

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191487

储能商业化应用政策解析

李建林¹, 李雅欣¹, 周喜超², 王力¹

(1. 储能技术工程研究中心(北方工业大学), 北京 100144; 2. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100050)

摘要: 我国储能产业正处于从政策层面向落实行动计划过渡的时期。在国家各类政策的指导下, 各省市依据其区域特点在梯次回收、辅助调频、新能源发电等领域发布了相关政策, 这在一定程度上加快了储能迈向商业化的步伐。就梯次电池回收利用、新能源发电、电力辅助服务、电价改革等方面梳理了国家层面以及地方的储能政策, 分析了储能技术在应用领域、省市行动计划、企业示范工程的政策要点以及盈利模式。对目前的储能商业化进程给出相应的建议和展望, 为今后提升储能效益价值有一定参考意义。

关键词: 储能政策; 梯次利用; 商业模式; 电力辅助服务; 新能源产业

Analysis of energy storage policy in commercial application

LI Jianlin¹, LI Yaxin¹, ZHOU Xichao², WANG Li¹

(1. Energy Storage Technology Engineering Research Center, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100050, China)

Abstract: The energy storage industry in China is in a period of transition from the policy to the implementation plan. Under the government various guiding policies, many provinces according to their regional characteristics have issued relevant policies in battery cascade utilization, electrical auxiliary service, and new energy generation. These have accelerated the pace of energy storage to commercialization to a large extent. This paper summaries the energy storage policies in terms of battery cascade utilization, new energy generation, electrical auxiliary service and electricity price reform by the government and the provinces. It analyses the policy points and profit model of energy storage technology in the application field, municipal action plans, and enterprise demonstration projects. It also gives the corresponding suggestions and prospects for the current commercialization process of energy storage. This should provide some valuable reference for increasing the energy storage benefits in the future.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.51777197) "Research on the Mechanism and Application of Convergence Effect of Distributed Energy Storage System"; State Grid Corporation of Science and Technology Project "Research on Energy Storage System Modeling and Simulation and Optimal Configuration Technology for New Energy Economic Operation" (No.5278991900ML).

Key words: energy storage policy; battery cascade utilization; business model; electrical auxiliary service; new energy industry

0 引言

大规模储能是国家战略, 备受国家各部委高度重视, 国家层面关于储能方面的政策频出, 近三年内五部委颁布的政策就有 20 余项, 各级政府颁发的配套政策累计达 50 余项, 储能的战略地位提到了空

前高度。储能政策的制定工作也受到国家发改委、工信部等部门的普遍重视。由国家发改委、科技部、工信部和能源局联合印发《贯彻落实〈关于促进储能技术与产业发展的指导意见〉2019~2020 年行动计划》指出, 各省市以及相关能源企业应把开发先进储能技术置于国家重点研发计划中, 集中力量解决储能技术在规模、效率、成本、寿命等方面的技术难点^[1]。同时这项行动计划也将 2017 年发布的《关于促进储能产业与技术发展的指导意见》落地实施, 是将储能战略更为细致化、明确化的政策支持。我国发改委于 2019 年 10 月 30 日发布《产业结

基金项目: 国家自然科学基金项目资助“分散式储能系统汇聚效应机理及应用研究”(51777197); 国网公司科技项目资助“面向新能源经济运行的储能系统建模仿真与优化配置技术研究”(5278991900ML)

构调整指导目录(2019年本)》,其中也明确列出了大容量电能存储技术开发与利用。此外,在地方“十三五”能源规划或专项规划中,涉及储能的政策频出,不少能源公司已经着手开展储能领域相关建设工作,如中国能建、国家电投、国家电网等企业都纷纷进军,储能发展前景广阔。

本文旨在梳理储能在电池梯次回收、新能源发电、辅助调频等应用领域的政策,同时盘点国家指导性意见和各地区典型政策的示范工程,并就各类

政策的发布内容和意义进行分析。

1 国内储能政策概况

1.1 国家政策顶层设计

随着2014年11月《能源发展战略行动计划(2014-2020)》等一系列政策发布(见表1),我国储能逐渐登上新能源产业的舞台。这些指导性政策不仅肯定了我国储能的发展地位,更为之后储能政策的发布抛砖引玉。

表1 储能政策定身份

Table 1 Summary of the first policies issued in the field of energy storage

发布时间	发布部门	政策	意义
2014.11	国务院	《能源发展战略行动计划(2014-2020)》	首次将储能列入9个重点创新领域之一
2016.06.07	国家能源局	《关于促进电储能参与“三北”地区电力辅助服务补偿(市场)机制试点工作的通知》	首次将储能和电力市场改革结合起来,明确了发电侧/用户侧储能作为独立市场主体的地位
2017.10	发改委、能源局等五部委	《关于促进我国储能技术与产业发展的指导意见》	首个大规模储能技术及应用发展的指导性政策
2019.10.30	发改委	《产业结构调整指导目录(2019年本)》	对新能源汽车电池提出了能量密度、循环寿命等参数要求

就2019年下半年而言,发改委等国家部门就储能相关领域已发布了至少6项政策。5月份,国家发改委以及能源局发布《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》(以下简称《通知》)。《通知》中针对政府部门、电网企业、电力用户等各类承担消纳责任的主体提出优先消纳可再生能源的明确要求^[2]。与前三次的征求意见稿相比,《通知》出台新的消纳保障机制,对促进可再生能源商业化的发展产生了正向激励。《通知》明确可再生能源电力消费带头发展的商业化模式,以此鼓励社会层面各个电力应用领域增加对可再生能源的开发利用率^[3]。之后,发改委又发布了《全面开放经营性电力用户发用电计划》,更体现出国家层面对于全面放开经营性发电计划的决心,同时强调了原则上对于经营性电力用户的发用电计划将实行全部放开的政策^[2]。在国内8个电力现货交易试点省份全面开始试运行后,该政策的颁布使中国电力体制改革又推进了一步。对于售电公司、电网、发电企业这些电力市场主体来说,全面放开的商业化模式是更具有挑战性的发展模式^[4]。而对于储能产业来说,加强与售电公司的合作,即能源互联网的价值要通过与售电公司形成售电套餐变现才能更好地实现商业化发展。同时,7月由发改委等4个部门联合下发的《贯彻落实<关于促进储能技术与产业发展的指导意见>2019-2020年行动计划》更加完善了规划增量配电业务改革和电力现货市场建设^[5],为后期推动储能产业的发展明确了具体的任务和分工,从而在“十

