文章编号：2096-5125 (2023) 02-0163-16 中图分类号：TM912；F426 文献标志码：A
DOI：10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2023.02.007

提升电池储能系统经济性研究方法综述

索克兰，程林*，许鹤麟，黄文瑞
（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（清华大学电机系），北京市 海淀区 100084）

A Review of Research Methods for Improving the Economy of Battery Energy Storage System

SUO Kelan, CHENG Lin*, XU Helin, HUANG Wenrui
(State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: With the continuous increase of the proportion of renewable energy connected to the grid, the development of battery energy storage system (BESS) has attracted much attention. It is of great significance for the development of BESS in the future to gradually improve the methods of improving its economic benefits, incentive policies & market mechanisms, and battery hybrid utilization. However, the different physical characteristics, policies and market mechanisms of BESS, and the treatment methods of retired batteries are still to be solved. Therefore, this paper introduces the research status of BESS, including different physical characteristics, and economic evaluation. Secondly, worldwide BESS is summarized from the aspects of policy, power & market operation, carbon market transaction, etc. Thirdly, investigate the applicable scenarios and economic benefits of echelon utilization of BESS. In addition, the current BESS economic research methods and business models are reviewed. Finally, reveal the main problem of BESS participating in power system, and the suggestions of BESS in power system are put forward.

Keywords: physical characteristic; demand and market mechanism; echelon battery; economic research methods; business model

摘　要：随着新能源并网比例持续上升，电池储能系统（battery energy storage system，BESS）的发展备受关注。逐渐完善其激励政策和市场机制，提升其经济效益，对其未来发展具有重要意义。但目前BESS的不同物理特性、政策和市场机制、退役电池的处理方式等问题仍亟待深入研究。分析了BESS的研究现状，包括不同物理特性、参与电力系统价值评估现状。从国内外储能政策的提出、电力市场的运营、碳市场的交易等方面综述了国内外BESS需求及市场机制，并分析了梯次利用BESS的适用场景与经济效益。分析了目前BESS经济性研究方法和商业模式，提出了BESS参与电力系统存在的问题，并且提出改善建议。

关键词：物理特性；需求及市场机制；退役电池；经济性；商业模式

0　引言

随着国家提出“双碳”目标，新能源的发展已成为国家能源战略的重要组成部分。新能源出力的间歇性、波动性等固有特征，对电力系统安全稳定运行带来许多瓶颈问题，如风光出力过小或过大，与负荷需求不匹配，导致大量用户缺电或者新能源利用率问题。因此，在新能源电力系统中引入灵活性资源势在必行。

电池储能系统（battery energy storage system，BESS）作为一种灵活性资源，响应速度快，可解决新能源接入电力系统的挑战，促进新能源高渗透率“最后一公里”的实现[1]，因此，在新能源调度中，BESS具有重要作用。由于电池化学材料及制造方法存在区别，BESS内外特性也表现不同，如能量密度、响应时间、功率密度、能量效率、倍率性能、循环寿命、成本、支撑响应时间等[2]。鉴于此，不同物理特性的BESS在参与调度时经济效益不同[3]。另外，不同场景的BESS经济效益提升方法也有所不同[4]。

从储能物理特性看，相比于传统灵活性资源，BESS的利用率、物理约束、成本特性、装置规模[5-8]等具有可优化空间，可根据实际运行工况进行设计，其收益与调度场景紧密相关。在利用率方面，BESS可

基金项目：国家重点研发计划（2018YFC1902200）；国家自然科学基金（52037006）。
National Key R&D Program of China (2018YFC1902200); National Natural Science Foundation of China (52037006).

以共享模式参与多场景调度，目前在调峰调频[6,8]、微电网用户能量优化[9]等场景下已实现商业化，并在调度过程中对电网侧产生间接作用，可以起到延缓输电投资[10]、缓解线路阻塞、提高供电可靠性[11]等作用。在物理约束方面，BESS充放电量、荷电状态（state of charge，SOC）[12]、充放电深度、充放电时间尺度、充放电时长[13]等约束使其在建模优化过程中具有一定调度瓶颈，经济分析较复杂，合理调节物理约束条件可提高其安全性和经济性。在成本特性方面，BESS放电价格、租赁价格取决于系统构建成本、充电价格、寿命损耗、不同物理特征[14-15]等因素，一般通过平准化成本模型来估算。在装置规模方面，源–网–荷配储能规模取决于需求侧的能量曲线、物理约束、相关政策规定、储能配置比例等，进一步考虑技术性[7]、安全可靠性[12]、经济性[6]等指标来优化配置BESS的容量和功率。

然而，传统面向发–输–配–用的相关政策和市场机制未能有效促进BESS参与系统调度，无法根据电池不同物理特性建立差异化的激励机制。为了提高BESS参与电力系统调度的经济效益，部分国家陆续提出相关的激励政策[16]，研究如何通过提高储能使用寿命[17-18]、降低成本[13]、改善参与调度的方式[19]、储能选型[20]、明确需调整的机制要素[21]等方式来增加BESS参与调度的经济收益。提高BESS使用寿命方面，文献[17]将储能健康状态（state of health，SOH）处于80%~100%的时期用于电网侧二次调频辅助服务，经过一定的寿命退化后，将SOH处于20%~80%的时期用在峰谷套利。降本措施方面，通过削减初期投建成本、推动电动汽车普及率、提高电能密度等来降低系统建造成本。在参与调度的方式方面，文献[19]建立投资业主、用户和第三方公司的经济效益评估指标，提出不同储能运营模式下光伏投资回报情况；文献[22]考虑投资和运营模式，在考虑需求响应、环境效益、用户用电损耗及舒适度的基础上，提出风光储逐年投资策略和运营模式。电池选型方面，文献[21]以配电网为主体，建立了电池适用性评价方法，主要考虑技术性能、年效益、年成本以及集成度；文献[4]研究退役电池聚类算法以及评价方式，明确其优缺点、场景适用性和评价标准。

此外，BESS投资规模大，投资成本回收周期长，在大多数场景下不具备成本回收的能力。因此，商业模式的规划与设计对于BESS的经济效益尤为重要。文献[20]提出了微电网所有者/运营商共享储能的商业模式，并将其应用于微电网集群的经济优化调度，微电网可通过共享储能实现点对点交易，可提高能源利用效率。文献[23]提出兼顾共享储能和能量自运营的储能聚合商交易模式，通过智能合约方式进行交易，并建立违约和被违约的成本函数，该方法能够缩短链上用户交易周期。

考虑到上述相关研究工作的重要性和必要性，本文综述了提升电池储能经济性的研究方法。首先对国内外储能研究现状，包括物理特性、参与电力系统调度的价值评估等方面进行梳理与探讨；其次，详细分析国内外储能需求及市场机制对BESS经济效益的影响；再次，挖掘退役电池适用场景及经济效益的提升方法；分析BESS经济性研究方法和商业模式，接着提出BESS全寿命周期经济效益提升的整体框架。经文献综述后，提出BESS参与电力系统存在的问题，并提出相关改善建议。

1 电池储能经济性研究现状

现有关于BESS全生命周期经济效益的研究，大致遵循如下脉络：部分研究学者基于电池的物理特性，预评估该电池在电力系统不同场景下的经济效益，确定电池类型以及应用场景。为了进一步挖掘更多的价值，考虑BESS参与电力系统调度的同时还需考虑其相关的激励政策以及产生的间接收益。近期，部分研究学者进一步聚焦于容量衰退至初始容量的70%~80%（甚至低于70%）的储能应用价值的研究。

1.1 物理特性

BESS由于内部化学材料不同及制造方法差异，使其能量密度、响应时间、功率密度、能量效率、倍率性能、循环寿命、成本特性、支撑响应时间等本质上有所差异，归纳如表1所示。

根据不同的物理特性，BESS可在系统发–输–配–用不同运行工况下存在差异的适用性和经济性。目前，锂离子电池由于其能量密度、续航能力、功率密度、能量效率相对较好，被广泛应用于电力系统辅助服务调度。截至2020年年末，全球锂离子电池装机规模占总装机规模的比例约为92%，其次是钠硫电池（3.6%）和铅蓄电池（3.5%）[24]。

另外，相比抽水蓄能，BESS选址要求更低[25]。与电磁储能相比，电池技术更为成熟，成本更低，商业化应用广泛。技术方面，电池储能比传统调频电源

表 1 不同物理特性BESS的技术比较

Table 1 Comparison among different types of BESS

电池类型	能量密度 /(Wh·kg^{-1})	响应时间	功率密度 /（W·kg^{-1}）	能量效率/%	循环寿命/次	成本 /（元·(kWh)$^{-1}$）	支撑响应时间
锂离子电池	70~200	ms级	1000	85~95	2000~10 000	800~2000	ms~h
铅酸电池	40	ms级	300	80~90	2000~4000	1000~1800	ms~h
全钒液流电池	30	ms级	33	60~75	5000~10 000	2000~4000	ms~h

