

# 电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径

张明霞, 闫涛, 来小康, 陈继忠, 牛萌, 徐少华

(新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

## Technology Vision and Route of Energy Storage Under New Power Grid Function Configuration

ZHANG Mingxia, YAN Tao, LAI Xiaokang, CHEN Jizhong, NIU Meng, XU Shaohua

(State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems(China Electric Power Research Institute),  
Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Energy storage is a critical technology for efficient utilization of renewable energy and coordinated development of various types of energy. Action modes and application scenarios of energy storage are prospected in normal mode and breakthrough mode respectively, based on current situation and development trend. For energy storage basic theory, battery technology, system integration and engineering application, both research focuses and road maps are proposed. Moreover, staged strategic targets are formulated. As large scale energy storage is desiderated in electric power grid, focus technologies and road maps are also presented.

**KEY WORDS:** energy storage; road map; technology vision; normal mode; breakthrough mode

**摘要:** 储能是实现可再生能源高效利用、多种能源开放互联、协同发展的关键技术之一。基于储能技术发展趋势和需求分析, 展望了 2050 年电网功能形态中, 技术常规发展和关键技术获得突破发展模式下储能的作用模式和应用场景。分析了储能基础理论、本体技术和系统集成及工程化等关键技术的研究重点和技术路线图, 并制定了与电力网络发展相适应的分阶段目标。同时依据能源革命和电网形态发展的客观需求, 给出了大规模储能的重点攻关技术和路线图。

**关键词:** 储能; 路线图; 技术愿景; 常规模式; 突破模式

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2475

## 0 引言

在能源革命的驱动下, 可再生能源开发利用力

度持续加大, 接入电网的比例和在终端能源消费的占比将不断提高。根据国际能源署的研究, 为满足新能源消纳需求, 预测美国、欧洲、中国和印度到 2050 年将需要增加 310GW 并网电力储存能力, 为此至少需投资 3800 亿美元。麦肯锡的研究则将储能列为到 2025 年将产生颠覆性作用、对经济发生显著影响的技术, 预测市场价值将达 0.1 万亿~0.6 万亿美元。世界许多国际组织和国家把发展储能作为缓解能源供应矛盾、应对气候变化的重要措施, 并制定了发展战略, 提出了 2030 年、2050 年明确的发展目标和相应的激励政策<sup>[1]</sup>。

此外, 随着交通的电动化, 电动汽车也逐步进入规模化推广阶段; 同时, 我国的第二轮电力体制改革也在逐步深入推进, 能源生产和消费方式逐步走向开放互联, 多种分布式能源综合高效利用、用户广泛参与将成为电力生产和消费的一种新模式, 电网的规划运行和调度管理模式将面临重大变革。储能特有的功率控制和能量搬移功能不仅能改善可再生能源可调可控特性, 参与电网调峰、调频等辅助服务, 同时也是分布式发电和微电网必不可少的调控手段, 将成为实现可再生能源高效利用、多种能源开放互联、协同发展的关键技术和重要途径<sup>[1-5]</sup>。

## 1 储能应用需求及技术现状

### 1.1 储能应用需求

从国内外储能产业发展分析来看<sup>[6]</sup>, 储能电力供给侧、用户侧及电网运行调度管理和微电网运行控制等方面的应用逐年快速增长。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51677174); 国家电网公司科技项目(电网 2050 功能形态与发展路径研究(JS71-16-004))。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51677174); Science and Technology Project of SGCC (JS71-16-004).