三五”期间实现由研发示范项目向商业化初期过渡的目标。之后在工信部发布的《绿色数据中心先进适用技术产品目录(2019年版)》中也涉及了储能领域,即多项储能技术以及飞轮储能装置。工信部通过对绿色数据中心先进适用技术产品的筛选,最终目录中的入选产品涉及能源、资源利用效率提升以及可再生能源利用、分布式供能^[6]和微电网建设,废旧设备回收处理、限用物质使用控制,绿色运维管理等四个领域。使数据中心节能与绿色发展水平持续提升,更为之后储能技术作为商品进入电力市场提供了典范。近日,发改委发布的《产业结构调整指导目录(2019年本)》引起广泛关注,其中鼓励新增“人工智能”行业15个条目,对新能源汽车电池提出了能量密度、循环寿命等参数要求,为新兴产业培育指明了方向,引导新兴产业快速发展。

通过梳理可以看出,国家层面对于储能产业发展的重视程度,储能作为可再生能源系统以及智能电网的重要组成部分,在开放的市场中制定适宜的政策为储能产业的发展提供了广泛且重要的价值。这些政策的制定使储能产业的商业化实现了从无到有、从宏观到具体。就储能而言,能源结构的转型以及能源革命的推进都离不开政策的不断革新。国家对于储能领域政策的顶层设计对储能产业在技术革新以及市场应用方面给予正向激励,不仅为投资者指明了方向,同时为储能产业向商业化发展奠定基础。

1.2 完善梯次电池回收体系

电池梯级利用指的是将容量不足 80% 的电池重新改造以再次应用于储能领域的技术。具体来说，就是资源再生利用的手段之一，通过对目标电池进行破碎、拆解以及冶炼等改造来达到对镍钴锂等资源的再次利用^[7]。中国汽车技术研究中心经过考虑汽车报废年限、动力电池寿命等因素综合得出，预计在 2018—2020 年，全国累计退役车用电池数量将达 12~20 万吨；到 2025 年报废量或达 35 万吨左右。针对退役电池庞大的回收规模，在 2012 年，国务院发布了《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年)》，重点强调了制定电池回收利用管理办法

的必要性，同时也敦促各个相关部门建立退役电池梯级利用和回收的方案。近五年，发改委、工信部等部门陆续发布《生产者责任延伸制度推行方案》《电动汽车动力蓄电池回收利用技术政策(2015 年版)》《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》，《新能源汽车蓄电池回收利用溯源管理暂行规定》等指导性政策，这些政策的发布以及落实为电池梯次利用技术的发展指明了方向，同时推动了电池回收价值的更好转化，梳理了电池回收产业链上下游的责任分摊，为实现电池梯次回收商业化奠定了坚实的基础^[8](见表 2)。

表 2 梯次回收政策汇总

Table 2 Summary of battery cascade utilization policies

时间	发布部门	政策	要点
2016	发改委和工信部	《电动汽车动力蓄电池回收利用技术政策》	对电动汽车动力电池的设计生产、回收主体、梯次利用及再生利用等做出了具体规定
2018.01	国家工信部、科技部、交通部等	《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》	对新能源汽车生产企业提出回收处理退役电池的要求，同时推进完善回收处理退役电池的机制
2018.07	工信部	《新能源汽车蓄电池回收利用溯源管理暂行规定》	要求搭建追踪管理平台，尤其是在电池生产、销售、使用、报废、回收等各个环节收集信息并实时监测
2018.09	工信部	《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》企业名单(第一批)	体现出国家对提高回收利用退役车用电池相关企业的规范程度的要求，同时要求回收电池的行业加快商业化进程
2019.09	工业和信息化部节能与综合利用司	《新能源汽车动力蓄电池回收服务网点建设和运营指南》(修订征求意见稿)	要求完善退役车用电池以及梯次利用的服务站建设，同时还要考虑到安全问题
2019.09	工业和信息化部节能与综合利用司	新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件(修订征求意见稿)	旨在促进梯次利用的综合企业加大在基站备电、储能、充换电等领域的应用，以此提高经济收益
2019.09	工业和信息化部节能与综合利用司	新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法(修订征求意见稿)	鼓励退役车用电池实施梯次利用，以更好地适应新能源行业发展新形势

而在今年，国家数个梯次回收政策的发布，已经表明国家对梯次回收利用的重视程度。今年 6 月国家发改委颁布了《铅蓄电池回收利用管理暂行办法》，旨在建立铅蓄电池回收利用协作机制。该政策的发布具体化了铅蓄电池的回收目标，即在 2025 年底之前，其回收率应保持在 60% 及以上的水平^[9]，与此同时，政府鼓励将铅蓄电池生产企业与退役铅蓄电池回收利用企业合作以实现最终的回收目标。在规范铅蓄电池的回收管理机制后，工业和信息化部节能与综合利用司在 9 月发布了对 2016 年版修订后的《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件(修订征求意见稿)》以及《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范公告管理暂行办法

(修订征求意见稿)^[10]，修改内容主要涉及对镍、钴、锰、锂等主要有价金属的综合回收率指标。同时修改方案还强调对退役车用电池进行筛选重组，通过加大其在基站备电、储能、换电等领域的应用率提升综合利用的收益^[11]。此外，工信部还强调了完善梯次回收体系的必要性，保障退役梯次产品的规范回收。对此，工信部近日发布了《新能源汽车动力蓄电池回收服务网点建设和运营指南》(以下简称《指南》)。《指南》指明了建立收集型回收服务站的重要性，尤其是针对新能源汽车生产商以及致力于梯次利用的相关企业，这些企业可以通过在其汽车销售和电池梯次利用的应用区域(至少地级)内建立服务站点以更好地掌握对退役电池的

