规模化新能源-储能技术控制策略及商业模式研究

薛澳宇，马速良，马可欣，何可欣

（储能技术研究中心（北方工业大学电气与控制工程学院），北京 100144）

摘要：高安全、长寿命、高效率、低成本、大规模和可持续发展的储能技术已经成为新能源发展重要的技术之一。针对“双碳”背景下的储能技术发展情况，结合各种类型储能技术的特性以及应用场景，以风储、光储为例，从运行控制策略、商业模式以及示范工程三个方面展开研究，开展对未来储能技术的展望，为我国储能发展提出建议。

关键词：新能源发电；风储；光储；控制策略；商业模型；示范工程

Research on control strategy and business model of large-scale new energy storage technology

XUE Aoyu, MA Suliang, MA Kexin, HE Kexin

（Energy Storage Technology Engineering Research Center (North China University of Technology), Beijing 100144, China）

Abstract: High-safety, long-life, high-efficiency, low-cost, large-scale, and sustainable energy storage technology has become one of the important technologies for the development of new energy. This article focuses on the development of energy storage technology under the dual-carbon background, combined with the characteristics and application scenarios of various types of energy storage technology, and takes wind storage and solar storage as examples to conduct research from three aspects: operation control strategies, business models and demonstration projects. Carry out the outlook for the future energy storage technology, and put forward suggestions for the development of my country’s energy storage.

Key words: new energy power generation; wind storage; solar storage; control strategy; business model; demonstration project

0 引言

经济的快速发展对能源的需求越来越高。随着化石能源资源的日益减少，风能、太阳能等可再生能源的开发和利用越来越受到人们的重视。我国近几年出台了《可再生能源法》《可再生能源中长期发展规划》等类似政策，鼓励风电、光伏等新能源产业技术发展，壮大产业规模，培育战略性新兴产业。

随着电池的效率、功率、能量和循环寿命的显著提高，兼有电池储能选址灵活的特点，电池储能系统容量从千瓦级到兆瓦级不等且电池储能系统应用领域广泛，涵盖了大规模可再生能源并网、发电、辅助服务、输配电、分布式发电与微电网等诸多领域[1-4]。国内外目前已经建设多项

新能源储能电站并网的示范工程并开展相应的商业模式。其涵盖电化学储能、抽水蓄能和压缩空气储能等多种类型。应用场景包括农村、政府和工商业等多类型产业，应用模式包括辅助服务、削峰填谷等多种模式[5-6]。

进入21世纪，在新能源发电类型中，中国风电始终处于较快的发展阶段，随着风电规模的日益增大，风电接入对电网安全稳定性的影响也越来越显著，风电并网遇到了一系列难题。储能系统作用于风力发电可以起到平滑风电功率波动、提高风电消纳及增加经济收益的作用[7-8]。研究大规模风储系统的聚合、功率分配等控制策略以及应用的商业模式，可以提高风力发电利用率和储能系统经济性。对于大型的新能源储能电站，由于各个地区自然条件、当地政策不同，导致所产生的收益模式有差异，需要结合国内外商业模式特点制定一套适用于我国国情的储能商业模式以提高经济性。

考虑到发展快速的储能技术，有必要结合“双碳”政策扶持背景进行储能在新战略下的的典型应用调研与分析。本文首先重点介绍了不同类型的储能技术以及不同应用场景下的储能特性，由于新能源中风力发电具有代表性，需要结合国内外发展以及示范工程进行考虑、研究，然后以风储为典型实例研究新能源储能运行控制技术，以光储为典型实例研究新能源储能商业模型。最后基于上述内容对未来各类产业配置储能的商业模型、运行控制策略提出建议，对于我国储能产业在各种应用场景的发展具有借鉴作用。

1 储能技术综述

随着发输配用电的全面发展，储能技术已经广泛应用于电力行业诸多领域[9]。尤其随着“双碳”、屋顶分布式光伏等政策发布以来，新能源发电和智能电网的发展给予了多类型储能技术新的发展机遇，储能技术应用于电力系统、新能源发电，可以实现电能的能量管理，保证新能源的消纳问题，提高发电效率，同时也应用于传统的输配电网络中。

1.1 储能技术分类

储能技术应用于电力系统，由于应用场景不同，所选用的储能类型以及规划配置备受关注。不同类型的储能技术特性、应用场景都不相同，经济效益来源也不相同[10-11]。电化学储能由于储能电池类型多以及应用范围广等特性发展迅速。电力系统中，大规模储能有利于发电系统削峰填谷、稳定电网波动及保证负荷稳定性。电网能源和能量管理大多采用超导、钠流电池和铅酸电池等储能技术。

对于电化学储能来说，锂电池、铅酸电池等由于具有低成本、长寿命等优势而发展迅速，液流电池也已经达到商业化示范阶段。但是飞轮和超导储能由于其本身特性，导致发展较为缓慢，还未投入到实际应用中[12]。

由于各类储能系统的特性、密度等具有差异性，所具有的功能也随着场景的不同而变化，很少会有一种类型的储能可以应用于电力系统的所有场景，需要根据场景需求以及储能特性进行双向选择，图1列出了几种适用于电力系统的储能技术在电力系统中的应用方向及其技术需求。