高效数倍，是燃气机组的2.7倍，水电机组的1.7倍[26]。文献[27]指出BESS在消除快速调频备用、调频容量两种场景的经济性优于抽水蓄能和常规机组。

近几年，储能领域学者陆续研究储能不同物理特性的经济性。文献[21]构建了储能技术适用性评估模型，对比4种配网BESS的技术性能和经济性能（安全性、循环寿命、能量转换效率、放电深度），结果表明钠硫电池技术性能最好，铅酸电池的经济效益评价最高。文献[3]同样对4种BESS进行评估，但主要参与削峰填谷，其中年均成本最低的是铅酸电池，其次为钠硫电池。杨裕生院士等对10种不同类型的电池进行经济性分析[28]。文献[29]评估了7种不同汽车退役动力电池，将各电池设置在参与峰谷套利的不同放电深度，与测试结果相关的3类参数包括：①可用容量和充放电效率；②能量密度；③平均温度、峰值温升和循环时间。文献[13]采用混合储能平抑风电场功率波动，通过调整混合储能连续充放电时长、调节退役电池充放电时间尺度以及不同控制策略可有效降低风电场配储的初始建设成本，体现电源侧退役电池的再利用价值，减少电池回收压力。

BESS经济性突破关键点在于提高BESS循环寿命和降本。提高BESS循环寿命方面，文献[30]提出了一种拓扑结构，用于改进光储接入电力系统的电池使用寿命。降本方面，需在改善BESS内在特性的模型、运行策略、市场机制、梯次利用等方面进行研究。从BESS内部反应机理[31-33]、外特性等效电路模型[34-35]和拓扑结构等角度，围绕影响电池性能的参数，对不同类型的电池建模过程进行研究，在仿真精度不断提升的同时，形成了电化学模型、热模型、等效电路模型、随机模型、解析模型和优化模型6大类常用模型。在运行策略上，可通过电池在不同场景运行策略的调整来改善其使用寿命[13]、容量衰退[18]、放电损失，使电池在电力系统不同充放电策略下，提高新能源利用率、灵活性、安全性和经济性。文献[18]将退役磷酸铁锂电池用于3种不同场景，其作为备用电源可用8 a，而参与电网侧调频时，在倍率约为1C、放电深度为10%时，仅可用1 a。从市场机制上看，可通过合同市场、电力现货市场、平衡市场[2]等来制定不同物理特性BESS参与市场的机制。电池梯次利用可根据电力系统场景和电池安全性[36]，通过退役电池的直接和间接筛选方法挖掘其优缺点、适用范围及评价指标，建立退役电池的适用场景评价体系来提高其筛选场景匹配程度。

1.2 电池储能参与电力系统价值评估现状

BESS参与电力系统的价值评估主要在电源侧，电网侧和用户侧起到直接和间接作用。

在电源侧，由于高峰负荷与风光发电之间不匹配及灵活资源的短缺，增加了电力系统的调峰压力。BESS在发电侧可用于电能时间转移、平抑功率波动等，能够缓解新型电力系统调峰压力。文献[6]中储能参与调峰调频，解决了其间接收益无法量化的问题。文献[37]提出了2种调峰方法并进行对比，其中管理策略可减少大量峰值电量、降低年度用电量及避免光伏向电网送电。文献[38]建立用户储能满意度和新能源调峰两方联合运营和交易模式，以各方综合效益最大为目标建立源-网-荷投标和出清模型，用户储能和新能源在日前完成双方交易以减小调峰压力，并由电网侧储能消纳部分剩余电量。

在电网侧，BESS主要参与稳定阻尼控制[39]、缓解输电阻塞、延缓输电线路升级改造[10]等。为了解决阻尼振荡，文献[40]考虑了BESS有功功率控制、无功功率控制和稳定性增强的控制策略。文献[41]研究BESS的选址和控制器参数的优化，以提高电力系统震荡阻尼。延缓输电线路升级改造方面，文献[42]提出了一种基于风险的储能容量优化配置方法，用于缓解输电阻塞，确定储能系统的规模，以最大限度地降低电力系统主体的传输拥塞缓解成本。文献[10]从经济角度出发研究BESS全寿命周期经济性，在退役之后仍分析该退役电池在参与削峰填谷、延缓配网升级改造、

降低网损等场景中的作用。

在用户侧，主要帮助用户降低用电成本，提高供电可靠性。文献[43]通过储能增加充电量或减少放电量实现调度时段内的新能源就地消纳。文献[9]建立了共享储能电站参与工商业能量优化调度模型，解决了多个工商业用户侧日内能量优化调度问题，提高储能利用效率，并降低用户侧的用电成本。文献[44]提出了分散式共享储能系统优化配置与调度方法以及改进分时补贴策略，解决了传统一体化共享储能的灵活性差、无法兼顾多类型用户的差异性用电需求、用户利用储能补贴漏洞骗取补贴收益的问题。

值得关注的是，BESS参与电力系统的辅助服务会产生直接价值和间接价值。美国桑迪亚国家实验室划分了17种场景的储能收益，对储能的直接价值和间接价值进行划分，并分析实现直接价值的同时实现间接价值的可能性[11]。

2 需求及市场机制

国内外一直在研发大容量、高安全、长寿命以及低成本的电池。随着应用需求场景持续多样化，储能技术呈现多种类型协同发展的局势，电源侧、电网侧、用户侧应用向结构更紧凑、控制手段更智能、灵活资源更丰富等方向发展。

而近期国内外广泛关注“双碳”目标以及碳交易市场，因此分析电池储能需求和市场机制应从电力系统实现“双碳”目标出发，考虑灵活性资源需求、各层面的市场激励政策等。

2.1 国内储能需求及市场机制

近几年，国内政府及能源相关部门提出了一系列储能政策，推进电化学储能的发展。2020年至2022年间，国家层面提出数十项储能相关的激励政策。2020年1月，能源局发布了《关于加强储能标准化工作的实施方案》[45]，重点鼓励各界积极推动储能标准，推进储能技术及应用的研究工作。2020年2月，国家电网指定工作任务的重点聚焦在推动源网荷储协调互动，发挥好新能源与储能结合的科技引领作用。2021年7月，工信部发布了《新型数据中心发展三年行动计划（2021—2023年）》，在绿色低碳发展行动中鼓励加强梯次利用电池储能产品的推广应用[46]。随后，国家发改委与能源局联合发布《关于加快推动新型储能发展的指导意见》[47]，重点坚持储能技术多元化，强调推进电源侧储能项目建设、电网侧储能合理布局、用户侧储能多元发展，并推动电池技术成本下降及商业规模化应用。

省市层面也已明确对储能需求及激励政策做出了许多紧密结合实际的工作。山西、江苏、甘肃、福建、东北三省等地，已明确储能参与电力市场调峰调频辅助服务的相关规定和补贴政策[16,26]。若储能系统与其他灵活性资源同时参与电力系统调峰调频，当系统出现负备不足时，调度部门优先调用储能电站参与调度。此外，截至2022年11月已有25个省份要求新能源配置储能，并且配比不低于新能源装机总量的5%，充放电持续时间约为2 h[13]，而河北储能市场并网规模要求达到3 h。另外，国家发改委及能源局发布关于《鼓励可再生能源发电企业自建或购买调峰能力增加并网规模的通知》[48]，规定发电企业可自建、合建或者购买调峰能力（储能），并网挂钩比例为新能源装机总量的15%，并网充放电持续时间要求4 h，并给予优先权至有20%能力的储能运营商。这些政策虽对储能参与电力系统调度有一定的依据，但并网时间越长，意味着配置容量越大，成本越高。

在发电侧，随着调频调峰辅助服务市场的逐步开放与成熟，调频调峰的补偿政策有所变化。调频补偿方式已从单一的按“调频容量补偿”发展为以调频性能为导向的市场交易，给予响应及时、调节速率快、调节精度高的储能更高的补偿费用[49]。不同地区根据区域电网需求在辅助服务考核机制上有所差异[26]，如指标的具体计算模型、分指标到综合指标的合成方式、综合指标中分指标权重比例、调频补偿规则设定、调频市场准入门槛值的设定、不同指标的上限值设定等方面。2017年12月，南方监管局发布《南方区域电化学储能电站并网运行管理及辅助服务管理实施细则（试行）》[16]，重点规定了储能电站的考核方案及补偿标准，将储能参与调峰的补偿暂定为0.5元/kWh。

在用户侧，尚未有明确统一的储能补偿机制。为了扶持当地储能项目的建设，有些地区针对本地储能项目发布了相应的补贴政策。2019年4月，苏州市工业园区管委会发布了用户侧储能补贴政策，各项目投运后根据放电量补贴3 a，补贴单价为0.3元/kWh[44]。2022年6月，深圳福田区发布了《深圳市福田区支持战略性新兴产业和未来产业集群发展若干措施》，对实际投入超过100万元的电化学储能项目按照放电量给予最高补贴0.5元/kWh，补贴3 a。

此外，碳交易市场的合理规划也可推动BESS利用普及率。2021年7月，全国碳排放权交易市场开市。对企业而言，在实施碳市场交易的同时，应考虑低碳减排，增加企业减排资源，因此具备电池储能资源的企业可在碳排放市场竞争中占据优势。在面对实现“双碳”目标时间紧任务重的形势下，未来碳定价、碳排放权交易体系可能随时间变化，但对于低碳乃至零碳排放的资源而言，必定更促进其经济效益提升。