追踪管理^[12]。通过政府对梯次回收政策发布频率的密集程度,可以看出国家层面对完善梯次回收管理体系的决心之大,这些政策更好地发挥了信息技术的作用,完善了动力电池信息管理平台,实现了对退役电池来源可溯、去向可查、状态可知。针对退役电池梯次回收难处理的问题,提供了新的创新模式解决方法,从而使回收服务网点、梯次利用生产企业等形成健康共享的循环利用生态链,从而提升回收效益。

1.3 新能源新动向

从 2009 年起,国家就开始推动新能源汽车产业的发展,目前新能源汽车发展已初现规模,政策也做出相应调整。对此,工信部发布了《新能源汽车产业发展规划(2021-2035)年》(征求意见稿),旨在完善法规标准制定以及维护市场秩序。同时该规划也落实了汽车领域开放时间表、路线图,以加快融入国际市场。这个时期的政策已经不再对动力电池的性能指标做具体的设计引导,而是强调企业在技术路线选择、产品产能布局等方面的主体地位,未来车企将更多依据消费者的实际需求来选择技术路线^[13]。该规划作为发展新能源汽车的纲领性政策,指明了未来十五年新能源汽车的发展方向和发展目标^[14]。进一步明确新能源汽车发展路径和政策支撑,将减少资源消耗率作为发展目标,以更具活力的政策激励企业自主创新。

虽然新能源汽车已进入后补贴时代,但市场的销售情况仍然与国家补贴政策密切挂钩。近日,工信部发布关于拟撤销《免征车辆购置税的新能源汽车车型目录》名单的公示,其中共有 141 款新能源汽车:插电式混合动力车 13 款、纯电动车 112 款、燃料电池车 3 款(见表 3),通过逐步减少国家补贴以鼓励新能源汽车过渡至自盈利阶段。紧随其后工信部又发布关于实施《电动汽车用动力蓄电池系统热扩散委员保护测试规范(试行)》,要求自 2019 年 11 月 12 日起,按通知中的要求开展试行工作的车辆生产企业应加强对相关新能源汽车产品的安全监测。对新能源汽车产品的准入,企业可自愿按《热扩散测试规范》增加热扩散测试项目,提交由第三方检测机构出具的检测报告,以保障乘员的安全性。

面对不断扩大的新能源市场,我国的政策重点已经从生产端转向使用端,从扶持补贴阶段过渡到培育独立的消费市场,这些政策不仅为新能源动力电池提供了商业化落地的机遇期,同时也对新能源汽车产品的安全规范做出了要求^[15]。

表 3 免征车辆购置税的三款燃料汽车

Table 3 Three fuel cars are exempted from vehicle purchase tax

企业名称	车辆型号	产品名称
东风汽车集团有限公司	EQ6100CACFCEV	燃料电池城市客车
中通客车控股股份有限公司	LCK6900FCEVG2	燃料电池城市客车
上海申龙客车有限公司	SLK6750GFCEVZ	燃料电车客车

1.4 电力辅助服务新政

目前,能源行业对于电力辅助服务的认知度不断提升,从电力市场改革、到“十三五”规划纲要、再到《关于推动电储能参与“三北”地区调峰辅助服务工作的通知(征求意见稿)》等,表明国家层面对储能领域尤其是电力辅助服务给予了高度重视。2017 年,电力辅助服务新政成为国内电力市场改革的热点,如此密集的电力辅助服务新政出台,足见国家对电力辅助服务的重视。今年 8 月,国家发改委和能源局印发《关于深化电力现货市场建设试点工作的意见》(下称《意见》),针对我国电力现货市场进入新阶段的现状,《意见》就推进电力辅助服务市场建设提出具体要求。具体来说,即凸显市场的主导型作用,依靠市场决定售价、依靠市场引导生产消费、依靠市场完善现货交易,从而在提高电力系统自调节水平的同时激发市场活力,遵守清洁低碳发展的要求^[16]。国家能源局综合司近日发布了《关于 2019 年上半年电力辅助服务有关情况的通报》(以下简称《通报》),分别从电力辅助服务基本情况和各区域电力辅助服务规则执行情况两方面进行了通报(见图 1、图 2)。《通报》中指出,全国除西藏外 31 个省参与电力辅助服务补偿的发电企业共 4 566 家,装机容量共 13.70 亿 kW,补偿费用共 130.31 亿元,占上网电费总额的 1.47%^[17]。此外,近日华北能监局就《第三方独立主体参与华北电力调峰辅助服务市场试点方案(征求意见稿)》征求意见,致力于通过建立示范试点来完善电力辅助服务市场的新机制,即由发电侧延伸至负荷侧。文件指出,满足准入条件的第三方独立主体可参与调峰辅助服务市场。具体来说即储能装置、电动汽车(充电桩)、电采暖、负荷侧调节资源等第三方独立主体不仅能以经营主体的身份独立参与市场,也能以聚合的方式参与。同时由代理商分类代理资源参与市场,位于发电侧的储能装置可独立参与或由所属发电企业代理参与市场,虚拟电厂可参照聚合的方式,聚合资源参与市场。