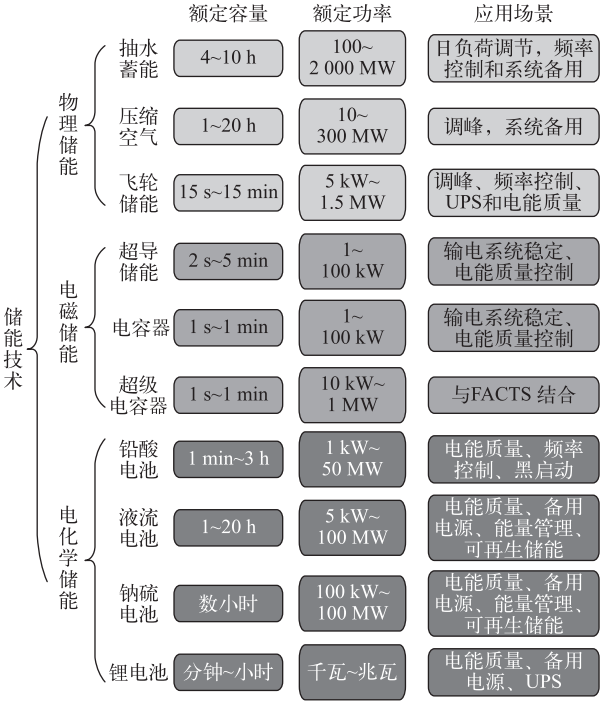

图 1 各种储能技术的应用能力

Fig. 1 Application capabilities of various energy storage technologies

1.2 储能技术分类

随着光伏、风电等新能源发电的市场占比不断提高，电力系统中的稳定容量占比逐渐降低，在负荷高峰时段具备稳定出力电源的价值将逐步凸显。不同类型电源的出力特性不同，具体如图2所示，最常用的是光伏发电和风力发电。由于光伏、风电等新能源的固有特征，系统发电需求高峰时段将转移到可再生能源发电量最低的时段，这将大幅降低新能源本身的容量价值，新能源消纳问题将持续存在[13-14]。储能技术在电力系统中有能量时移、平滑出力、灵活性调节和无功补偿等多种作用。作为可调度和快速响应的电源，储能的辅助服务能力将得到释放。通过配套储能技术，可以满足电力系统不同时间尺度的调节需求，提高系统灵活性，平衡日益剧烈的负荷波动，促进新能源发展[15]。储能的服务功能主要体现在三个方面：一是参与电网系统级调峰；二是储能参与电力系统快速调频；三是储能参与现货市场。储能技术作用于电力系统不同方面所起的作用具有差异性，具体如图3所示。

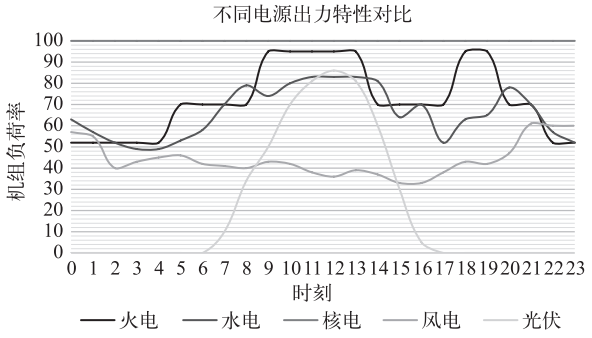

图 2 不同电源出力特性对比

Fig. 2 Comparison of output characteristics of different power supplies

由“电源可控+负荷波动”变成“电源、负荷波动”，电力系统源、网、荷间更容易失衡。电力系统发展呈现以下几点变化：①发电侧光伏等波动性电源比例提升；②终端电气化带来用电总量的提升；③旋转机械电动机的退出以及逆变器、变流器等电力电子设备的接入造成系统惯量的下降。储能系统可以维持系统稳定，提升发电与负荷匹配度，保持系统供需平衡。