储能电网的应用,可靠安全性是必要前提。在用户侧应用中,免维护特性也是一个必要条件。对于以提高资源利用率和运行效益为目标的能量型应用,如提高可再生能源利用率、调峰、调频、需求侧响应等,应用储能电池的经济性是其可行性的决定因素。对于频繁启动和快速响应的功率型应用,如在可再生能源接入相关的爬坡控制、电压支持及微网无缝切换控制等,储能电池的快速响应能力和浅充浅放条件下的循环寿命是需要重点关注的技术特征。在分布式系统能量管理和微电网运行控制的应用中,储能系统不仅参与电压和频率的调节,还参与系统稳定、供需平衡和协调优化,储能选型需要在技术要求和经济性之间进行权衡。必要时,为降低成本、便于控制,可选择2种及以上的储能分别满足不同的应用需求。

短期内储能的选型更多的取决于当前储能技术的成熟度,示范应用的具体要求和实际条件。长远看来,市场化推广应用取决于工程寿命周期内的整体综合评估。

## 1.2 储能技术现状

目前大规模储能技术中只有抽水蓄能技术相对成熟,但是由于地理资源限制,其广泛应用受到制约,而其他储能方式还处于实验示范阶段甚至初期研究阶段,相关产业处于培育期<sup>[7-21]</sup>。储能装置的可靠性、使用寿命、制造成本以及应用能力等方面有待突破。目前我国应用较多的几种电化学储能特性如图1雷达图<sup>[21]</sup>所示。

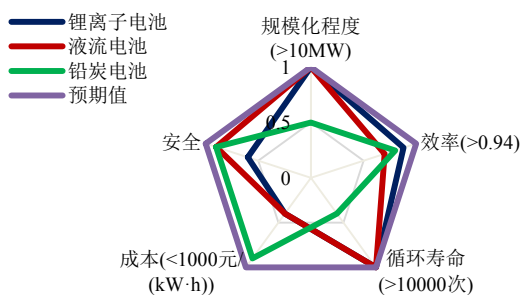


图1 电化学储能技术现状雷达图

Fig. 1 Current situation of energy storage technology

总体来看,我国储能技术研究尚处于发展初步阶段,还不适于在电网全面推广应用,同时随着研发深入和应用推进也暴露出一些问题。这些问题与不足都应在2050的技术攻关过程和顶层设计中加以重视。

### 1) 研发体系不健全。

缺乏顶层设计,没有系统成熟的基础理论体系、本体及材料等底层核心技术环节做为支撑,顶端应用领域的引领作用无法准确传导至全产业链,

造成应用需求和核心技术对接不畅,储能材料和本体经济性指标与未来应用需求尚不匹配。

### 2) 技术经济性有待进一步突破。

目前储能技术成本高,绝大部分储能项目缺乏可预期的收益以吸引资本跟进。而且在系统容量、转换率、寿命、安全性等问题上还有待进一步提高,以满足可再生能源并网消纳和电力系统调节需求。

### 3) 缺乏运行数据支撑。

目前缺乏进行运行评估的实际数据,需要在电源侧、负荷侧进行多方试点示范,积累运行数据,厘清数据的关联性,明确电力储能的运行工况和功效,让试点和政策相互促进,为储能的工程化推广和商业模式研究提供数据支撑。

## 1.3 储能发展趋势

对于下一代储能本体的预期,国内外均将目标设定在了大容量、高安全、长寿命和低成本的目标上。随着应用需求的多样化,储能技术呈现多种类型协同发展的格局,用户侧应用则向结构紧凑、控制智能、接入灵活的方向发展。

储能应用的关键是技术经济性,近年来,几类电化学储能成本均有大幅下降,如图2所示。从锂离子电池的历史发展规律来看,寿命提升较快,成本下降较快,主要原因在于每种材料的内生性增长。可以通过基于材料本身的改性、储能材料体系的匹配以及储能本体制造工艺的改善等外部因素来进行跨越式的提升,成本则可以通过规模化效应快速下降。