可以看出,政府为促进电储能产业发挥其市场机制作用搭建了平台,为储能在辅助服务应用领域提供了多渠道盈利的可能性。通过对多种模式的电

储能参与辅助服务的探索,从而推动了储能应用于辅助服务的试点推广力度,为实现储能在电力辅助服务应用领域的大规模商业化奠定了坚实的基础。



图1 各区域电力辅助服务补偿费用情况

Fig. 1 Compensation fees for electricity auxiliary services by region

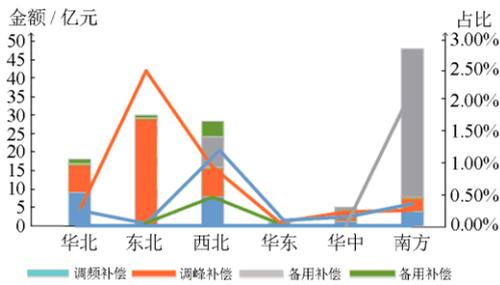


图2 各项电力辅助服务补偿费用

Fig. 2 Compensation fees for various types of electric auxiliary services

1.5 电价改革迈出新的一步

我国发改委自2018年发布《关于创新和完善促进绿色发展价格机制的意见》以来,目前我国在利用峰谷电价差、辅助服务补偿等市场化机制方面都更加完善^[18]。2019年4月,《关于完善光伏发电上网电价机制有关问题的通知》的发布进一步加快了电价改革的进程,完善了集中式光伏发电上网电价形成机制,明确分布式光伏发电项目补贴标准,还将集中式光伏电站标杆上网电价改为指导价。该通知强调了应逐渐减少对分布式光伏发电给予的补贴帮助,同时逐渐以“自发自用、余量上网”的模式运营。从而引导在新能源方面的投资引商更加具有科学性、合理性、有效性^[19]。5月,国家发改委、能源局发布了《输配电成本监制办法》,明确了电储能设施等费用不计入输配电。随后,国家发改委于10月25日正式印发了《关于深化燃煤发电上网电价形成机制改革的指导意见》(以下简称《意见》),《意见》强调要发挥市场的主导性作用来完善辅助服务电价的形成机制。即通过市场对资源分配的决

定性作用,使燃煤机组参与调峰、调频、备用、黑启动等辅助服务电价的制定,从而增加对燃煤发电成本的补偿,以及保障电力系统处于正常的运行状态^[20]。针对某些燃煤机组利用小时数较小的地区,《意见》提出了解决方案,即通过市场灵活性制定容量电价和电量电价,完善对容量补偿机制的建立^[21]。《意见》因此提出了具体方案:第一,把原有的标杆上网电价方案变为“基准价+上下浮动”的市场化定价方案。第二,将仍执行原有标杆电价机制,但是对满足市场交易条件的燃煤发电量的上网电价进行变动,改为在以市场主导的“基准价+上下浮动”范围内形成。第三,针对仍采用燃煤发电的居民以及农业用户,其用电价格仍按基准价执行。第四,对于已经根据交易市场而形成的上网电价,其燃煤发电量仍按照目前的市场化规则施行。第五,在形成燃煤发电上网电价的机制之后,现行煤电机制停止实施^[22]。

电价机制作为市场机制的核心,尽管电价调整可能会带来很多不确定性,但电价改革仍是缓解电力供需矛盾的主要手段,有了储能配置为电力市场的消纳提供助益,同时充分发挥市场的主体性配置作用,都为实现电力市场化交易绿色发展奠定基础。

2 地方储能政策频出

2.1 梯次回收商业化

近日,在河北保定开展了梯次回收行动,并且着手建立针对蓄电池回收的企业试点工程。同时,河北政府还发布了关于蓄电池生产企业建设废铅蓄电池回收体系设点单位的公告。公告中提出,对于生产铅酸蓄电池的企业,凡达到省内规模以上,需着手建立追踪电池生命周期的跟踪系统。同时,生产铅酸蓄电池的企业应通过自主回收、联合回收或委托回收方式,在各企业自有的销售渠道或专业企业在消费末端建立的网络中回收利用铅酸蓄电池。此外,公告还强调,今后的废电池收集站将依据是否属于生产性分为两类废蓄电池收集站。

2019年9月,四川遂宁市印发《遂宁市支持锂电产业发展的若干政策》,政策提出将对第一次把储能电池运用在铁塔、电信、移动、联通公司及国家电网采购体系的锂离子电池企业给予奖励,由市财政一次性奖励10万元。可以看出四川政府对于储能电池发展的支持力度之大。此外,四川遂宁政府还出台6大方面共计21条奖补措施,分别涉及锂电企业的投资建设、锂电企业的品牌化、锂电企业的创新发展、锂电服务平台的建设等方面,该倾斜式的政策旨在推进四川遂宁“中国锂电之都”建设,从

而打造垂直分工、合理布局的千亿级锂电材料及其应用产业的集群聚集区。早在年初,南京江北储能电站已破土动工。该储能电站的规模在江苏全省电力第二批电网侧储能十个项目中位列第一,达到了130.88 MW/268.6 MWh。在该储能电站中,不仅拥有110.88 MW/193.6 MWh的集中式锂电储能,还包括20 MW/75 MWh用于梯次利用的储能电站。

2.2 新能源风电崛起

随着风电等新能源利用比提升,导致系统频率逐渐恶化^[23],而目前较合理的解决方案就是配置储能。早在2017年,国家明确了对风电的接入条件,首先,接入电压等级需低于110 kV及以下,应在110 kV及以下电压等级内消纳,不得向上级电网反送电^[24]。其次,还要求在110 kV电压等级接入的分散式风电项目只允许有1个并网点,且总容量不超过50 MW;对于35 kV及以下电压等级接入的分散式风电项目,应优先以T或者 π 接的方式接入电网。11月8日陕西省榆林市发改委转发省发改委《关于做好陕西省“十三五”分散式风电开发方案调整工作的通知》。《通知》明确以下五个方面,一是统筹项目规划布局。项目应符合各类规划、自然资源、生态环境等管理要求。二是切实落实接入和消纳。以电网接入和消纳条件为前提,优化电源布局,合理控制开发节奏,确保优先消纳。三是认真做好调整工作。结合当地总体规划、风资源现状,对存量项目进行调整。四是严格审核增补项目。增补项目优先支持具备风电开发投资实力和技术能力、信誉好、业绩优的企业。五是从严技术标准和规范。近日,江西省能源局发布2019年第一批分散式风电开发建设方案通知。对申请列入2019年度分散式风电开发方案的项目进行了筛选,经研究最终确定了39个建设项目、总装机规模达到124万kWh,其中包括3个风电储能项目和1个风电制氢项目。之前我国风电储能项目已在青海、河北、内蒙古、辽宁、崇明岛、江苏、甘肃等多省展开,尤其是山西省还完成了国内首例风电储能一次调频项目。