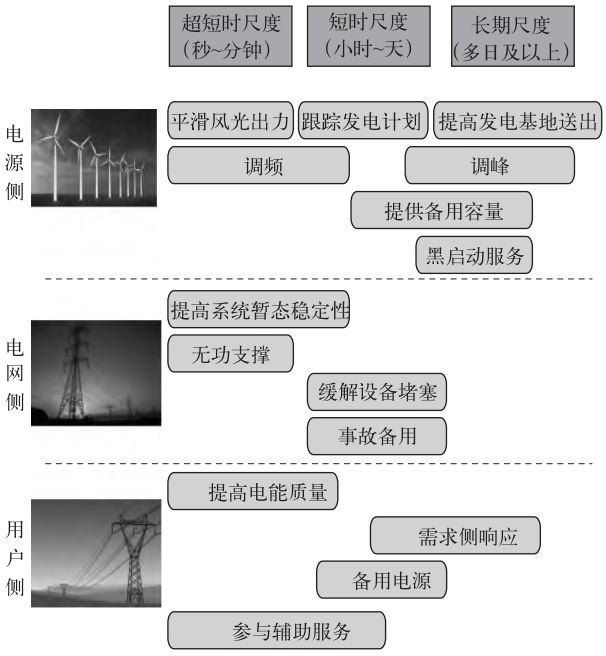

图 3 储能场景及需求特点

Fig. 3 Energy storage scenarios and demand characteristics

单一储能模式无法满足多样的场景需求，储能体系将呈现多元化。不同应用场景下配置储能需要综合考虑电源、电网和负荷特征，并选择合理的配置方案[16]。整体而言，长周期能量型场景与抽水蓄能、氢储能和压缩空气等方式匹配，短周期的功率型场景下，锂电池等电化学储能、飞轮储能和超级电容等更优，具体适用性如图4和图5所示。储能系统可以促进可再生能源的消纳，作用于风力发电可以平滑风电波动，降低弃风率。

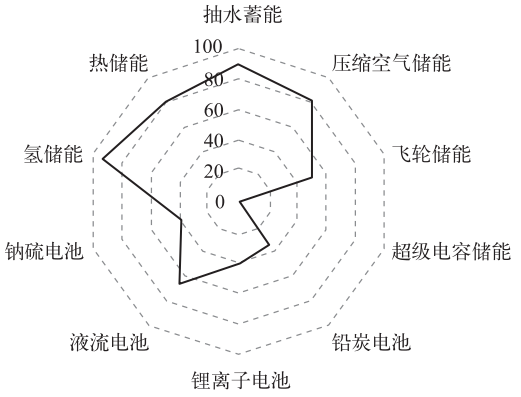

图 4 能量型场景下各类储能技术适用性

Fig. 4 Applicability of various energy storage technologies in energy-based scenarios

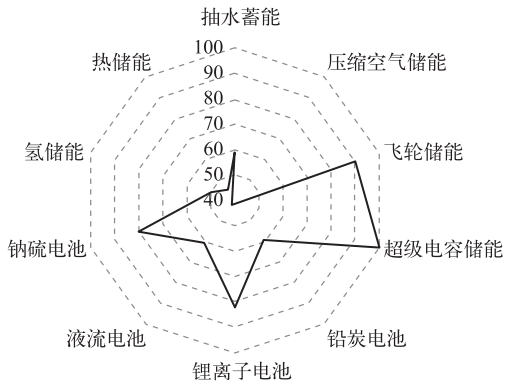

图 5　功率型场景下各类储能技术适用性

Fig. 5 Applicability of various energy storage technologies in power scenarios

2　风储国内外发展现状

风能由于受区域环境、气候和地形等因素的影响，具有很大的随机性和波动性，导致风力发电机组的输出电能特性有与之相对应的随机性和波动性[17]。

储能应用于风力发电系统，无论是对于负荷波动性问题还是系统稳定性问题，都受到国内外工业界和学术界的长期关注。大规模风电并网后，风电的随机性、波动性问题导致的并网难题为大规模储能系统在电力系统中的应用提供了机遇。

2.1　国外大规模风储系统应用现状

国外对于风储技术的研究开始比较早，并且已经开展多项大容量电池示范工程，示范工程大多集中在美国、日本等国家[18-19]。日本最早开始于2008年，采用34 MW的钠流电池加入到51 MW的风电机组中，用于平滑风电出力并取得很好的效果。美国夏威夷群岛风力资源丰富，欧胡岛30 MW风电场配备了15 MW储能系统并于2011年投入使用。Xtreme Power公司与杜克能源合作的风场配备了36 MW的铅酸电池用于削峰填谷，还可用于削峰填谷等辅助服务。美国弗吉尼亚州Laurel山区的风电储能项目则配备了32 MW的锂离子电池储能系统，用于控制98 MW风电项目的频率与爬坡能力，保证风电场的出力情况。国外大容量风储项目见表1，不同的地区因地制宜利用适合自身情况电池类型的储能进行削峰填谷，提高新能源消纳等。

表 1　国外部分大容量电池储能系统示范项目

Tab. 1 Some large-capacity battery energy storage system demonstration projects abroad

地点	应用功能	储能方式说明
英国东伦弗鲁郡	提供无功功率和频率响应	50 MW 锂电池储能系统
美国加利福尼亚州奥克斯纳德南太平洋大街	可再生能源削峰填谷，向电网提供功率支持，增加电网可靠性，提高供电质量	600 kW/6 h 全钒液流电池储能系统
美国西宾夕法尼亚州	用于当地电网的频率调节与出力爬坡控制，提高供电质量和可靠性	3 MW/15 min 超级蓄电池
美国夏威夷	用于 30 MW 风电场的出力爬坡控制	15 MW 铅酸电池储能系统
美国夏威夷	用于 1.5 MW 太阳能电站的出力爬坡控制和调频	1.125 MW 铅酸储能电池系统
美国明尼苏达州卢文	用于 11 MW 风电场的电压支持、爬坡控制和调频	1 MW/7 h 钠硫电池储能系统
日本 Rokkasho	用于 51 MW 风电场的改善预测、功率调节和备用电源	34 MW/254 MW·h 钠硫电池储能系统
美国 Chemical 储能电站	削峰填谷	1.2 MW/7.2 MW·h 的钠硫电池储能系统
丹麦	风 / 储发电系统	15 kW×8 h 液流电池储能系统
爱尔兰 SorneHill 风电场	平滑风电场输出功率波动	2 MW/12 MW·h 储能系统
日本北海道	用于平滑 36 MW 风电场输出	4 MW/6 MW·h 液流电池储能系统
澳大利亚金岛风场	风 / 储 / 柴联合	200 kW×8 h 储能系统
日本北海道	用于 270 kW 风力发电机组	170 kW/6 h 液流电池储能系统

