan, WANG Xiaoqin, et al. Optimal economic scheduling of industrial customers on the basis of sharing energy-storage station[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 100-107.
- [28] 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. Synergic optimization of community energy Internet considering the shared energy storage[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 77-84.
- [29] 周博,宋明刚,黄佳伟,等.应对区域供电线路故障的多功能复合储能优化配置方法[J].电力系统自动化,2019,43(8):25-33.  
ZHOU Bo, SONG Minggang, HUANG Jiawei, et al. Configuration optimization method of multifunctional hybrid energy storage for regional power line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 25-33.
- [30] 王颖,祝士焱,许寅,等.考虑多类型储能协同的重要负荷恢复方法[J].电力自动化设备,2022,42(1):72-78.  
WANG Ying, ZHU Shiyan, XU Yin, et al. Critical load restoration method considering coordination of multiple types of energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 72-78.
- [31] 刘力卿,杜平,万玉良,等.储能型风电场作为局域电网黑启动电源的可行性探讨[J].电力系统自动化,2016,40(21):210-216.  
LIU Liqing, DU Ping, WAN Yuliang, et al. Feasibility discussion on using storage-based wind farm as black-start power source in local power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 210-216.
- [32] KAUSHIK S, DALE M, AGGARWAL R, et al. Project SoLa BRISTOL migration from “ecohome” to “integrated homes” [C]// 2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), September 2-5, 2014, Cluj-Napoca, Romania: 1-5.
- [33] Storage capacity over virtual neighbourhoods of energy ecosystems [EB/OL]. [2022-04-07]. <http://www.sharqproject.eu/the-project>.
- [34] State leadership in clean energy: SMUD’s energy storage shares and smart energy optimizer programs [EB/OL]. [2022-04-07]. <https://www.cesa.org/event/smud-energy-storageshares/>.
- [35] Earn cash from your Powerwall and create a cleaner, stronger grid[EB/OL]. [2022-04-07]. <https://www.tesla.com/connectedsolutions>.
- [36] The future of Australia’s renewable energy starts with you [EB/OL]. [2022-04-07]. <https://shinehub.com.au/virtual-power-plant/>.
- [37] DIMITROV P, PIRODDI L, PRANDINI M. Distributed allocation of a shared energy storage system in a microgrid [C]// 2016 American Control Conference (ACC), July 6-8, 2016, Boston, USA: 3551-3556.
- [38] YAN X H, GU C H, WYMAN-PAIN H, et al. Capacity share optimization for multiservice energy storage management under portfolio theory [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1598-1607.
- [39] ZHONG W, XIE K, LIU Y, et al. Online control and near-optimal algorithm for distributed energy storage sharing in smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2552-2562.
- [40] XU Y L. Optimal distributed charging rate control of plug-in electric vehicles for demand management [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1536-1545.
- [41] RIVERA J, GOEBEL C, JACOBSEN H A. Distributed convex optimization for electric vehicle aggregators [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1852-1863.
- [42] CHENG Z Y, DUAN J, CHOW M Y. To centralize or to distribute: that is the question: a comparison of advanced microgrid management systems [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2018, 12(1): 6-24.
- [43] ZHANG W Y, WEI W, CHEN L J, et al. Service pricing and load dispatch of residential shared energy storage unit [J]. Energy, 2020, 202: 117543.
- [44] TERLOUW T, ALSKAIF T, BAUER C, et al. Multi-objective optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using different battery technologies[J]. Applied Energy, 2019, 239: 356-372.
- [45] LIU J K, ZHANG N, KANG C Q, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: a business case study[J]. Applied Energy, 2017, 188: 226-236.
- [46] LIU J K, ZHANG N, KANG C Q, et al. Decision-making models for the participants in cloud energy storage [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 5512-5521.
- [47] XIE K, ZHONG W F, LI W J, et al. Distributed capacity allocation of shared energy storage using online convex optimization[J]. Energies, 2019, 12(9): 1642.
- [48] FLEISCHHACKER A, AUER H, LETTNER G, et al. Sharing solar PV and energy storage in apartment buildings: resource allocation and pricing [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 3963-3973.
- [49] MEDIWATHTHE C P, STEPHENS E R, SMITH D B, et al. Competitive energy trading framework for demand-side management in neighborhood area networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4313-4322.
- [50] HE L, LIU Y Z, ZHANG J. Peer-to-peer energy sharing with battery storage: energy pawn in the smart grid [J]. Applied Energy, 2021, 297: 117129.
- [51] WANG H, HUANG J W. Incentivizing energy trading for interconnected microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2647-2657.
- [52] WANG Z M, GU C H, LI F R, et al. Active demand