2.3 电力辅助服务市场概况

2019年11月,位于山东省菏泽市东明100 MW的储能电站项目正在进行储能相关设备采购,这意味着继江苏、河南、湖南之后,山东也将迎来百兆瓦储能电站项目。在11月11日,山东能监办印发《山东电力辅助服务市场运营规则(试行)》修订稿,修订版本的运营规则将于11月15日起正式执行。这是今年山东能监办对电力辅助服务市场运行规则进行的第二次修订,主要涉及有偿调峰和AGC^[25],市场交易方式为日前组织、日内调整^[26]。相比2019

年3月修订版,此次修订版本提高了停机调峰,将其由270元/MWh调整为400元/MWh,在AGC最高上限方面,则依然维持6元/MW。此外,为了解决光伏平价上网项目电网接入问题,山东省能源局近期发布《关于做好我省光伏平价上网项目电网接入工作的通知》,其中针对该省调峰压力较大的情况给出解决方案,即鼓励初具规模的集中式光伏电站自主配备储能设施以减少弃光风险。同时还强调,为建立辅助服务补偿新机制,充分发挥市场对资源分配的灵活性和引导性,使得电力系统保持稳定运行,激励风电、光伏发电、核电等清洁能源消纳^[27]。随后,甘肃能源监管办也正式印发了《甘肃省电力辅助服务市场运营规则(暂行)》,规则中涉及到的调峰辅助服务是指并网发电机组或电储能装置、需求侧资源按照电网需求调峰。文件旨在规范建设电储能项目的供应商应满足其充电功率在1万kW及以上、持续充电时间4h以上,并且发电机组、需求侧资源、电储能等各类市场主体参与深度调峰时,电力调度机构根据电网运行需要,按照日前竞价结果统一由低到高依次调用。该文件的制定不仅致力于满足调峰辅助服务市场需求,更进一步推动甘肃电力市场建设,完善辅助服务市场机制,通过建设与现货市场配套衔接的调频市场使得辅助服务市场愈加完善。

2.4 最新电价政策

近日江苏发改委发布江苏省分布式发电市场化交易规则(征求意见稿)。文件指出,目前该省的分布式发电的市场化交易试点基本是以年度为周期的双边协商交易为主。交易过程主要是通过发电项目与邻近的电力用户之间自主协商交易电量、电价,之后再将双方同意后的方案进行安全核验,待核验通过即实现交易。然后再根据其交易的进展情况,适时开展挂牌交易以及集中竞价交易^[24]。文件明确了分布式发电市场化交易的成交价格主要由市场主体通过双边协商达成,严禁第三方干预。发电项目的结算电价即为交易电价;电力用户的平段结算电度电价由交易电价、过网费、政府性基金及附加等构成。执行峰谷电价的电力用户参与市场交易时,继续执行峰谷电价,峰、谷电价按市场交易电价和目录电价的差值同幅增减。为规范电力用户侧执行峰谷分时电价损益的管理,省发改委可根据损益情况统筹考虑峰谷电价的调整。10月,青海省发改委就已经发布《关于创新和完善促进绿色发展价格机制的实施意见》,旨在建立峰谷电价动态调整机制^[28]。通过利用峰谷电价差以及补偿辅助服务等市场化手段,增加可再生能源消纳量,不仅能使储能产业得

到更好的发展，还能为电动汽车产业提供更优质的储能服务，并依靠峰谷电价差获得利润。文件最后提出，预计在 2025 年全面落实对电动汽车集中式充电设备等免收基本电费的方案。

3 储能向商业化迈进

3.1 国家行动计划

早在 2017 年 10 月国家发改委、财政部、科技部、工信部、能源局联合就已经下发了首个储能产业的指导性政策《关于促进我国储能技术与产业发展的指导意见》^[29]。针对目前我国储能产业面向商业化转型的现状，国家发改委办公厅、科技部办公厅、工业和信息化部办公厅、能源局综合司联合发布了《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》2019—2020 年行动计划，要求合理规划增量配置。通过完善电力市场化交易和峰谷电价机制建立电力现货市场，同时在可再生能源消纳、分布式发电、微网、用户侧、电力系统灵活性、电力市场建设、能源互联网等领域发展示范项目，从而推动分布式发电、集中式新能源发电与储能的联合应用^[30]。并且，还要推动新能源汽车动力电池储能化、停车充电一体化建设。近日，发改委、工信部等国家 15 个部门联合印发《关于推动先进制造业和现代服务业深度融合发展的实施意见》。该意见在新能源生产利用和制造业绿色融合方面指出，顺应分布式、智能化发展趋势，推进新能源生产服务与设备制造协同发展^[31]。同时还强调了发展分布式储能服务，实

现储能设施混合配置、高效管理、友好并网。在完善汽车制造和服务全链条体系方面，还指出要加快充电设施建设布局，鼓励有条件的地方积极探索发展换电和电池租赁服务，建立动力电池回收利用管理体系。储能应用作为国家能源革命战略的需要，这些行动计划为推动储能产业规模化、商业化提供助益，对节能减排以及提高能源利用效率意义重大，同时也为后期推动储能产业的发展明确了具体的任务和分工，从而进一步推动“十三五”期间实现由研发示范项目向商业化初期过渡的目标。

3.2 梯次应用领域

据工信部统计，去年新能源汽车在我国的产销分别达 127 万辆和 125.6 万辆，预测在 2020 年退役电池规模将达 24 GWh 左右。面对规模巨大的退役量，由国家工信部、科技部、环保部、交通部、商务部、质检总局和能源局等七部委联合发布《新能源汽车动力蓄电池回收利用管理暂行办法》，该指导性的文件无疑引起了新能源行业的广泛关注。伴随该政策的落地以及各地政府的跟进，使动力电池在储能领域梯次利用的商业价值又引起强烈重视。近日，我国工信部着手展开建立车用电池回收利用试点工程，以助推各致力于汽车制造、电池生产及利用的企业建设储能领域的梯次利用示范工程^[32](见表 4)。这些示范项目对于实现削峰填谷以及削弱弃光率具有极大的意义，同时这些示范项目也是对电池储能的安全性、节能减排和提高电网经济性等优势的巨大认可。