2.2 国外储能需求及市场机制

欧盟先后制定“2022气候和能源计划”和“2030气候与能源框架”，对碳排放、新能源和能效设定了相关目标。因此，碳排放任务限制了欧盟国家使用煤炭发电，利润逐渐下滑，导致大部分集团决定关闭燃煤电厂，转向投资新能源和储能等低排放、零排放产业。另外，欧盟计划在2030年实现新能源发电量占总发电量的60%以上。因此，欧盟输电运营商联盟发布了十年电网发展计划，探索高比例新能源结合电动汽车、智能电网和储能等灵活性资源与电网融合，促进源网荷储协调发展[50]。

2.2.1 英国

英国主要从三个方面支持储能建设：第一，投入公共资金鼓励储能创新、促进储能商业模式的发展以及降本；第二，电力市场机制的改革，减少储能参与电力市场的障碍；第三，碳交易机制。

在加速储能发展创新方面，英国政府和能源相关部门对包括储能在内的新型技术提供了资金支持。例如，曾将2.46亿英镑支持“法拉第挑战计划”，推动电池技术从研发走向商业化及市场化[51]。该计划实现的方式为：一是通过法拉第研究所牵头高校合作储能项目，并给予资金支持；二是对全社会的企业、机构、科研团队牵头的储能创新项目予以支持；三是建立储能工业化中心。

在“2013年能源法”中，英国进入了电力市场改革，政府鼓励低碳技术的投资以及提高英国电力供应的安全性，有助于建设确保电力供应安全的容量市场，减少用电成本[52]。2017年7月，英国政府和市场监管机构联合制定了《智能灵活资源发展战略》，这项政策重点降低储能消费者和企业的成本，同时鼓励增长和创新[53]。该政策行动分为三个方面，消除包括储能在内的智能技术发展障碍、启用智能家电以及促进电力市场更灵活运作。2017年10月，出台了《清洁发展战略》[54]，重点聚焦在碳移除技术研究、提高家庭用电效率。为了实现能源转型，英国于2020年11月发布了“十项关键计划”[55]，明确了储能与电力系统灵活性资源在系统中扮演的重要角色。

英国电力市场以双边交易为主，目前在英国交易输电协议模式下运作，包括合同市场[56]、电力现货市场[2]、平衡机制与不平衡结算[56-57]。在远期合同市场上，通过发电商和用户签订远期差价合同来规避批发市场波动，鼓励对可再生能源项目的投资，该市场有利于鼓励储能参与调度。电力现货市场包括日前现货市场和日内现货市场，储能可通过发电运营商和用户签订远期价差合同获取利润。在平衡市场上，储能提供上调量和下调量辅助服务来满足系统需求[2]，可稳定电力系统运行。

此外，英国Piclo Flex市场允许配电网运营商和灵活性供应商签订合同，灵活性资源根据区域实际需求参与市场拍卖，该市场有助于确定灵活性市场机会并减少其参与市场的障碍[58]。

在辅助服务方面，英国逐渐采用快速调频、快速备用、短期运行备用等多种新型技术。2016年，英国国家电网提出了增强频率响应（enhanced frequency response, EFR），要求提供商具有1 s内的功率响应出力[59]，与现有的一次调频响应时间（10 s）和二次调频响应时间（30 s）相比，该要求可进一步推动具备ms级响应能力的储能参与调度。

在碳交易市场方面，英国于2021年建立独立碳交易市场并正式投入运营。目前，用化石燃料发电的运营商需在该市场中按照18英镑/t的碳价缴纳费用。另外，英国承诺2024年不再使用煤炭。在碳市场履约管理机制方面，由独立认证机构对纳入排放主体的碳排放量进行核证，采取与欧盟碳市场第四阶段相似的机制。控排企业若不能缴足配额，应支付超额排放罚款。英国碳交易市场导致大部分使用煤炭发电的发电厂被迫关闭，转向投资新能源和储能等低碳或零碳排放产业。

2.2.2 德国

德国主要从三个方面支持储能建设：第一，激励政策；第二，电力市场与市场溢价机制；第三，内部碳定价。

德国计划于2030年和2050年，分别实现可再生能源发电占比达到65%和80%。德国联邦政府和国有复兴银行曾给予家庭储能补贴[60]，鼓励光储的市场引进，增加能源就地消纳，同时缓解电网负荷。该计划旨在刺激市场、促进技术发展和降低电池成本。同

时，采取峰谷电价机制引导用户错峰用电，该方案降低了可再生能源发电成本。另外，德国行动法草案指出2038年之前关闭现有40 GW煤电厂。这些政策实际上在传递明确的市场信号，引导发电企业对新能源、储能设施等零排放设施进行必要的投资。

德国电力市场由电力金融市场、电力现货市场和备用容量市场构成[57]。通过引入“市场溢价机制”，构建新能源市场竞价和补贴激励政策，发电成本虽下降但该市场处在弱势阶段[61]。电力市场吸引力取决于这些市场的价差，日前和日内电力现货市场交易与英国电力现货市场交易相似。

在电力市场辅助服务方面，自2001年以来，德国输电系统运营商在开放、透明和非歧视性的市场上获取灵活性资源对不同控制储备（一级、二级和三级控制备用）的需求[62-63]。系统发生不平衡后，一级控制备用资源具备平衡系统的频率，允许最长自动启动时间为30 s。在灵活性资源响应缓慢的情况下，二次频率控制备用可参与系统运行平衡，分为自动激活和人工激活操作模式，启动时间限制在15 min内。确定导致不平衡的原因和持续时间后，若发现不平衡持续时间较长，适合启动三级控制备用资源。在备用容量补贴方面，一次调频主要按标价支付，根据储能装置规模给予补贴，不考虑能量报酬额外补贴。二次调频主要按照容量补偿和实际上下备用能量，在低谷时段上下调频辅助服务费用分别为5.67欧元/MWh和2.97欧元/MWh，在高峰时段上下调频辅助服务费用分别为6.12欧元/MWh和2.21欧元/MWh[64]。

近些年，德国主要支持家用储能采用铅酸电池和锂离子电池技术[65]。家用锂离子电池的零售价格一直在快速下降，2013年至2018年间，平均消费价格下降了50%左右[60]。成本下降推动电池储能的可持续模式，并向高能量密度、低成本方向发展。根据德国联邦政府网的信息，截至2020年5月，德国的家用储能用户注册量达到9万户（容量低于30 kWh），其中约95%的家用储能是锂离子电池。德国工业储能注册量为700个项目（30 kWh~1 MWh），约87%的注册项目采用锂离子电池，其次是铅酸电池和全钒液流电池。

德国公司内部主要以4种方式对其碳排放进行定价，包括影子价格、内部碳收费、内部排放交易计划和隐含价格[66]。影子价格是一种预测外部碳监管的方法，使碳密集型项目更加昂贵或不经济。内部碳收费通过固定碳价格来获取公司排放的费用，其优点是促进员工对碳排放与其价格的认识并且触发公司内部的行为变化，但缺乏排放量的限制和规范管理制度。排放交易计划在特定时间内具有固定的排放限制，而且碳价灵活。隐含价格通过其他替代方式来减少碳排放所产生的成本。这些对碳排放的定价方式能够促进储能的发展。

2.2.3 美国

美国计划2035年实现无碳发电，2050年实现碳中和目标，据此美国在国家各层面逐渐关注储能发展。2021年6月，美国能源部和联邦先进电池联盟联合发布了《锂电池国家蓝图2021—2035年》[67]，指导美国锂电池制造价值链的推进发展，为美国创造公平的清洁能源制造业就业机会，建设清洁能源经济，并帮助缓解气候变化的影响。该蓝图的目的：一是确保能够获取原材料和精炼材料，并为商业应用层面寻找更多关键矿物的替代品；二是支持美国材料加工基地的建设，能够满足国内电池制造需求；三是刺激美国电极、电芯及电池包制造产业；四是推动退役电池再利用和制造材料的大规模回收，并形成具有竞争力的价值链；五是通过鼓励支持科学研究、STEM（science，technology，engineering，mathematics）教育及劳动力发展，保持和推进美国电池技术的领先地位。此外，美国储能行业快速发展不仅靠政策支持及补贴政策，更值得注意的是美国电力市场较为成熟。

在电力市场方面，目前应用于辅助服务的电化学储能一直引领着全球储能市场[68]。目前，美国将储能主要用于电力系统的表前和表后。表前储能主要参与调频、调峰、备用电源、旋转备用、非旋转备用、同步备用、非同步备用、补充备用等辅助服务。调频市场运行流程大致依次为调频机组报价–出清–定价–结算，而且美国联邦能源管理委员会（Federal Energy Regulatory Commission，FERC）要求独立系统运营商（independent system operators，ISOs）和区域输电组织（regional transmission organizations，RTOs）根据参与调频的容量和绩效给予补偿[69]。

2018年2月，FERC发布了841法案，要求所有参与储能市场的运营商消除电力系统储能障碍[70]。ISOs和RTOs需在FERC的管辖下修改储能不同物理特性和运行特性的关税，经FERC批准后便可参与市场实施运行。FERC于2020年底批准了2222号法令，要求RTOs和ISOs建立分布式能源参与大规模系统的辅助服务，此法令有助于降低输电网负荷，更能体现分布式能源结合储能参与辅助服务的价值。