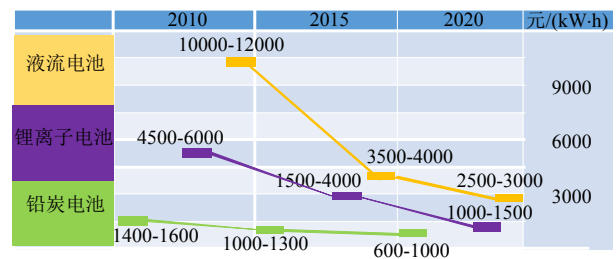


图2 储能技术成本下降趋势

Fig. 2 Cost decreasing tendency of energy storage technology

预计到2020年<sup>[22]</sup>,目前国内安装量较大的磷酸铁锂电池的成本价有望降到人民币1000元/(kW·h)左右。而随着各类验证、示范应用以及标准的建立,储能技术的安全性也将逐步提升,达到标准要求。铅酸电池也在不断改进技术,多家企业已经开始从事铅炭电池的开发,重点提升铅酸电池的使用寿命。液流电池相关制造企业少,目前液流电池储能系统的整体转换效率约70%,尚无法与磷酸铁锂和先进铅酸电池相比,但在使用寿命方面有明显优势。

锂离子电池、液流电池、铅碳电池等新型电化学储能技术水平进步较快，具有巨大的发展潜力和广泛的应用前景，有望率先迈入产业化发展阶段，使储能技术成为与发-输-配-用并列的电力系统第5环节。

## 2 技术愿景

### 2.1 技术驱动因素

促使储能技术发展的驱动力因素主要有以下几个方面。

1) 可再生能源发电比例将持续提升。

随着能源结构调整力度的不断加强，加之雾霾治理、生态压力和绿色低碳发展的倒逼，风电、光伏发电为代表的可再生能源发电占比将持续增长。需要借助大规模储能系统与新能源发电协调优化运行，提高间歇性可再生能源消纳能力。

2) 电动汽车比例持续快速增长。

世界各国均从科研投入、产业化发展、法规标准等多角度制订了大量支持电动发展的政策。我国多次明确到2020年纯电动汽车和插电式混合动力汽车累计产销达到500万辆的发展目标，预计2030年以后电动汽车与传统汽车在市场上将并行发展，产量将达到同类汽车产量的50%。大规模电动汽车电池和退役电池的梯次利用，以及与充电设施配套的储能设施，将为电力系统提供潜力巨大的储能资源。

3) 电网调度控制日益困难和复杂。

未来特高压交直流混合电网的建设，使得我国电网结构和运行方式日益复杂。此外，随着新能源大规模接入电网，其波动性和间歇性给电网的安全

稳定运行带来了巨大挑战<sup>[23-25]</sup>。通过储能技术的应用可以改善可再生能源的可调可控特性，进而提高新型电网的安全可靠运行能力。

4) 电力体制改革推向深入。

随着电力体制改革试点范围的扩大和发展，政府部门将在总结试点经验和修改完善相关法律法规的基础上推进电力体制改革的实施，逐渐形成有效竞争的市场结构和市场体系。现代电力市场体系会大大促进储能为输电网提供调频、调压、备用和黑启动等辅助服务应用的需求。

5) 能源互联网建设逐步落地。

能源互联网将从初步理论概念逐步进行落地实施，计划2016—2020年，将着力推进储能在能源互联网应用的试点示范工作，建成一批不同类型、不同规模的试点示范项目；2021—2030年，会推进储能系统在能源互联网对多元化、规模化发展，使储能技术成为能源互联网推进的主要推动力。

### 2.2 2050年技术情景

#### 2.2.1 常规模式

基于储能技术的研究现状及发展趋势<sup>[7-21]</sup>，综合考虑电力网络多种能源互联和需求侧响应等功能形态发展方向及能源革命需求等多方面因素<sup>[24-33]</sup>，在常规发展模式下，预测2050年前储能本体材料革新改进，成本将得到实质突破；掌握压缩(液化)空气储能技术，储能系统规模从百MW级提升到10GW级，满足全球能源互联网清洁调频、调峰等多样化需求，相关关键技术经济指标如表1所示。