表 4 梯次利用示范工程

Table 4 Summary of cascade utilization demonstration project

企业单位	示范工程	要点
国家电网	北京大兴建立 100 kWh 梯次利用锰酸锂电池储能系统示范	组建了退役电池分选评估技术平台，制定电池配组技术规范，研制了高效可靠的电池管理系统
国家电网	张北建立 1 MWh 梯次利用磷酸铁锂电池储能系统示范	建设基于大数据的动力蓄电池包(组)评估系统
北京匠芯	梯次利用光储能系统	突破了电池成组、容量综合评估等一批梯次利用关键技术
北京普莱德与北汽等合作	储能电站项目、集装箱式储能项目	利用退役动力蓄电池
中国铁塔	开展梯次利用电池备电应用	累计梯次利用量约 75 MWh
深圳比亚迪、国轩高科等	生产用于备电领域的梯次利用电池产品	—
无锡格林美与顺丰公司	将梯次利用电池用于城市物流车辆	—
中天鸿锂	通过“以租代售”模式推动梯次利用电池在环卫、观光等车辆的应用	—

目前来看，中国铁塔公司正积极响应梯次利用的号召。从去年开始，铁塔公司已将其旗下约 200 万个基站的全部电池都采用了车用退役电池。同时，

除了备用电源，在削峰填谷^[33]、新能源发电和电力动态扩容等方面都采用了车用退役电池。此外，中国铁塔公司表示，到 2020 年该公司可接纳 1 000 万

辆电动汽车产生的退役电池。在电网储能领域, 梯次电池应用的试点也在逐步增多, 2018年3月, 江苏电力第二批电网侧储能的招标项目中, 就包括了20 MW/75 MWh的梯次利用储能电站。近日, 备受瞩目的雄安新区对外发布了储能电站项目招标, 采用电动汽车退役梯次电池建储能电站。南方电网雄安公司筹备组作为此次招标人, 对外明确发布了其在储能领域的规划: 初步规划每个区、县、小城镇均配置1个储能电站, 每个储能电站规模在10 MW/40 MWh左右, 总体规模在500 MW/2 000 MWh左右。近2 GWh的调峰调频电站规划, 全部采用电动汽车退役梯次电池。而此次雄安新区的储能电站规划, 则是目前为止规划规模最大的以退役电池为主的电网侧储能电站项目。与雄安新区发布储能电站招标的同一时间, 北汽集团旗下的北汽鹏龙动力电池梯次利用项目奠基仪式在河北沧州举行。

如此密集的行动计划已显示出梯次利用在储能领域尤其是在电池储能电站所发挥出的价值^[34], 对电池梯次利用不仅可以降低储能电站的投资建设成本, 同时使得电池利用效益最大化, 对减少环境污染具有极大意义。而这些示范工程的探索也为实现规模化利用退役电池、最大化电池经济效益提供了现实基础, 这些行动计划的落地更为之后电池储能电站商业化奠定了工程基础。

3.3 储能辅助服务市场化交易

2019年4月, 国网青海省电力公司联合鲁能集团青海分公司、国电龙源青海分公司、国投新能源投资有限公司, 四家企业就实施共享储能调峰辅助市场化交易达成共识, 并且已于4月下旬建立了富余光伏与共享储能的联合试点交易。这标志着青海共享储能调峰辅助服务市场试点启动。在短短10天的时间内, 在该试点共计完成充换电量80.36万 kWh, 发电量65.8万 kWh, 储能综合转换效率达到81.9%。根据该试点数据推算, 经过共享储能调峰的光伏发电站年利用小时数可增加180 h, 即利润可达2 250万元人民币。8月22日, 由华润电力(海丰)有限公司与深圳市科陆电子科技股份有限公司合作的30 MW储能辅助调频项目正式开工。该项目位于广东省汕尾市海丰县小漠镇大澳村, 旨在为华润海丰公司百万机组建立规模达到30 MW/14.93 MWh的辅助调频系统。小漠电厂AGC调频储能项目完工后将成为国内储能规模最大的储能调频项目。该项目通过利用安全性能高的磷酸铁锂电池, 首次在百万发电机组成功实验了辅助AGC调频功能以及精确至毫秒级的广域直控技术, 将调频综合性能Kp值提高至2左右。不仅为电网稳定提供高质

量的AGC调频服务^[35], 丰富了储能应用场景, 而且还带来了可观的调频补偿利润^[36]。9月23日零时, 顺利完成30天试运行的湖南华润电力鲤鱼江有限公司(下称“鲤鱼江公司”)储能调频项目正式投入商业运营, 正式成为国内首个由发电厂自主投资建立运维的项目。华润鲤鱼江AGC调频储能项目建立了规模为12 MW/6 MWh的磷酸铁锂电池储能调频系统^[37], 通过利用自主研发的灵犀能量管理系统(LEMS), 分段接入两台机组厂用6 kV母线, 该项目可同时配合单机、双机三种运行模式下进行辅助调频^[38]。华润鲤鱼江AGC调频储能项目的投运意义重大, 它不仅第一个将储能联合调频系统应用于南方电网直调机组, 还首次将储能技术投运于厂级AGC调频模式。在给电网提供优质的调频服务的同时, 更为鲤鱼江获得了不错的收益。

3.4 氢能产业新计划

在十五部委联合印发的《关于推动先进制造业和现代服务业深度融合发展的实施意见》中, 重点强调了推动氢能产业创新、集聚发展, 完善氢能制备、储运、加注等设施和服务。近日, 发改委能源研究所表示, 当前中国氢能产业发展的主要突破口和发展方向是燃料电池汽车和燃料电池, 但在国家的能源战略里面, 氢能产业绝对不仅仅是燃料电池系统和燃料电池汽车。由此可见, 氢能的定位在顶层设计上基本还是明确的。