在用户侧储能方面，文献[71]综述了美国对用户

侧储能提出相关驱动因素和解决储能障碍的激励机制，归纳如表2所示。

表 2　美国有利于BESS的驱动因素

Table 2　Policy drivers of BESS in the United States

驱动因素	激励机制	未来趋势
税收抵免机制	促进光储结合使用	预估降低30%的设备成本
分级定价	零售定价取决于消费的增长	促进能源消纳，降低弃电
分时定价	零售电价取决于使用时间	促进储能参与用户侧服务
购电协议	允许灵活资源与电网互联	降低财务风险
快速需求响应	工商业用户参与电网服务	提供储能电源附加电网服务

2.3　国内外储能需求及市场对比分析

除了美英德之外，澳大利亚及北欧地区也具有储能需求及相关的市场机制。澳大利亚具有储能能量、辅助服务的交易市场规则，但缺乏成熟完善的容量补偿机制，过于依赖能量交易市场[2]。此外，北欧电力现货通过跨国互联市场机制、财政激励以及配套市场体系来促进新能源消纳，也间接促进了储能的应用[57]。

受技术需求、市场激励机制、政策导向的影响，各国在电源侧、电网侧以及用户侧对储能的需求及市场机制的规则各不相同。本文对比分析了储能参与电网侧调频的相关市场机制，具体如表3所示。

由表3可以看出，美英德等国利用储能参与电网调频及市场定价有效促进了储能的发展。BESS参与电网调频在中国虽起步较晚，但规模快速增长，在定价机制和收益计算方法等方面与国外存在较相似的特点和优势。

从整体储能需求和市场机制来看，国内外储能政策未细致划分适用范围，局限性有所不同，各项激励政策还未与储能发展阶段、电力发展布局相适应，难以充分挖掘储能的经济性。

3　电池储能再利用经济效益

3.1　梯级电池储能适用场景

电动汽车动力电池平均5~8 a容量衰减至80%以下，需汰换退役。经分类、筛选及重组检测后性能符合电力系统安全可靠性要求的电池可再次利用[72]。目前退役电池的应用场景以用户侧为主，多集中在提供灵活充放电服务的移动式充电设施，例如用于削峰填谷[73]、通信基站[74]、家庭储能和商用储能[75]。不过，退役电池应用场景适用性需考虑多指标、多维度、多属性的问题，具体影响其再利用的关键因素包括电池模组的标准化、筛选重组的成本、电动汽车车主参与退役电池再利用的意愿以及电池容量保持率的预测精度等，基本遵循技术性、经济性和安全性3个维度[76-78]。

技术性要求分为退役电池技术要求和企业的技术要求[79]。在退役电池技术要求指标方面，应按照最终用途适用的标准要求进行组件检查、安全测试以及运行预规划。文献[18]将退役磷酸铁锂电池用于3种不同场景，参与备用电源可用8 a，而参与电网侧调频在倍率约为1 C、放电深度为10%时，仅可用1 a。企业应收集并查看电池、模组和单体电芯上的相关数据信息。

表 3　典型国家的BESS参与调频辅助服务市场对比

Table 3　Comparison of BESS participating in frequency regulation in typical countries

国家	准入门槛	定价机制	收益计算方式
中国	2~15 MW	山西、广东：调频里程	收益=实际里程×调节性能指标×里程价格
		福建、江苏：调频容量+里程	收益=中标容量×调节性能指标×容量价格+实际里程×调节性能指标×里程价格
美国	0.1 MW，且部分地区要求性能测试达标	PJM市场、加州市场	收益=容量价格×调频性能指标×中标容量+里程价格×调频性能指标×实际里程
英国	1 MW，且要求通过固定频率响应速度	按照投标价格确定	收益=容量价格×中标容量×服务时长+里程价格×实际里程
德国		按照投标价格确定	收益=容量价格×中标容量×服务时长+里程价格×实际里程
澳大利亚	5 MW	根据各类调频市场报价，按总成本最低为原则出清，确定各调频市场出清价格	收益=里程价格×实际里程

经济性方面，降低退役电池检测成本、提高检测速度以及筛选效率，可提高退役电池的二次利用率。再利用电池应尽可能部署到利用价值高的应用场景，从而提高退役动力电池梯次利用的经济性。文献[80]提出一种聚类方法，并分为3个筛选和重组的实现步骤：一是提出快速筛选电压和内阻的技术，二是进行电池SOH检测，三是采用自组织映射（self-organizing maps, SOM）神经网络的退役电池聚类方法。

从安全性角度考虑，应提供电池安全等级的划分标准，代表不同状态下电池的安全风险，直观体现了梯次利用电池的安全性能。文献[77]提到电池的安全性，并详细划分了7个不同等级，等级越高代表状态越好。文献[12]建立了退役电池的安全裕度指标，该方案导致初始投资成本提高，但是降低了储能系统寿命损耗以及运行成本。

适用性评价的主要方法有综合指数法、层次分析法、灰色关联度法、熵权法、函数模型法、BP人工神经网络模型法、决策树分析法、面向对象分析法、空间多维准则评估法等[3,21]。

3.2 电池储能再利用价值与场景匹配

退役电池可用在发电侧、配电侧和用户侧。在发电侧，梯次利用电池储能可为光伏发电厂提供可变性平滑服务来整合可再生能源发电资源，解决频率波动和能量过剩问题。为了降低电源侧功率频繁波动对退役电池寿命损耗的影响，文献[13]提出了混合储能平抑风电场功率波动，通过调节退役电池充放电时间尺度以及不同控制策略来降低电源侧混合储能系统的投建成本，体现电源侧退役动力电池的应用价值，减少其回收压力。文献[81]挖掘退役电池参与风电出力时运行的最佳状态，设计了2个充、放电容量相同的储能装置，当满足相关条件时，通过控制策略层实现2个分级装置的实时状态切换，该分级控制策略相较于整体控制策略具有较高的经济效益，并提高了风电利用效率。另外，紧急备用容量对储能安全可靠性的要求较低，配置储能容量约为系统最大负荷的15%~20%，此场景也适合配置退役电池。

鉴于配电网储能对电池性能要求较低，将退役电池二次利用作为配电网储能系统是一种很好的方法，可以充分挖掘其剩余价值，获得更大的经济和社会效益，可应用于独立调频、黑启动、调压、延缓配网升级改造等领域。文献[12]在主动配电网规划中，为了提高退役电池的使用寿命，确定其充放电深度、衰减率以及运行荷电状态的安全裕度，考虑退役电池的成本优势，通过调整需求侧响应可提高系统的经济效益和运行安全性。文献[10]研究了退役电池延缓配电网升级改造的收益，其关键在于高峰时段退役电池释放电能，实现不增加系统出力的情况下补偿能量欠缺，因此配电网无需升级改造电网线路。

在用户侧方面，相较于国外集中于家庭储能的梯次利用，国内的示范工程应用场景丰富，涉及家庭储能、小型工商业储能、应急备用电源、铁塔通信基站等。文献[82]在计及电池容量损耗基础上综合考虑退役电池在不同场景下的经济效益、运行效益、环境效益、安全性以及资源利用率，结果表明在用户侧梯次利用储能电站和通信基站的场景下，退役电池具有一定的经济可行性。文献[83]设计了一种基于退役电池的智能家用储能管理方案，将源荷储统一管理，可实现新能源就地消纳、降低用户用电成本、实现用户需求响应以及降低电网高峰负荷。

鉴于3.1节和3.2节，根据电力系统不同场景安全可靠性的要求合理配置梯次利用储能有助于提高其经济效益，并将不同场景、参数特征和电池的SOH相结合可提高电池全寿命周期的经济效益[4,78]，归纳如图1所示。

4 电池储能经济性研究方法

4.1 经济可行性估算方法

与大多数储能类型相比，当前电池储能正处于快速发展阶段，尽管已具有较好的市场机制和激励政策，但成本和安全性问题仍亟待解决。国内外已有大量关于经济性的研究，研究方法大致分为4种，其对比如表4所示，具体如下。

第一种方法是根据电池储能物理特性进行分析，挖掘电池特性差异存在的经济效益。杨裕生院士等对10种不同类型的电池进行经济性分析[28]。文献[3]对铅酸电池、钠硫电池、铁锂电池、全钒液流电池进行全生命周期的经济效益对比分析。文献[29]评估了5个电动汽车企业提供的7种不同的梯次利用电池数据，主要包括可用容量、充放电效率、能量密度、平均温度、峰值温度和环境温度，在峰谷套利场景下，采用绩效排名系统结合经济模式选择最适合特定用途的退役电池储能应用。文献[84]从技术、效率、经济、环境4个维度建立储能选型，通过算法可得到在可再生能源消纳、辅助服务、缓减电网投资和需求响应4个