2.2 国内大容量风储系统应用现状

在大规模风电集中并网的电力系统中，风力发电不同于常规发电的静态出力特性和动态响应特性，给电力系统供电的充裕性及运行的安全稳定性带来新的重大挑战。同时，近年来随着我国风力发电规模的快速增长，风电场弃风限电问题成为了业界关注的焦点之一[20]。

国家高度重视风电并网及消纳工作，正如2013年发布的《国家能源局关于做好2013年风电并网和消纳相关工作的通知》中指出，要把提高风电利用率作为做好能源工作的重要标准。

由于我国风力资源丰富，所以需要尽快消除弃风限电，提高风力发电消纳，保证风力发电装机稳定增长，做好风力发电并网工作。储能技术作为提高风力发电的主导技术，成为提高风电消纳的关键。风储联合发电系统利用储能单元对功率的平抑作用，可使联合发电系统的有功功率总输出保持基本稳定，减少对电网的冲击，提高电网运行的高效性、经济性和灵活性，以达到电网接纳大规模风电并网的目的[21-23]。我国风电装机规模及弃风率如图6所示。

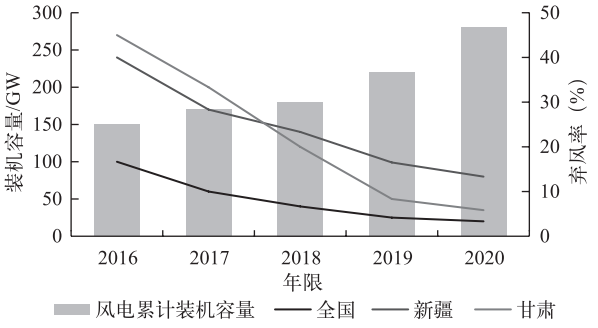

图 6 我国风电装机以及典型地区弃风率

Fig. 6 Wind power installed capacity and wind curtailment rate in typical areas in China

国内大规模电池储能系统在电力系统的应用示范项目相继开展了多项，规模最大的为国家电网公司负责建设实施的国家风光储输示范工程储能电站14 MW/63 MW·h锂离子电池储能系统。在《国家清洁能源消纳三年行动计划任务（2018—2020）》带动下，国内调度系统大力保障清洁能源消纳，国内清洁能源利用率逐年提升。2020年风电利用率达到 97.1%，新疆、青海、宁夏和山西等主要清洁能源基地多设置了装机配储要求，储能逐渐成为优先进入新能源发电市场的先决条件[24-25]。国内部分大容量风储系统应用示范工程见表2。

表 2 国内部分大容量风储示范项目

Tab. 2 Some domestic large-capacity wind storage demonstration projects

地点	应用功能	储能方式说明
深圳比亚迪公司	削峰填谷、新能源灵活接入	1 MW/4 MW·h 锂电池储能系统
中国电科院张北储能实验基地	开展风储联合实验，测试储能在风力发电中的应用	1 MW/1 MW·h 磷酸铁锂电池系统、650 kW/2.6 MW·h 磷酸铁锂电池系统、0.5 MW/1 MW·h 液流电池储能系统、0.1 MW/700 kW·h 铅酸电池储能系统
上海漕溪变电站、前卫变电站和白银变电站	研究储能技术在智能电网削峰填谷、新能源接入、电能质量改善和应急电源等方面的作用	100 kW/200 kW·h 镍氢电池、100 kW/200 kW·h 锂电池、100 kW/80 kW·h 铁电池、10 kW/20 kW·h 全钒液流电池、100 kW/800 kW·h 钠硫电池储能系统
南方电网深圳宝清储能电站	削峰填谷、调压、孤岛运行等多种功能	4 MW/16 MW·h 锂电池储能系统
张北国家风光储输示范工程	新能源发电平滑输出、计划跟踪、削峰填谷和调频	14 MW 锂电池储能系统、2 MW 液流电池储能系统
赤峰煤窑山风电厂	提高风电电能质量，弥补弃风损失	500 kW/1 000 kW·h 全钒液流储能系统
辽宁省法库县卧牛石乡	改善弃风限电现象	5 MW/2 h 全钒液流电池储能系统

3　风光储关键技术及商业模式

新能源包括风电、光伏和核能等清洁能源，其中常用的是风力发电和光伏发电，关于控制策略的研究大多集中在风电，而商业模式的研究集中在光伏发电。所以本文以风力发电为例研究风储控制策略，以光伏发电为例研究光储商业模式。