近日, 我国首次实现将电解制氢技术渗透到天然气技术中, 该项目是由国家电投参与完成的朝阳可再生能源掺氢示范项目, 现一阶段工程已顺利完工。全面地验证了示范氢气“制取-储运-掺混-综合利用”这一产业链核心技术的正确性, 打破国外技术垄断, 填补国内天然气管道掺氢规范和标准的空白^[39]。10月, 山西省人民政府发布《关于印发山西省企业技术创新发展三年行动计划的通知》, 其中提到了与氢能和燃料电池产业的相关工作任务。即大力推动氢能技术等新能源技术突破; 实现氢燃料电池、加氢站、氢燃料电池、氢燃料电池汽车的一体化发展; 推动氢能生产和示范项目的建设, 致力于将氢能资源利用率最大化。2019年10月15日, 上海市科学技术委员会发布《关于公布2019年度上海市“科技创新行动计划”社会发展科技领域项目立项结果的通知》, 在获得立项资助的79个项目中有6个项目涉及氢能及燃料电池领域, 1项油氢合建站方向、2项加氢机方向以及3项燃料电池车方向。

虽然氢能产业发展迅速, 但其规模化和经济性仍然是制约氢能发展的主要因素, 国家对氢能产业的政策扶持仍受到广泛关注。并且, 由于氢能的特

点, 在商业化发展的同时还需要注重安全问题。

4 总结与展望

目前, 国内储能行业尚处于发展期, 相关政策法规亟待进一步完善。因此, 构建全国性的储能大数据中心尤为必要。依托此平台, 开展储能电站相关的并网检测, 能够对不同厂商的设备进行技术评估。储能标注体系建立有助于储能行业有序参与电力市场交易, 从而提升储能效益利用价值, 助力储能的商业化进程。具体建议主要有:

(1) 储能政策制定应有连续性和可持续性, 亟需顶层设计、统一规划;

(2) 储能行业健康发展, 离不开标准体系的不断完善;

(3) 储能类型多元, 应用场景众多, 功能多样, 应依据不同应用场合, 确定好边界条件, 量身定制相应的对口政策;

(4) 储能技术本身已经通过了十余年的实证, 技术完善、可行, 但商业化、规模化推广亟需制定综合考虑投资主体、盈利模式的实操保障措施, 才能破解一方投资、多方获益及无人买单的“怪圈”;

(5) 储能学科持续、健康发展离不开产、学、研各环节人才梯队建设, 应尽快落实相应的人才培养、保障制度。

参考文献

[1] 关于印发《贯彻落实〈关于促进储能技术与产业发展的指导意见〉2019-2020年行动计划》的通知[J]. 石油和化工节能, 2019(4): 11-15.
Circular on the implementation of the guidance on promoting the Development of Energy Storage Technology and Industry 2019-2020[J]. Energy Saving in Petroleum and Chemical Industry, 2019(4): 11-15.

[2] 政经要闻[J]. 中国石油企业, 2019(5): 8-9.
Political and economic news[J]. China Petroleum Corporation, 2019(5): 8-9.

[3] HE Yuqing, CHEN Yuehui, YANG Zhiqiang, et al. A review on the influence of intelligent power consumption technologies on the utilization rate of distribution network equipment[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 183-193. DOI: 10.1186/s41601-018-0092-2.

[4] 黎静华, 汪赛. 兼顾技术性和经济性的储能辅助调峰组合方案优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 44-50, 150.
LI Jinghua, WANG Sai. Optimization of energy storage-assisted peak shaving schemes with both technical and

economic benefits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 44-50, 150.

[5] ESSAYEH C, FENNI M R E, DAHMOUNI H. Optimization of energy exchange in microgrid networks: a coalition formation approach[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 296-305. DOI: 10.1186/s41601-019-0141-5.

[6] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018-0077-1.

[7] LI Gengyin, LI Guodong, ZHOU Ming. Comprehensive evaluation model of wind power accommodation ability based on macroscopic and microscopic indicators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 215-226. DOI: 10.1186/s41601-019-0132-6.

[8] 锂电池回收利用政策利好梯次利用已形成示范效应[J]. 资源再生, 2019(2): 24-26.
Lithium battery recycling policy is good, and the use of ladders has formed a demonstration effect[J]. Resource Recycling, 2019(2): 24-26.

[9] 周航, 马玉骁. 新能源汽车动力电池回收利用工作进展及标准解析[J]. 中国质量与标准导报, 2019(7): 37-43.
ZHOU Hang, MA Yuxiao. Analysis of work progress and standards for new energy vehicle power battery recycling[J]. China Quality and Standards Review, 2019(7): 37-43.

[10] LI Junhui, GAO Fengjie, YAN Gangui, et al. Modeling and SOC estimation of lithium iron phosphate battery considering capacity loss[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 61-69. DOI: 10.1186/s41601-018-0078-0.

[11] 资讯[J]. 汽车纵横, 2019(9): 8-16.
Information[J]. Car Vertical and Horizontal, 2019(9): 8-16.

[12] CAI Hui, CHEN Qiyu, GUAN Zhijian, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.

[13] 政策法规[J]. 家用电器, 2019(9): 7-8.
Policies and regulations[J]. Household Appliances, 2019(9): 7-8.