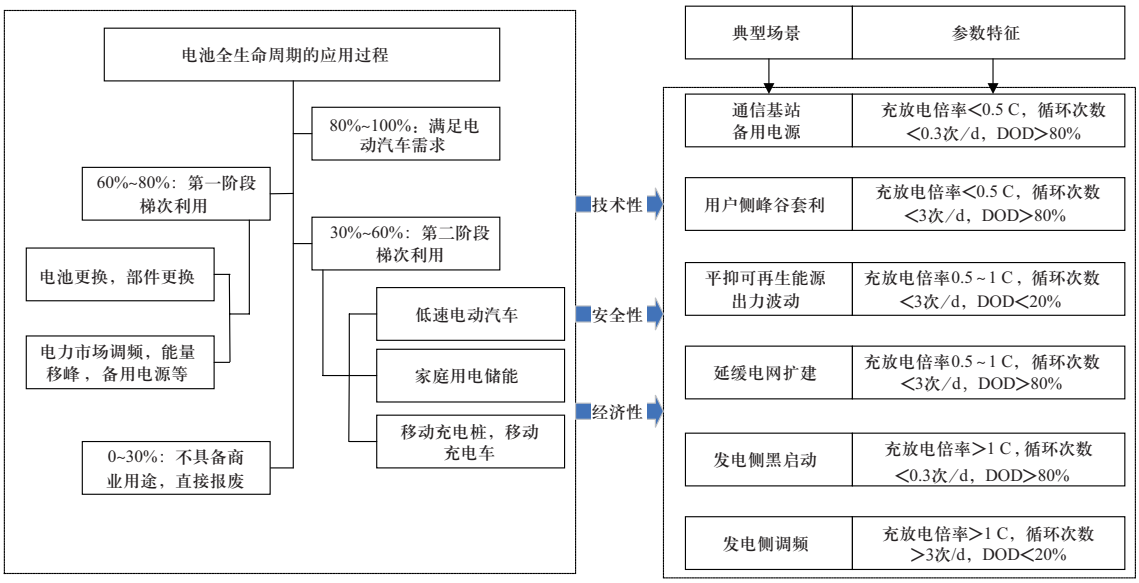

图 1　BESS的SOH分阶段利用与场景的参数特征

Fig. 1　SOH phased utilization of BESS and parameter characteristics of scenarios

表 4　BESS经济可行性估算方法

Table 4　BESS economic feasibility estimation method

序号	评估方法	具体形式	优点	缺点
1	物理特性评估	考虑BESS内在特性，包括温度、循环次数、充放电倍率等	有助于储能装置和技术研究	模型简单，考虑因素不全
2	单一价值评估	调频、调峰、削峰填谷等单独场景	单一场景分析细致	无法适用多场景多应用
	多元价值评估	多场景相结合	考虑全生命周期成本	计算不全面、场景简单、受策略影响
3	系统价值评估	直接价值与间接价值社会收益与环境收益	考虑比较全面	场景复杂，除经济效益外其他收益难以衡量
4	平准化成本评估	考虑BESS全生命周期成本充放电成本	考虑全生命周期成本以及放电总量	成本计算不全面、场景分析简单、受策略影响

场景下的6种电池选型的排名。

第二种方法是对储能在电力系统不同场景下进行经济性研究，主要聚焦在电力系统的场景结合。研究BESS参与电力系统调度的经济可行性方法主要分为2类：一是单一价值评估方法，二是多元价值评估方法[41,85-86]。单一价值评估方法仅考虑储能参与相对应场景的收益，多元价值评估方法考虑在多场景下的经济性评估。单一价值和多元价值评估方法缺点在于考虑的成本不够全面，并且忽略了运行期间所产生的部分费用和间接收益。文献[85]考虑储能参与调峰调频调度双重辅助服务，建立了含电网侧百MW级BESS的多资源多辅助服务联合优化调度模型。文献[87]以风储电站的总收益最大为目标，考虑储能用于减小弃风和参与电网二次调频服务（容量补偿与绩效补偿），建立了BESS和风电场联合运行的优化模型。

第三种方法是系统价值评估法[11,88]，此方法具有累计效应、跃变特性和多样性，可有效避免第二种方法的局限性，能够较全面预估储能的价值，但部分经济效益无法衡量。文献[88]在规划层面考虑储能在延缓电网升级改造以及平抑新能源出力方面的作用，具体通过考核惩罚成本、减少机组旋转备用容量、低储高放降低配网损耗以及作为备用电源提高系统可靠性等方面实现。

第四种方法是建立平准化成本模型（levelized cost of energy, LCOE）[14-15]，该方法计算BESS相关的成本与运行期间总发电量的比值。LCOE方法可根据应用场景自身条件，同时考虑多方面的全生命周期储能成本（life cycle cost of storage，LCCOS），包括储能电站

初始投资成本、运行维护成本、财务费用、残值、电池本身特性引发的额外费用。

上述4种方法可以相结合计算。首先，通过第一种方法挖掘存在最高经济效益的电池类型，分析其参与不同场景或者多种场景带来的更多价值；其次，通过系统价值评估方法计算其成本与收益；第三，结合LCOE模型计算其全生命周期最佳的度电成本，以体现需求侧和BESS运营商实现最优的经济效益；最终计算BESS参与电力系统对应场景下的净现值（net present value, NPV）、内部收益率（internal rate of return, IRR）以及盈利指数（profitability index, PI），若相关指标不理想，运营商可调整电池储能运行策略，具体如图2所示。

4.2 商业模式

目前储能行业正进入商业化运营初期，储能电站投资运营的方式大致分为3类：自投资+自运营模式，融资租赁模式及混合投资+委托运营模式。近期广泛被关注的商业模式主要有共享储能模式、结合虚拟电厂储能模式、基于区块链技术的共享储能模式。

共享储能是指以电网为主体，将分散式的源-网-荷资源进行全环节优化配置，并由电网或者第三方来协调运行[9,89-90]。共享储能能够解决传统储能难以应对的新能源逐步接入电力系统带来的各种压力。在该模式下，BESS可参与电力市场并提供服务，灵活调整系统运营策略，实现电能互补共享，同时提高能源利用效率以及实现就地消纳，实现更经济的优化调度。文献[90]提出了多微电网租赁共享储能的优化调度方法，此方案有利于促进能源就地消纳、提升系统效益、实现储能与参与主体的利益均衡、增加储能利用效率。从实际案例来分析，德国SENEC.IES公司将用户侧储能聚焦起来，对此储能有着合法控制权，当电网电价为0时充电，用户侧首先消纳自身光伏，SENEC.IES公司给予用户侧低电价的备用电源选择[91]。

在虚拟电厂储能模式中，虚拟电厂企业将储能系统、分散式风电、智慧社区、分布式光伏、电动汽车[92]等聚合起来分析，通过优化软件处理。该软件需按规定的时间从用户侧获取负荷数据，再从市场中获取出清价格，需对其进行实时管理[93]。公共事业部可从虚拟电厂获取数据，进一步更准确地预判用户侧负荷。相比之下，区块链共享储能交易更为复杂，分为应用层、数据层、网络层和物理层[23]。应用层主要对发布的信息进行合理处理，并通过用户侧能量管理系统制定交易策略；数据层主要筛选符合用户意愿的合约订单，并检测交易是否符合相关条件；网络层更多聚焦于点对点交易信息的安全性；物理层跟踪电能传

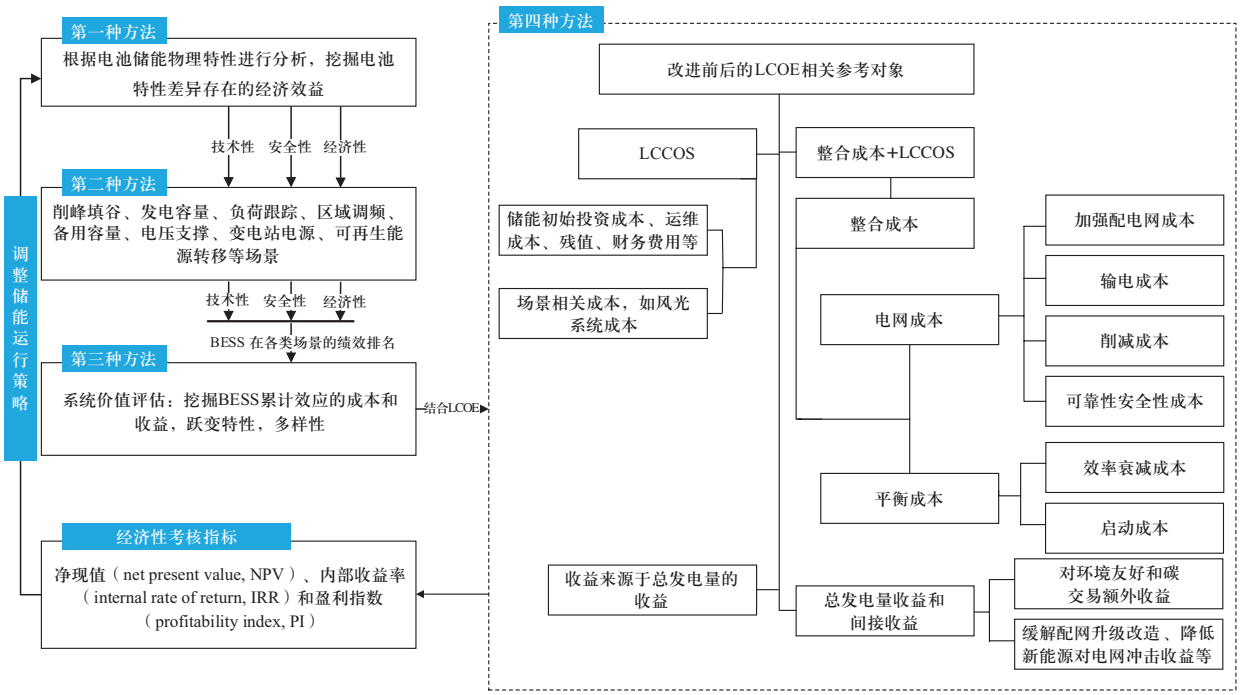

图 2 BESS四种经济可行性估算方法

Fig. 2 Four economic feasibility estimation methods of BESS

输，将实际电能购售数据反馈至区块链系统，与应用层处理的信息对比，进一步完成资金交易。该方法的优点是数据可追溯、交易模式比较开放。区块链加密算法、去中心化、智能合约及共识机制的核心技术可解决共享储能多交易主体的问题，确保市场权威，保证数据可信度及储能市场运营效率。与虚拟电厂储能模式相比，区块链共享储能电站无需第三方参与，可确保出清价格更加优化。