3.1　国外大规模风储系统应用现状

风电固有的随机性和波动性会对电网产生多种不同的影响，风电装机规模上升拖累电网消纳水平， 风电接入电网的模式与容量、电网结构以及政府关于电网改造的相关政策具有耦合关系，不同地区的电网结构、政策造成了风电接入模式的不同。一般的接入方式有两种：一是风电场直接通过配电网接入电网[26-27]；二是风电场集中接入电网。不同的接入模式采用的控制技术以及商业模式都具有差异性。储能作用于风力发电的作用主要有平滑功率输出、削峰填谷及跟踪计划出力等。

（1）平滑功率输出

储能应用于风力发电，可以平滑风力发电波动，如图7所示，通过储能系统作用实现风电与储能互补，根据监控系统提供的风力发电数据，结合预先设置好的风电出力控制储能机组充放电平滑风电输出功率[28]。有时可以根据历史数据预测风电出力，进而对其进行平滑处理，通过上述操作进行多尺度平滑风电波动并将波动控制在约束范围内，大大降低风电出力波动。平滑风力发电的控制策略是基于一阶滤波和SOC反馈控制的风力发电平滑控制方法。

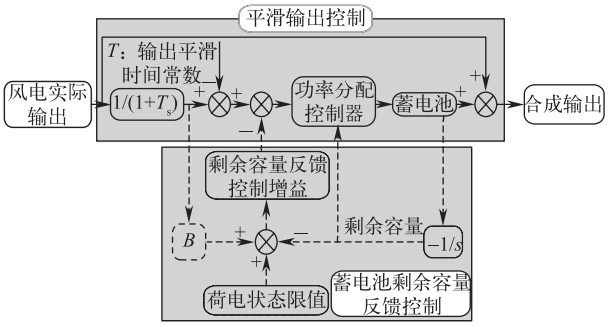

图 7　平滑风力功率输出控制框图

Fig. 7 Block diagram of smooth wind power output control

（2）削峰填谷

图8为储能系统实现风力发电的削峰填谷的控制框图，增加风力发电经济性。通过控制储能装置在用电高峰时储能放电、用电低谷时储能充电，赚取峰谷价差的同时，满足上层调度指令所下发的功率指令，保证风力发电的利用率[29]。

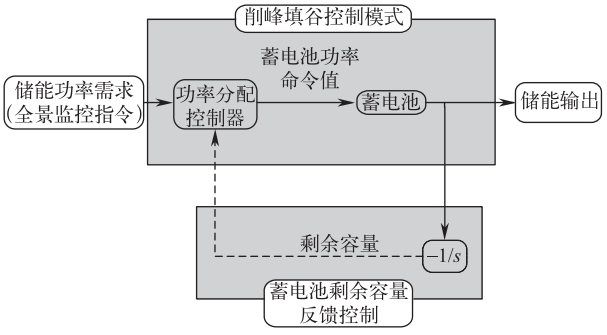

图 8　削峰填谷控制框图

Fig. 8 Control block diagram of peak cutting and valley filling

（3）跟踪计划出力

一般情况下，风力发电由于受到天气影响，所以不会根据电网的需求进行发电，风电配置储能可以进行互补发电，跟踪调度极化曲线，把风力发电由一个具有不确定性的电源转化为出力确定的电源，和常规电源一样给电网提供电能，如图9所示[30]。跟踪计划出力的实质是利用控制策略，针对预测的功率曲线实时修改风储联合发电功率曲线，保证风力发电符合电网需求。

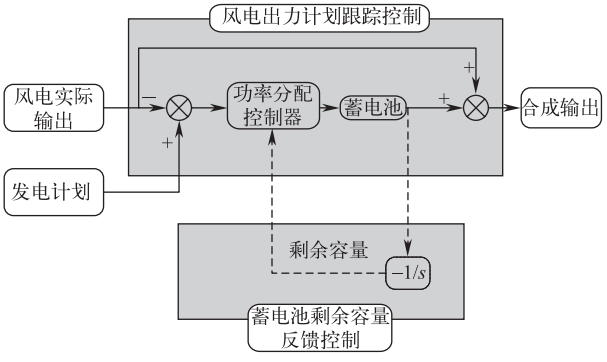

图 9　跟踪计划发电控制框图

Fig. 9 Block diagram of tracking planned power generation control

3.2 国内外储能商业模式对比分析

国外对于新能源发电配置储能的侧重点各不相同，美国侧重于分散式储能，澳大利亚和德国侧重于用户侧储能。中国的储能市场则主要集中在海岛和偏远的微电网。不同国家的应用重点和发展程度各不相同，这与各国家的电力负荷特点、电价水平、市场政策、补贴机制、市场参与者和商业模式等息息相关。

（1）美国

美国尽管已经投运的项目不多，但加州拥有强有力的自发电激励计划（Self Generating Incentive Plan，SGIP）、补贴和税收政策、创新的商业模式及强大的投融资市场的支持，商业和户用光储市场潜力大，在推广模式上值得借鉴。美国的储能应用规模中，民用企业项目数量最多，而商业领域总储能装机规模最大，见表3。