表1 常规模式储能本体技术经济指标预测和分阶段目标  
Tab. 1 Prediction and stage goal of energy storage economic indicator for normal mode

储 能 本 体 技 术 经 济 指 标	技术类型	2030年		2040年		2050年		
		寿命	效率/%	寿命	效率/%	寿命	效率/%	
	抽水储能	30~50年	75	30~50年	80	30~50年	85	
	压缩空气	20年	70	20~30年	75	30~50年	80	
	飞轮	15年	85	25年	90	30年	95	
	钠硫电池	6000次(100%)	85	8000次(100%)	88	10000次(100%)	90	
	液流电池	15年	80	20年	85	25年	88	
	锂离子电池	10000次(100%)	90	15000次(100%)	92	20000次(100%)	94	
	铅碳电池	4500次	85~90	5000次	85~90	8000次	90	
	超导储能	10年	90	15年	95	20年	98	
	超级电容器	15万次	90	20万次	95	30万次	98	
	氢储能	15年	60	20年	70~80	25年	80	
储能技术电网应用水平阶段目标	2017—2030是初步推广应用阶段。到2030年，完善MW级储能装置的研制，并逐步开展100MW—GW级储能装置。		2030—2040是储能技术全面推广应用阶段。在全面总结试点经验的基础上，形成全球能源互联网中储能设备全寿命周期管理。到2040年，大容量电网储能技术得到推广应用，电动汽车、分散储能等实现“即插即用”，使我国大规模储能技术发展及应用水平保持世界先进水平。				2040—2050是大规模应用阶段。电化学储能、压缩空气储能完全满足清洁调频、调峰及电力系统的多样化需求。	



1) 储能成为电力系统“发-输-配-用”之外的第5环节。

2030年以前,大容量、低成本、长寿命、高安全储能电池技术和低成本、高效率压缩空气储能将初步实现;储能系统容量支撑电网消纳非水可再生能源发电电量的比例达到10%,发-输-配-用-储的运行模式在电力系统得到广泛实现,储能资源的广泛存在和灵活高效的特性大大改善电网系统的调度和管理能力,使电力供需从现在的瞬时平衡变成广域时空下的长期平衡。

2) 储能应用向用户侧紧凑型 and 系统级大型应用发展。

随着能源互联体系的逐步建立,包含可再生能源的多种能源的互联互通不仅改变电网的调度运营模式,也将改变用户的用电模式。在现有应用于可再生能源的接入和消纳之外,紧凑型储能还将广泛应用于用户侧参与需求响应,提高用户能效,满足用户多元化需求;同时,系统级大型储能也将在电力网络调峰、调频服务中发挥重要作用,从系统规划和调度管理层面实现资源利用最大化。

3) 分布式储能的规模化汇聚效应凸显。

伴随用户侧分布式储能的广泛应用以及电动汽车比例的持续快速增长,分布式储能作为能源互联网络体系构建的必要环节,其规模化汇聚效应逐步显现,通过统筹部署、协同管理充分挖掘其平衡能力,同时跟进切实有效的商业运行模式,促进多种能源的开放互联和供需各方的柔性互动。

### 2.2.2 突破模式

结合国内外的基础性前瞻性储能本体技术发展趋势,在突破模式下,预测2050年前,锂空气电池等高能量密度储能应用关键材料及本体制备技术实现实质性突破;相变储能技术实现低成本、高稳定性和高能量密度等核心技术的突破;攻克新型氢能储能及应用关键材料及器件制备技术。储能技术作为关键因素推动能源革命,掌握电网、气网和热力网等能源高效转化及多时空协同控制技术,实现以电为中心的不同能源网络柔性互联、调剂和联合调控。