5 相关建议

提高BESS的经济效益大致可分为4个步骤：①BESS物理特性分析；②挖掘储能的需求和市场机制；③针对未来大量废旧动力电池提出相关的解决方案，挖掘退役电池的场景适用性和经济效益；④BESS经济性研究，这是最为重要的环节，需考虑BESS全环节的相关因素，并且鼓励新型技术结合BESS参与电力系统优化调度。综上所述，本文对BESS经济效益提升方法提出如下建议。

1）不同物理特性的BESS，其经济效益不同，但政府以及相关部门给予的相关激励政策和市场机制没有细分其存在的经济差异，可能导致储能市场垄断。建议对不同类型的电池给予合理的激励政策。

2）国家层面提出了储能相关的部分激励政策，使储能为电网调度提供安全可靠支撑，但政策的有效性待商榷。另外，在信息不对称的情况下，直接给予定价补贴会影响电力系统良好发展。建议在规划层面，将BESS与其他灵活性资源进行经济性对比分析，基于此确定给予储能的定价补贴，该方式可鼓励更多的灵活资源参与电力系统调度。

3）应扩大电池储能市场范围，尤其充分考虑未来大量电池的退役，建议在政策上做好接纳退役电池参与电力市场的准备，在其参与市场竞争范围内，在与新电池条件相仿的情况下，优先给予退役电池储能参与电力市场的机会。

4）从经济角度看，目前的研究未考虑全部环节的经济效益，导致BESS的经济效益不理想。因此，应结合不同物理特性—使用场景的匹配度—全系统价值评估—全生命周期经济效益的研究，结合国内外的储能激励政策和市场机制提高电池应用价值。

5）在商业模式方面，已有对储能在不同应用领域新思路及算法验证的研究，但目前实际工程项目的盈利模式仍依赖峰谷套利。建议将BESS实际运营工况与新技术结合，提高电池利用效率，提升信息安全性，降低系统投建与运行成本。

参考文献

[1] 刘敦楠，赵宁宁，李鹏飞，等. 基于“共享储能–需求侧资源”联合跟踪可再生能源发电曲线的市场化消纳模式[J]. 电网技术，2021，45(7)：2791-2802.
LIU Dunnan, ZHAO Ningning, LI Pengfei, et al. Market-oriented consumption model based on the joint tracking of renewable energy generation curve of “shared energy storage & demand side resources”[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2791-2802(in Chinese).

[2] 陈启鑫，房曦晨，郭鸿业，等. 储能参与电力市场机制：现状与展望[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：14-28.
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Participation mechanism of energy storage in electricity market: status quo and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 14-28 (in Chinese).

[3] 薛金花，叶季蕾，陶琼，等. 采用全寿命周期成本模型的用户侧电池储能经济可行性研究[J]. 电网技术，2016，40(8)：2471-2476.
XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Economic feasibility of user-side battery energy storage based on whole-life-cycle cost model[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2471-2476 (in Chinese).

[4] 李建林，李雅欣，吕超，等. 碳中和目标下退役电池筛选聚类关键技术研究[J]. 电网技术，2022，46(2)：429-441.
LI Jianlin, LI Yaxin, LÜ Chao, et al. Key technology of retired batteries’ screening and clustering under target of carbon neutrality[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 429-441 (in Chinese).

[5] 代倩，吴俊玲，秦晓辉，等. 提升局部区域新能源外送能力的储能容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(3): 67-74.
DAI Qian, WU Junling, QIN Xiaohui, et al. Optimal configuration method of energy storage capacity for improving delivery ability of renewable energy in regional area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 67-74 (in Chinese).

[6] 王静，刘文霞，李守强，等. 计及机组降损收益的电源侧电池储能调频/调峰经济效益评价方法[J]. 电网技术，2020，44(11)：4236-4245.
WANG Jing, LIU Wenxia, LI Shouqiang, et al. A method to evaluate economic benefits of power side battery energy storage frequency/peak regulation considering the benefits of reducing thermal power unit losses[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4236-4245 (in Chinese).

[7] 汤杰，李欣然，黄际元，等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. 电工技术学报，2019，34(5)：963-972.
TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity

allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 963-972 (in Chinese).

[8] 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 5-10, 2018, Portland, OR, USA. IEEE, 2018: 1.

[9] 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 Xiaoqing, 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 (in Chinese).

[10] 张金国，焦东升，王小君，等. 基于梯级利用电池的储能系统经济运行分析[J]. 电网技术，2014，38(9)：2551-2555.
ZHANG Jinguo, JIAO Dongsheng, WANG Xiaojun, et al. Analysis on economic operation of energy storage based on second-use batteries[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2551-2555 (in Chinese).

[11] 孙伟卿，裴亮，向威，等. 电力系统中储能的系统价值评估方法[J]. 电力系统自动化，2019，43(8)：47-55.
SUN Weiqing, PEI Liang, XIANG Wei, et al. Evaluation method of system value for energy storage in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 47-55 (in Chinese).

[12] 吴鸣，孙丽敬，寇凌峰，等. 考虑需求侧响应的主动配电网电池梯次储能的容量配置方法[J]. 高电压技术，2020，46(1)：71-79.
WU Ming, SUN Lijing, KOU Lingfeng, et al. Capacity configuration method for second-use electric vehicle batteries of active distribution network based on demand side response[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 71-79 (in Chinese).

[13] 李培强，李雄，蔡笋，等. 风电场含退役动力电池的混合储能系统容量优化配置[J]. 太阳能学报，2022，43(5)：492-498.
LI Peiqiang, LI Xiong, CAI Sun, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system with retired power batteries in wind farms[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 492-498 (in Chinese).

[14] LAYEDRA J, MARTÍNEZ M, MERCADO P. Levelized cost of storage for lithium batteries, considering degradation and residual value[C]//2021 IEEE URUCON. November 24-26, 2021, Montevideo, Uruguay. IEEE, 2021: 127-131.

[15] SCHMIDT O, MELCHIOR S, HAWKES A, et al. Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies[J]. Joule, 2019, 3(1): 81-100.

[16] 张志，邵尹池，伦涛，等. 电化学储能系统参与调峰调频政策综述与补偿机制探究[J]. 电力工程技术，2020，39(5)：71-77.
ZHANG Zhi, SHAO Yinchi, LUN Tao, et al. Review on the policies and compensation mechanism of BESS participation in the auxiliary service of frequency and peak modulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 71-77 (in Chinese).

[17] ZHANG Y X, XU Y, YANG H M, et al. Optimal whole-life-cycle planning of battery energy storage for multi-functional services in power systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2077-2086.

[18] XU X L, MI J F, FAN M S, et al. Study on the performance evaluation and echelon utilization of retired $LiFePO_4$ power battery for smart grid[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 1080-1086.

[19] 薛金花，叶季蕾，陶琼，等. 面向不同投资主体的分布式光伏运营策略研究[J]. 电网技术，2017，41(1)：93-98.
XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Operating strategy of distributed PV system for different investors[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 93-98 (in Chinese).

[20] CAO S M, ZHANG H L, CAO K, et al. Day-ahead economic optimal dispatch of microgrid cluster considering shared energy storage system and P2P transaction[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 645017.

[21] 薛金花，叶季蕾，陶琼，等. 电力储能技术的适用性评价模型与方法研究[J]. 高电压技术，2018，44(7)：2239-2246.
XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Feasibility evaluation model and method of energy storage technologies in power system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2239-2246 (in Chinese).

[22] WANG H, HUANG J W. Joint investment and operation of microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 833-845.

[23] 张巍，卢骧. 点对点交易下储能聚合商共享自营多模式交易模型[J]. 电力系统自动化，2022，46(2)：15-23.
ZHANG Wei, LU Xiang. Sharing and self-operating multi-mode trading model of energy storage aggregators with peer-to-peer trade[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 15-23 (in Chinese).

[24] 陈海生，刘畅，徐玉杰，等. 储能在碳达峰碳中和目标下的战略地位和作用[J]. 储能科学与技术，2021，10(5)：1477-1485.
CHEN Haisheng, LIU Chang, XU Yujie, et al. The strategic position and role of energy storage under the goal of carbon peak and carbon neutrality[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1477-1485 (in Chinese).