表 3 申请中的光储项目

Tab. 3 Optical storage projects under application

应用领域	项目数量 / 个	容量 / MW	产品类型
户用	379	1.9	计划全部采用 5 kW 的储能产品
商用	33	2.5	计划大部分为 30 kW 的电池储能，也有部分采用 200 kW、300 kW 的电池储能产品
政府	9	0.6	将主要采用 29.99 kW 的储能产品，部分采用 60 kW、90 kW、200 kW 的产品

通过储能系统节省的需量电费给客户带来的价值比通过节能带来的价值大。而分时电价也推动着居民用户购买储能，一方面降低电费，另一方面提供紧急电力备用。部分企业的商业模式如图10所示，大多数用户侧通过增加自发自用，降低高峰需量电费，从而削减电费账单。利用用户储存的容量参与日前市场，用于帮助电力系统平衡。用户负荷曲线、电费结构以及能源利用情况，对于实现商业化应用比较关键。用户和企业的合作模式有三种：直接合作模式；联合光伏企业与用户合作的模式；联合公共事业与用户合作的模式。

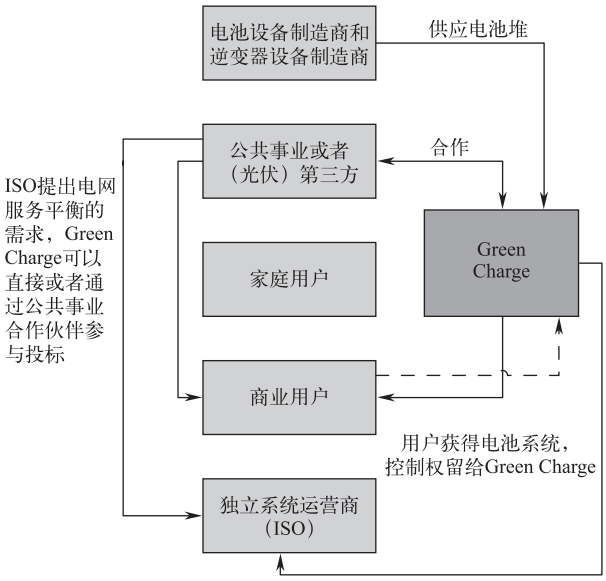

图 10 部分企业商业模式

Fig. 10 Business models of some companies

（2）德国

德国的用户侧储能呈现多种发展模式，比如“免费午餐”模式，如图11所示，还有虚拟电厂、社区储能等。

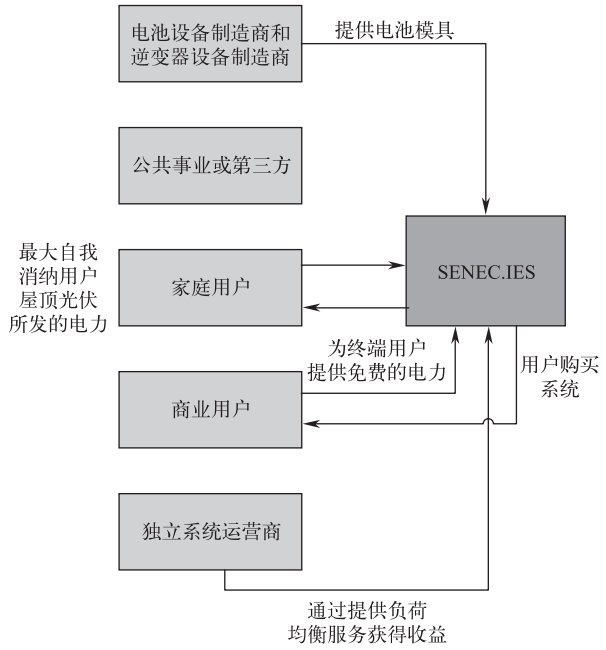

图 11 “免费午餐”的商业模式

Fig. 11 “Free lunch” business model

企业对电池有主要的控制权，当电网零电价时，控制电池从电网充电。用户主要通过：①最大化的自我消纳屋顶光伏所发的电力；②使用企

业提供给用户的免费储存的电力，实现更低的电费账单，进而获益。

虚拟电厂是通过将能源管理模块和储能系统集成并作用于用户侧的模式。用户为了增加自发自用而购买储能系统，能源管理系统由企业统一管理，为这些储能系统增加虚拟电厂的功能提供一次调频控制备用等服务。

社区储能则是通过将安装了光伏的个人用户和安装了热电联产的商业用户的需求和发电曲线设计成互补的，以便于最大限度地利用电池。

（3）中国

在国内，目前主要是电网公司和发电集团牵头开展储能的示范工作，采取项目申请、核准和审批的方式开展项目。项目资金主要来源于企业自有资金+银行融资+科技项目支持，收入来源主要是电力出售，由于储能成本较高，单纯靠电量收入不可能存在经济性。除了海岛和偏远地区对储能的盈利性要求不高的特定场景，其他新能源储能发电目前的商业模式正在进一步完善中。