- response using shared energy storage for household energy management[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(4): 1888-1897.
- [53] WANG Z M, GU C H, LI F R. Flexible operation of shared energy storage at households to facilitate PV penetration[J]. *Renewable Energy*, 2018, 116: 438-446.
- [54] 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.
- [55] WANG C, WEI W, WANG J H, et al. Equilibrium of interdependent gas and electricity markets with marginal price based bilateral energy trading[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 4854-4867.
- [56] ZAIDI B H, BHATTI D M S, ULLAH I. Combinatorial auctions for energy storage sharing amongst the households[J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 19: 291-301.
- [57] ZHONG W F, XIE K, LIU Y, et al. Multi-resource allocation of shared energy storage: a distributed combinatorial auction approach [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(5): 4105-4115.
- [58] 陈玥,刘锋,魏韡,等.需求侧能量共享:概念、机制与展望[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(2): 1-11.  
CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy sharing at demand side: concept, mechanism and prospect [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(2): 1-11.
- [59] LONG C, WU J Z, ZHANG C H, et al. Peer-to-peer energy trading in a community microgrid[C]// 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 16-20, 2017, Chicago, USA: 1-5.
- [60] 孙偲,郑天文,陈来军,等.基于组合双向拍卖的共享储能机制研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(5): 1732-1739.  
SUN Cai, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. Energy storage sharing mechanism based on combinatorial double auction[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(5): 1732-1739.
- [61] CHEN Y, MEI S W, ZHOU F Y, et al. An energy sharing game with generalized demand bidding: model and properties [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(3): 2055-2066.
- [62] HE D, CHEN W, WANG L W, et al. A game-theoretic machine learning approach for revenue maximization in sponsored search [C]// International Joint Conference on Artificial Intelligence, August 3-9, 2013, Beijing, China.
- [63] MEDIWATHTHE C P, SHAW M, HALGAMUGE S, et al. An incentive-compatible energy trading framework for neighborhood area networks with shared energy storage [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 467-476.
- [64] CUI S C, WANG Y W, LIU X K, et al. Economic storage sharing framework: asymmetric bargaining-based energy cooperation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(11): 7489-7500.
- [65] RAJASEKHARAN J, KOIVUNEN V. Cooperative game-theoretic approach to load balancing in smart grids with community energy storage [C]// 2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO), August 31-September 4, 2015, Nice, France: 1955-1959.
- [66] 李威善,解仕杰,方子健,等.多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(10): 44-51.  
LI Xianshan, XIE Shijie, FANG Zijian, et al. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(10): 44-51.
- [67] GAO J W, GAO F J, YANG Y, et al. Configuration optimization and benefit allocation model of multi-park integrated energy systems considering electric vehicle charging station to assist services of shared energy storage power station [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 336: 130381.
- [68] 梅生伟,刘锋,魏韡.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.
- [69] WANG C, WEI W, XUE X D, et al. Sizing shared energy storage for the integration of renewable generation: a coalition game based approach [C]// 2021 40th Chinese Control Conference (CCC), July 26-28, 2021, Shanghai, China: 1774-1779.
- [70] YANG Y, HU G Q, SPANOS C J. Optimal sharing and fair cost allocation of community energy storage [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 4185-4194.
- [71] FAN S L, AI Q, PIAO L J. Bargaining-based cooperative energy trading for distribution company and demand response [J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 469-482.
- [72] CUI S C, WANG Y W, SHI Y, et al. Community energy cooperation with the presence of cheating behaviors[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(1): 561-573.
- [73] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. Peer-to-peer energy trading with sustainable user participation: a game theoretic approach[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 62932-62943.
- [74] LIU N, YU X H, WANG C, et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3569-3583.
- [75] ZHOU Y, WU J Z, LONG C. Evaluation of peer-to-peer energy sharing mechanisms based on a multiagent simulation framework[J]. *Applied Energy*, 2018, 222: 993-1022.

闫东翔(1991—),男,博士后,主要研究方向:优化、博弈论与能源管理。E-mail:dongxiangyan@cuhk.edu.hk

陈玥(1992—),女,通信作者,博士,助理教授,博士生导师,主要研究方向:博弈论、运筹学与能源经济。E-mail:yuechen@mae.cuhk.edu.hk

(编辑 章黎)

## Review on Business Model and Pricing Mechanism for Shared Energy Storage

YAN Dongxiang, CHEN Yue

(Department of Mechanical and Automation Engineering, the Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

**Abstract:** Energy storage is an important means of enhancing power system flexibility to cope with the random fluctuations from power sources and loads. However, the current single-user single-energy-storage configuration and operation mode leads to the problems such as high energy storage investment cost, difficulties in customizing the required energy storage capacity due to the limited types of modules available in the market, and low utilization rate of energy storage devices. To address the above challenges, shared energy storage as a novel business model has captured great attention. This paper gives the concept of shared energy storage and analyzes its potential in reducing user cost, improving energy storage utilization rate, promoting renewable energy accommodation, and enhancing power system stability. Application scenarios of shared energy storage as well as its engineering practices worldwide are elaborated. Based on this, the business models of the shared energy storage are classified into three categories according to the ownership of shared energy storage, namely, sharing of user-investing public energy storage, sharing of operator-investing public energy storage, and sharing of user-owned energy storage. Then, the research related to the energy storage pricing mechanisms is divided into three categories from the price design perspective, and the state-of-the-art and the remaining issues are summarized. Finally, considering that the participation of multiple shared energy storage operators and the use of electric vehicles as mobile shared energy storage are two application scenarios with great potential, this paper provides a targeted outlook for the future research, and points out the key issues to be addressed with possible solutions.

**Key words:** shared energy storage; renewable energy; business model; pricing mechanism; capacity allocation; game theory