[25] 徐若晨，张江涛，刘明义，等. 电化学储能及抽水蓄能全生命周期度电成本分析[J]. 电工电能新技术，2021，40(12)：10-18.
XU Ruochen, ZHANG Jiangtao, LIU Mingyi, et al. Analysis of life cycle cost of electrochemical energy storage and pumped storage[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(12): 10-18 (in Chinese).

[26] 陈雪梅，陆超，刘杰，等. 考虑调频性能考核的储能–机组联合调频控制策略[J]. 中国电机工程学报，2021，41(10)：3383-3391.
CHEN Xuemei, LU Chao, LIU Jie, et al. Control strategy considering AGC performance assessment for BESS coordinated with thermal power unit in AGC[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3383-3391 (in Chinese).

[27] 王仁顺，赵宇，马福元，等. 受端电网高比例可再生能源消纳的运行瓶颈分析与储能需求评估[J]. 电网技术，2022，46(10)：3777-3787.
WANG Renshun, ZHAO Yu, MA Fuyuan, et al. Operational bottleneck analysis and energy storage demand evaluation for high proportional renewable energy consumption in receiving-end grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3777-3787 (in Chinese).

[28] 杨裕生，程杰，曹高萍. 规模储能装置经济效益的判据[J]. 电池，2011，41(1)：19-21.
YANG Yusheng, CHENG Jie, CAO Gaoping. A gauge for direct economic benefits of energy storage devices[J]. Battery Bimonthly, 2011, 41(1): 19-21 (in Chinese).

[29] WHITE C, THOMPSON B, SWAN L G, et al. Comparative performance study of electric vehicle batteries repurposed for electricity grid energy arbitrage[J]. Applied Energy, 2021, 288: 116637.

[30] RANA M M, UDDIN M, SARKAR M R, et al. A review on hybrid photovoltaic—battery energy storage system: current status, challenges, and future directions[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 51: 104597.

[31] 蔡雪，张彩萍，张琳静，等. 基于等效电路模型的锂离子电池峰值功率估计的对比研究[J]. 机械工程学报，2021，57(14)：64-76.
CAI Xue, ZHANG Caiping, ZHANG Linjing, et al. Comparative study on state of power estimation of lithium ion battery based on equivalent circuit model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 64-76 (in Chinese).

[32] 李晓杰，喻云泰，张志文，等. 基于电化学老化衰退模型的锂离子动力电池外特性[J]. 物理学报，2022，71(3)：038803.
LI Xiaojie, YU Yuntai, ZHANG Zhiwen, et al. External characteristics of lithium-ion power battery based on electrochemical aging decay model[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(3): 038803 (in Chinese).

[33] ZENG Y Q, CHALISE D, LUBNER S D, et al. A review of thermal physics and management inside lithium-ion batteries for high energy density and fast charging[J]. Energy Storage Materials, 2021, 41: 264-288.

[34] 聂文亮，谭伟杰，邱刚，等. 基于ARX模型的锂离子电池荷电状态在线估算[J]. 中国电机工程学报，2018，38(18)：5415-5424.
NIE Wenliang, TAN Weijie, QIU Gang, et al. Online state-of-charge estimation for lithium-ion batteries based on the ARX model[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5415-5424 (in Chinese).

[35] AN Z J, JIA L, WEI L T, et al. Investigation on lithium-ion battery electrochemical and thermal characteristic based on electrochemical-thermal coupled model[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 792-807.

[36] 于璐，张辉，田培根，等. 一种退役动力电池梯次利用储能系统安全评估方法[J]. 太阳能学报，2022，43(5)：446-453.
YU Lu, ZHANG Hui, TIAN Peigen, et al. A battery safety evaluation method for reuse of retired power battery in energy storage system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 446-453 (in Chinese).

[37] JANKOWIAK C, ZACHAROPOULOS A, BRANDONI C, et al. Assessing the benefits of decentralized residential batteries for load shaving[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32. 101779.

[38] 马静，沈玉明，荣秀婷，等. 考虑储能用户与新能源双边交易调峰服务的电力系统联合运营模式[J]. 电力自动化设备，2023，43(1)：113-120.
MA Jing, SHEN Yuming, RONG Xiuting, et al. Joint operation mode of power system considering bilateral peak regulation service transaction between energy storage users and new energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 113-120 (in Chinese).

[39] 金铭鑫，王彤，黄世楼，等. 含储能型虚拟同步发电机的直驱风机并网系统自适应协调阻尼控制策略[J]. 电力自动化设备，2021，41(10)：170-177.
JIN Mingxin, WANG Tong, HUANG Shilou, et al. Adaptive coordinated damping control strategy for grid-connected direct-driven wind turbine system with energy storage-based virtual synchronous generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 170-177 (in Chinese).

[40] KABIR M N, MISHRA Y, LEDWICH G, et al. Coordinated control of grid-connected photovoltaic reactive power and battery energy storage systems to improve the voltage profile of a residential distribution feeder[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 967-977.

[41] ZHU Y L, LIU C X, SUN K, et al. Optimization of battery energy storage to improve power system oscillation damping[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1015-1024.

[42] ARTEAGA J, ZAREIPOUR H, AMJADY N. Energy storage as a service: optimal sizing for transmission congestion relief[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117095.

[43] 薛金花，叶季蕾，许庆强，等. 客户侧分布式储能消纳新能源的互动套餐和多元化商业模式研究[J]. 电网技术，2020，44(4)：1310-1316.
XUE Jinhua, YE Jilei, XU Qingqiang, et al. Interactive package and diversified business mode of renewable energy accommodation with client distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1310-1316 (in

Chinese).

[44] 刘亚锦，代航，刘志坚，等. 面向多类型工业用户的分散式共享储能配置及投资效益分析[J]. 电力自动化设备，2021，41(10)：256-264.
LIU Yajin, DAI Hang, LIU Zhijian, et al. Configuration and investment benefit analysis of decentralized shared energy storage for multiple types of industrial users[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 256-264 (in Chinese).

[45] 国家能源局. 关于印发《关于加强储能标准化工作的实施方案》的通知 国能综通科技（2020）3号[EB/OL].（2020-01-09）. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto83/202001/t20200116_3972.htm.

[46] 工业和信息化部. 关于印发《新型数据中心发展三年行动计划（2021—2023年）》的通知[EB/OL].（2021-07-04）. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/14/content_5624964.htm.

[47] 国家发展改革委，国家能源局. 关于加强推动新型储能发展的指导意见[EB/OL].（2021-07-15）. http://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5636148.htm.

[48] 国家发展改革委，国家能源局. 关于鼓励可再生能源发电企业自建或购买调峰能力增加并网规模的通知[EB/OL].（2021-07-29）. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202108/t20210810_1293396.html?state=123&code=&state=123.

[49] 蔡秋娜，文福拴，陈新凌，等. 发电厂并网考核与辅助服务补偿细则评价指标体系[J]. 电力系统自动化，2012，36(9)：47-53.
CAI Qiuna, WEN Fushuan, CHEN Xinling, et al. An evaluation system for two regulations on power plant operation assessment and ancillary service compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 47-53 (in Chinese).

[50] 秦炎. 欧洲碳市场推动电力减排的作用机制分析[J]. 全球能源互联网，2021，4(1)：37-45.
QIN Yan. Role of European carbon market in power sector decarbonization[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 37-45 (in Chinese).

[51] 朱寰，徐健翔，刘国静，等. 英国储能相关政策机制与商业模式及对我国的启示[J]. 储能科学与技术，2022，11(1)：370-378.
ZHU Huan, XU Jianxiang, LIU Guojing, et al. UK policy mechanisms and business models for energy storage and their applications to China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 370-378 (in Chinese).

[52] MARTINS J, MILES J. A techno-economic assessment of battery business models in the UK electricity market[J]. Energy Policy, 2021, 148: 111938.

[53] GARDINER D, SCHMIDT O, HEPTONSTALL P, et al. Quantifying the impact of policy on the investment case for residential electricity storage in the UK[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101140.

[54] 景锐，周越，吴建中. 赋能零碳未来: 英国电力系统转型历程与发展趋势[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：87-98.
JING Rui, ZHOU Yue, WU Jianzhong. Empowering zero-carbon future—experience and development trends of electric power system transition in the UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 87-98 (in Chinese).

[55] HM Government. The ten point plan for a green industrial revolution [EB/OL]. (2020-11). https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution.

[56] 朱继忠，叶秋子，邹金，等. 英国电力辅助服务市场短期运行备用服务机制及启示[J]. 电力系统自动化，2018，42(17)：1-8.
ZHU Jizhong, YE Qiuzi, ZOU Jin, et al. Short-term operation service mechanism of ancillary service in the UK electricity market and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(17): 1-8 (in Chinese).

[57] 樊宇琦，丁涛，孙瑜歌，等. 国内外促进可再生能源消纳的电力现货市场发展综述与思考[J]. 中国电机工程学报，2021，41(5)：1729-1752.
FAN Yuqi, DING Tao, SUN Yuge, et al. Review and cogitation for worldwide spot market development to promote renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1729-1752 (in Chinese).