随着国家能源局发布《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》，确定了电储能参与调频调峰辅助市场服务。“三北”地区各省（区、市）原则上可选取不超过5个电储能设施参与电力调峰调频辅助服务补偿（市场）机制试点，已有工作经验的地区可以适当提高试点数量，在保障电力系统安全运行的前提下，充分利用现有政策，发挥电储能技术优势，探索电储能在电力系统运行中的调峰调频作用及商业化应用，推动建立促进可再生能源消纳的长效机制。

在发电侧建设的电储能设施，可与机组联合参与调峰调频，或作为独立主体参与辅助服务市场交易。在用户侧建设的电储能设施，可作为独立市场主体或与发电企业联合参与调频、深度调峰和起停调峰等辅助服务。

4 结束语

随着屋顶光伏、多能互补等政策的提出，新能源发电产业迎来高速发展的时期，而储能作为新能源发电中的关键产业，也得到了广阔的市场发展空间，在此基础上，从以下几方面给出储能产业发展的相关建议。

1）参考国外储能补贴政策，中国应在储能激励计划中，针对示范应用须达到的技术指标、补贴资金规模奖励标准，建立技术与项目的评价体系，完善基于绩效的奖励机制与结构，提高项目信息库的建立与管理五个方面制定详细的方案与策略。

2）发电企业可通过电化学储能促进新能源消纳，同时为电网提供辅助服务，获取辅助服务收益。电网公司可以通过购置储能系统参与辅助服务，替代部分常规机组，改善电网运行的技术经济性。

3）以磷酸铁锂为代表的电化学储能是当前的重点，也是未来高比例可再生能源系统中重要的储能构成。当新能源渗透率提升至20%以下时，传统机组渗透率下降调节能力受限会造成度电成本上升，此时建议在系统中配置最大负荷2%～5%的电池等短时储能，完成日间风光波动平抑、削峰填谷等，提高系统的调节能力及新能源利用率。

4）开展工程运行效果评价研究工作，在建设储能电站的同时，建议预留容量10%作为备用容量进行一次调频，优化联合发电系统的应用技术，可以完善已建项目、改进再建项目和指导待建项目，提高投资收益。

参考文献

[1] 伍赛特．储能技术及其在电力系统中的应用与发展[J]．上海节能，2020(4)：364-366．

[2] 宋丽，陈永明．现代电力系统中储能技术的应用作用分析[J]．电子元器件与信息技术，2019，3(12)：94-95．

[3] 张超．储能技术在电力系统中的应用现状与前景[J]．现代工业经济和信息化，2019，9(11)：70-71，81．

[4] 王思渊．面向大规模可再生能源并网的储能规划

研究[D]．杭州：浙江大学，2019．
[5] 王守相，陈海文，李小平，等．风电和光伏随机场景生成的条件变分自动编码器方法[J]．电网技术，2018，42(6)：1860-1869．
[6] 彭淼．储能技术在电力系统的应用前景分析[J]．大众用电，2018，32(12)：21．
[7] 张明霞，闫涛，来小康，等．电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径[J]．电网技术，2018，42(5)：1370-1377．
[8] 赖泽荣．储能技术在可再生能源电力系统中的需求和应用[J]．江西电力职业技术学院学报，2017，30(2)：3-6，9．
[9] 陈豪，张伟华，石磊，等．国内外用户侧光储系统发展应用研究[J]．发电技术，2020，41(2)：110-117．
[10] 姜树伟．我国新能源储能技术创新能力提升研究[J]．智能城市，2019，5(15)：24-25．
[11] 于晓辉，杨超，栾敬钊，等．微电网中储能技术的应用[J]．电子技术与软件工程，2018(23)：208-209．
[12] 吕品．储能技术在现代电力系统中的应用研究[J]．南方农机，2017，48(23)：82-83．
[13] 李建林，马会萌，惠东．储能技术融合分布式可再生能源的现状及发展趋势[J]．电工技术学报，2016，31(14)：1-10，20．
[14] 钱伯章．国内储能技术应用进展[J]．电力与能源，2014，35(2)：204-207．
[15] 王谌，张邦玲，冯毅．复合储能技术在主动配电网中的应用[J]．供用电，2014(1)：39-41．
[16] 郭文勇，蔡富裕，赵闯，等．超导储能技术在可再生能源中的应用与展望[J]．电力系统自动化，2019，43(8)：2-14．
[17] 华光辉，赫卫国，赵大伟．储能技术在坚强智能电网建设中的作用[J]．供用电，2010，27(4)：22-25，29．
[18] 颜湘武，王德胜，隗小雪，等．风电机组故障穿越与频率调节风储联合控制策略研究[J]．中国电机工程学报，2021，41(17)：5911-5923．
[19] 李东辉，时玉莹，李扬．储能系统在能源互联网中的商业模式研究[J]．电力需求侧管理，2020，22(2)：77-82．
[20] 王皓，张舒淳，李维展，等．储能参与电力系统应用研究综述[J]．电工技术，2020(3)：21-24，27．
[21] 李建林，孟高军，葛乐，等．全球能源互联网中的储能技术及应用[J]．电器与能效管理技术，2020(1)：1-8．
[22] 孟祥飞，庞秀岚，崇锋，等．电化学储能在电网中的应用分析及展望[J]．储能科学与技术，2019，8(增刊1)：38-42．
[23] 宋安琪，武利会，刘成，等．分布式储能发展的国际政策与市场规则分析[J]．储能科学与技术，2020，9(1)：306-316．
[24] 李建林，王剑波，袁晓冬，等．储能产业政策盘点分析[J]．电器与能效管理技术，2019(20)：1-9．
[25] 胡静，李琼慧，黄碧斌，等．适应中国应用场景需求和政策环境的电网侧储能商业模式研究[J]．全球能源互联网，2019，2(4)：367-375．
[26] 刘畅，卓建坤，赵东明，等．利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]．中国电机工程学报，2020，40(1)：1-18，369．
[27] 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．
[28] 葛少云，刘静仪，刘洪，等．需求响应机制下含建筑虚拟储能的能源站经济调度[J]．电力系统自动化，2020，44(4)：35-47．
[29] 郭伟，赵洪山．基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J]．电工技术学报，2020，35(5)：1140-1151．
[30] 韩晓娟，艾瑶瑶，李相俊．储能在电网中的应用价值及其商业模式[J]．发电技术，2018，39(1)：77-83．