[14] LI Guodong, LI Gengyin, ZHOU Ming. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of interprovincial

- tie-line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 1-12. DOI: 10.1186/s41601-019-0115-7.
- [15] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [16] 王轶辰. 电力现货市场试点进入“深水区”[N]. 经济日报, 2019-08-09(7).
WANG Yichen. Spot electricity market pilot into “Deep Water Area”[N]. Economic Daily, 2019-08-09(7).
- [17] 支彤. 2018年全国电力辅助服务补偿费用共147.62亿元[N]. 中国电力报, 2019-05-07(1).
ZHI Tong. The total compensation cost of national auxiliary electric power service in 2018 is 14.762 billion yuan[N]. China Electric Power News, 2019-05-07(1).
- [18] 曾鸣, 李晨, 刘超, 等. 考虑电价补贴政策的风电投资决策模型与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 17-23, 86.
ZENG Ming, LI Chen, LIU Chao, et al. Wind power investment decision-making model and policy analysis considering the electricity price subsidies of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 17-23, 86.
- [19] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于完善光伏发电上网电价机制有关问题的通知[J]. 太阳能, 2019(5): 5-5.
National Development and Reform Commission. Circular of the national development and reform commission on perfecting the electricity price mechanism of photovoltaic power generation[J]. Solar Energy, 2019(5): 5-5.
- [20] 丁怡婷. 确保工商业平均电价只降不升[N]. 人民日报, 2019-10-29(2).
DING Yiting. Ensure that the average electricity price of industry and commerce is only reduced[N]. People's Daily, 2019-10-29(2).
- [21] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 国内外兆瓦级储能调频示范应用现状分析与启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(11): 8-16, 38.
SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Analysis and enlightenment of domestic and foreign megawatt-level energy storage frequency modulation demonstration application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(11): 8-16, 38.
- [22] 顾阳. 燃煤发电将告别“标杆价”[N]. 经济日报, 2019-10-25(5).
GU Yang. Coal-fired power generation will bid farewell to the “benchmark price”[N]. Economic Daily, 2019-10-25(5).
- [23] 王瑞明, 徐浩, 秦世耀, 等. 风电场一次调频分层协调控制研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 50-58.
WANG Ruiming, XU Hao, QIN Shiyao, et al. Research and application on primary frequency regulation of wind farms based on hierarchical coordinated control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 50-58.
- [24] 风向[J]. 风能, 2019(5): 8-11.
Wind direction[J]. Wind Energy, 2019(5): 8-11.
- [25] 袁晓冬, 费骏韬, 胡波, 等. 资源聚合商模式下的分布式电源、储能与柔性负荷联合调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 17-26.
YUAN Xiaodong, FEI Juntao, HU Bo, et al. Joint scheduling model of distributed generation, energy storage and flexible load under resource aggregator mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 17-26.
- [26] 王元臣. 电力辅助服务市场运营解读及经济性分析[J]. 中国市场, 2018(35): 137-137.
WANG Yuanchen. Interpretation and economic analysis of power auxiliary service market operation[J]. China Market, 2018(35): 137-137.
- [27] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 179-186.
ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 179-186.
- [28] HUANG Wujing, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [29] 李岱昕, 张静. 首个产业政策发布助推中国储能迈向商业化[J]. 电器工业, 2017(11): 42-44.
LI Daixin, ZHANG Jing. The first industrial policy announcement contributed to the commercialization of energy storage in China[J]. The Electrical Industry, 2017(11): 42-44.
- [30] 储能100人. 电池梯次利用冲向风口[J]. 新能源经贸观察, 2019(4): 27-29.
Energy storage 100 persons. The battery ladder is used to run into the air inlet[J]. New Energy Economic and Trade Observation, 2019(4): 27-29.
- [31] MAGDY G, MOHAMED E A, SHABIB G, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. Protection and Control of

- Modern Power Systems, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.
- [32] 袁铁江, 陈洁, 刘沛汉, 等. 储能系统改善大规模风电场出力波动的策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 47-53.
YUAN Tiejia, CHEN Jie, LIU Peihan, et al. Strategy of improving large-scale wind farm output fluctuation based on energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 47-53.
- [33] 孙铭爽, 贾祺, 张善峰, 等. 面向机电暂态分析的光伏发电参与电网频率调节控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 28-37.
SUN Mingshuang, JIA Qi, ZHANG Shanfeng, et al. Single-stage grid-connected photovoltaic generation takes part in grid frequency regulation for electromechanical transient analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 28-37.
- [34] 李建林, 王上行, 袁晓冬, 等. 江苏电网侧电池储能电站建设运行的启示[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 1-9, 103.
LI Jianlin, WANG Shangxing, YUAN Xiaodong, et al. Enlightenment from construction and operation of battery energy storage station on grid side in Jiangsu Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 1-9, 103.
- [35] 张东辉, 徐文辉, 门锟, 等. 储能技术应用场景和发展关键问题[J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 1-5.
ZHANG Donghui, XU Wenhui, MEN Kun, et al. Application scenarios of energy storage and its key issues in development[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(3): 1-5.
- [36] 王斐, 梁涛. 储能系统辅助火电机组联合 AGC 调频技术的应用[J]. 电工电气, 2018(9): 34-37.
WANG Fei, LIANG Tao. Application of combined automatic gain control frequency modulation technology for energy storage system auxiliary thermal power unit[J]. Electrotechnics Electric, 2018(9): 34-37.
- [37] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [38] 宋丹丹, 马宪国. 储能技术商业化应用探讨[J]. 上海节能, 2019(2): 116-119.
SONG Dandan, MA Xianguo. Discussion on commercial application of energy storage technology[J]. Shanghai Energy Conservation, 2019(2): 116-119.
- [39] 张旭. 国内首个天然气掺氢示范项目在朝阳完成一阶段工程[N]. 辽宁日报, 2019-10-2(5).
ZHANG Xu. The first demonstration project of natural gas of natural gas in China has completed a phase of project at Chaoyang[N]. Liaoning Daily, 2019-10-2(5).

收稿日期: 2019-11-28; 修回日期: 2020-02-06

作者简介:

李建林(1976—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为大规模储能技术; E-mail: dkyljl@163.com

李雅欣(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源系统与微电网; E-mail: lyxpsh@163.com

周喜超(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事大规模储能技术在新能源领域的应用研究; E-mail: zxc3509@163.com

王力(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为复杂系统建模与分析. E-mail: li.wang@ncut.edu.cn

(编辑 魏小丽)