[58] Department for Business, Energy & Industrial Strategy (BEIS). Energy white paper: powering our net zero future [EB/OL]. (2020-12-18). https://www.gov.uk/government/publications/energy-white-paper-powering-our-net-zero-future.

[59] National Grid. Enhanced frequency response [R]. Warwick: National Grid, 2016.

[60] KAIRIES K P, FIGGENER J, HABERSCHUSZ D, et al. Market and technology development of PV home storage systems in Germany[J]. Journal of Energy Storage, 2019, 23: 416-424.

[61] 刘定，赵德福，白木仁，等. 可再生能源发电对实时电价的影响分析: 德国电力现货市场的数据实证[J]. 电力系统自动化，2020，44(4)：126-133.
LIU Ding, ZHAO Defu, BAI Muren, et al. Analysis on impact of renewable energy generation on real-time electricity price: data empirical research on electricity spot market of Germany[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 126-133 (in Chinese).

[62] 石剑涛，郭烨，孙宏斌，等. 备用市场机制研究与实践综述[J]. 中国电机工程学报，2021，41(1)：123-134.
SHI Jiantao, GUO Ye, SUN Hongbin, et al. Review of research and practice on reserve market[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 123-134 (in Chinese).

[63] RESCH M, BÜHLER J, KLAUSEN M, et al. Impact of operation strategies of large scale battery systems on distribution grid planning in Germany[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 1042-1063.

[64] BORNE O, KORTE K, PEREZ Y, et al. Barriers to entry in frequency-regulation services markets: review of the status quo

and options for improvements[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 605-614.

[65] FIGGENER J, STENZEL P, KAIRIES K P, et al. The development of stationary battery storage systems in Germany - a market review[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 29: 101153.

[66] RIEDEL F, GORBACH G, KOST C. Barriers to internal carbon pricing in German companies[J]. Energy Policy, 2021, 159: 112654.

[67] U.S. Department of Energy, Federal Consortium for Advanced Batteries. National Blue Print for Lithium batteries 2021-2030 [EB/OL]. (2021-6-7). https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/national-blueprint-lithium-batteries.

[68] 孙玉树，杨敏，师长立，等. 储能的应用现状和发展趋势分析[J]. 高电压技术，2020，46(1)：80-89.
SUN Yushu, YANG Min, SHI Changli, et al. Analysis of application status and development trend of energy storage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 80-89 (in Chinese).

[69] 陈大宇，张粒子，王澍，等. 储能在美国调频市场中的发展及启示[J]. 电力系统自动化，2013，37(1)：9-13.
CHEN Dayu, ZHANG Lizi, WANG Shu, et al. Development of energy storage in frequency regulation market of United States and its enlightenment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 9-13 (in Chinese).

[70] 王冰，王楠，田政，等. 美国电化学储能产业政策分析及对我国储能产业发展的启示与建议[J]. 分布式能源，2020，5(3)：23-28.
WANG Bing, WANG Nan, TIAN Zheng, et al. Policy analysis of electrochemical energy storage industry in United States and its enlightenment and suggestions for development of China's energy storage industry[J]. Distributed Energy, 2020, 5(3): 23-28 (in Chinese).

[71] RETNA KUMAR A, SHRIMALI G. Role of policy in the development of business models for battery storage deployment: Hawaii case study[J]. Energy Policy, 2021, 159: 112605.

[72] 苗雪丰. 我国车用动力电池循环利用模式研究[D]. 北京：华北电力大学（北京），2019.

[73] 赵伟，袁锡莲，周宜行，等. 考虑运行寿命内经济性最优的梯次电池储能系统容量配置方法[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(12)：16-24.
ZHAO Wei, YUAN Xilian, ZHOU Yixing, et al. Capacity configuration method of a second-use battery energy storage system considering economic optimization within service life[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 16-24 (in Chinese).

[74] ZHU C B, XU J N, LIU K, et al. Feasibility analysis of transportation battery second life used in backup power for communication base station[C]//2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). August 7-10, 2017, Harbin, China. IEEE, 2017: 1-4.

[75] HAN X H, WANG F, CHEN M J. Economic evaluation of micro-grid system in commercial parks based on echelon utilization batteries[J]. IEEE Access, 2019, 7: 65624-65634.

[76] 李建林，李雅欣，吕超，等. 退役动力电池梯次利用关键技术及现状分析[J]. 电力系统自动化，2020，44(13)：172-183.
LI Jianlin, LI Yaxin, LYU Chao, et al. Key technology and research status of cascaded utilization in decommissioned power battery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 172-183 (in Chinese).

[77] 李国煜. 梯次利用电池应用场景适用性分析[D]. 北京：北京交通大学，2020.

[78] 刘若桐，李建林，吕喆，等. 退役动力电池应用潜力分析[J]. 电气技术，2021，22(8)：1-9.
LIU Ruotong, LI Jianlin, LÜ Zhe, et al. Application potential analysis of decommissioned power batteries[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(8): 1-9 (in Chinese).

[79] 周媛，王锋，信天，等. 退役动力电池梯次利用评估标准UL1974：2018解读[J]. 电池，2021，51(4)：404-406.
ZHOU Yuan, WANG Feng, XIN Tian, et al. Interpretation of the evaluation standard UL 1974: 2018 for echelon utilization of retired power battery[J]. Battery Bimonthly, 2021, 51(4): 404-406 (in Chinese).

[80] GARG A, YUN L, GAO L, et al. Development of recycling strategy for large stacked systems: experimental and machine learning approach to form reuse battery packs for secondary applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 275: 124152.

[81] 王凯丰，谢丽蓉，乔颖，等. 基于退役电池阈值设定和分级控制的弃风消纳模式[J]. 电力自动化设备，2020，40(10)：92-98.
WANG Kaifeng, XIE Lirong, QIAO Ying, et al. Curtailed wind consumption mode based on threshold setting and hierarchical control of retired batteries[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 92-98 (in Chinese).

[82] 吴威，唐雨晨，叶荣，等. 不同场景下基于AHP-TOPSIS退役电池梯次利用综合评价[J]. 电网与清洁能源，2020，36(4)：115-122.
WU Wei, TANG Yuchen, YE Rong, et al. Comprehensive evaluation of AHP-TOPSIS decommissioned battery secondary utilization in different scenarios[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 115-122 (in Chinese).

[83] 谢呵呵. 基于退役动力电池储能的智能家居能量管理[D]. 北京: 华北电力大学（北京），2020.

[84] 陆昊. 新型电力系统中储能配置优化及综合价值测度研究[D]. 北京：华北电力大学（北京）2021.

[85] 周校聿，刘娆，鲍福增，等. 百兆瓦级储能参与电网双重辅助服务调度的联合优化模型[J]. 电力系统自动化，2021，45(19)：60-69.
ZHOU Xiaoyu, LIU Rao, BAO Fuzeng, et al. Joint optimization model for hundred-megawatt-level energy storage participating in dual ancillary services dispatch of power

grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 60-69 (in Chinese).

[86] DAVIES D M, VERDE M G, MNYSHENKO O, et al. Combined economic and technological evaluation of battery energy storage for grid applications[J]. Nature Energy, 2019, 4(1): 42-50.

[87] 胡泽春，夏睿，吴林林，等. 考虑储能参与调频的风储联合运行优化策略[J]. 电网技术，2016，40(8)：2251-2257.
HU Zechun, XIA Rui, WU Linlin, et al. Joint operation optimization of wind-storage union with energy storage participating frequency regulation[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2251-2257 (in Chinese).

[88] 孙伟卿，刘唯，裴亮，等. 高比例可再生能源背景下考虑储能系统价值的储–输多阶段联合规划[J]. 高电压技术，2021，47(3)：983-993.
SUN Weiqing, LIU Wei, PEI Liang, et al. Multistage energy storage-transmission network joint planning considering the system value of energy storage under the background of high penetration renewable energy[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3): 983-993 (in Chinese).

[89] 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.

[90] 李咸善，方子健，李飞，等. 含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J]. 中国电机工程学报，2022，42(18)：6611-6625.
LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6625 (in Chinese).

[91] 李建林，马会萌，袁晓冬，等. 规模化分布式储能的关键应用技术研究综述[J]. 电网技术，2017，41(10)：3365-3375.
LI Jianlin, MA Huimeng, YUAN Xiaodong, et al. Overview on key applied technologies of large-scale distributed energy storage[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3365-3375 (in Chinese).

[92] 王宣元，刘敦楠，刘蓁，等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J]. 电网技术，2019，43(9)：3175-3183.
WANG Xuanyuan, LIU Dunnan, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous Internet of Things[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183 (in Chinese).

[93] 田立亭，程林，郭剑波，等. 虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J]. 电网技术，2020，44(6)：2097-2108.
TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2097-2108 (in Chinese).

收稿日期：2022–11–19；修回日期：2023–01–12。

索克兰

作者简介：

索克兰（1996），男，硕士，研究方向为储能经济性评估、储能性能评价、储能商业模式，E-mail：3547852402@qq.com。

程林（1973），男，教授，博士生导师，研究方向为电力系统可靠性评估、能源互联网规划设计、储能系统优化设计与评估。通信作者，E-mail：chenglin@mail.tsinghua.edu.cn。

（责任编辑　张宇）