作者简介

薛澳宇（1996—），男，硕士研究生，主要从事新能源和电化学储能控制与规划技术研究。

（收稿日期：2021-10-07）

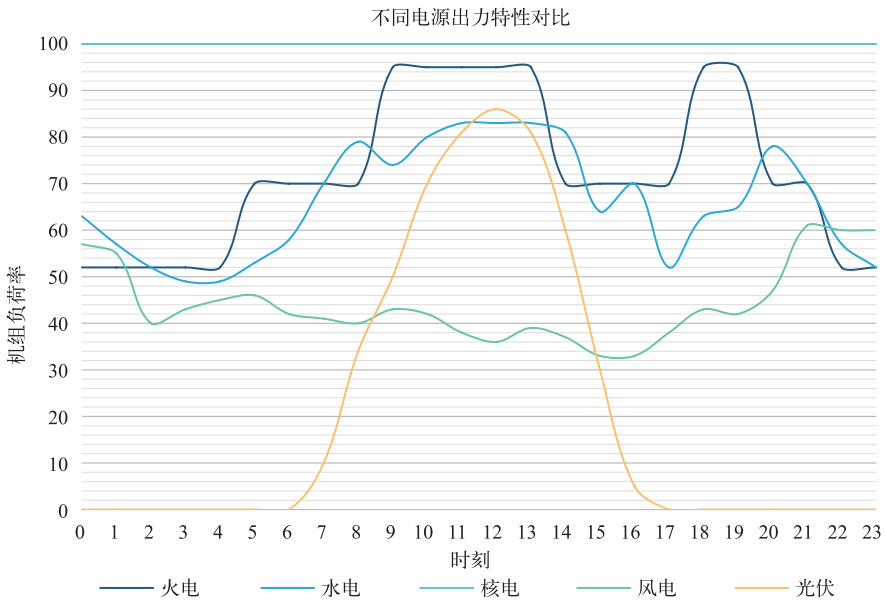

图 2　不同电源出力特性对比

Fig. 2 Comparison of output characteristics of different power supplies

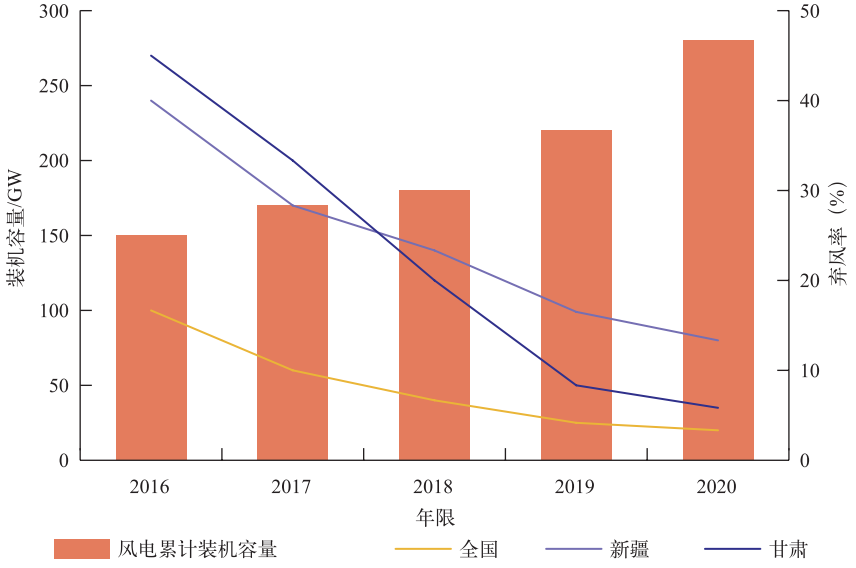

图 6　我国风电装机以及典型地区弃风率

Fig. 6 Wind power installed capacity and wind curtailment rate in typical areas in China