1) 电动汽车等高密度分布式储能使电网形态发生根本改变。

根据巴黎协定2050年全球温升不超过 $2^{\circ}\text{C}$ ,国际能源署预测2050年电动汽车保有量须达10亿辆。按照每辆车 $80\text{kW}\cdot\text{h}$ 计算,储能容量将达800亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,基本满足2050年预期储能需求(预计风光等可再生能源发电量约1万亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,需配置不到10%的储

能,即1000亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 满足消纳需求)。锂空气电池等高密度储能关键技术突破将使电动汽车占比超过90%,电动汽车续航里程和充电速度将实现燃油车完全替代,静态和移动分布式储能接入使集中式的电网结构向分布式结构转变,运行管理方式随之变化,传统电网的形态发生根本改变。

2) 相变储能技术普及使能源互联得以实现。

据统计,40%能源消费用于温度调节,蓄冷/热储能与能源转化技术是能源体系中的重要环节。热相变储能技术的突破和普及,将使能源互联的实现成为可能。高温储热系统释能控制及调节技术得到突破,复合型高温相变储热材料及大容量规模化储热装置装备在建筑物的温度调节和能源系统得到普及,实现高温储热技术在太阳能光热电站的技术应用;基于化学储热的储热关键技术实现突破和普及,高效高储能密度的储热装置在用户侧得到普及,实现化学储热技术应用于可再生能源制热-储热电站。

3) 氢储能的普及将实现多类型能源的广泛利用和灵活转变。

氢储能技术的发展完善将带来氢能利用比例在能源存储与转换系统中实现普及,不同能源形式下各种储能方式共存,用能需求多样化。能源转换和控制运行由单一功能向融合多能源+新型用电等多元复合功能过渡,呈现分散自治和集中协调相结合的模式。电网通过氢储能和P2G技术实现多种能源方式的转换与存储,改善调控手段等方式促进可再生能源的利用;可再生能源发电配合储氢装置,成为可调度、可预测、可控制的电源;实现终端用户供用电关系转换、用能设备的能量缓冲、灵活互动以及智能交互;广泛存在氢动力电动汽车资源为氢能接入提供重要的支持。

## 3 关键技术的实现路径

### 3.1 关键技术

在储能系统应用基础理论方面,研究广域布局的储能系统与常规电源、新能源发电的协同调度方法;掌握多个百MW级储能在新能源发-输-配各环节中的规划布局方法;研究新型技术与供电商业模式下储能的选型配置方法和经济性;分布式储能系统的汇聚效应及在虚拟电厂中的运行模式和管理策略。研究储能技术实现市场化应用的政策和制度需求,包括促进储能发展的电价机制、准入制度及电力市场机制;研究多种类电力市场交易下储能与其他能源的协调运作机制。

在储能本体技术研究方面,研究针对现有体系下锂离子、铅炭、液流等储能电池的关键材料改性、本体改进、低成本化制备、能效提升和产业化技术,研究基于离子液体、固态电解质的高安全性电池材料体系和液流电池低成本高可靠膜制备技术;研究空气压缩机和膨胀机技术,研究储冷储热和储气技术,提高转换效率,降低成本。针对下一代储能技术,研究锂硫、锂空气等新型高比能量电池技术;研制高效制氢及氢发电装备,突破低成本、高效率 and 规模化储氢技术;研发大容量高温高能量密度储热储冷技术装备,突破热相变储能关键技术。

在储能系统集成及工程化技术研究方面,研究适用于百 MW 级储能电站集成与控制技术研究及工程示范;开发储能系统的虚拟电厂汇聚效应控制技术;探索多个百 MW 级储能在新能源发-输-配各环节中的广域规划布局方法;基于新型器件、拓扑及控制方法的储能变流器研制;研究规模化梯次利用电池的重组、集成和热疏导等安全管理技术;研究储氢系统的集成及工程应用技术;掌握相变储能系统的集成及工程应用技术;研究飞轮储能系统的集成及工程应用技术;海水抽水蓄能的集成及工程应用技术;研究深冷储能系统集成与试验技术。

### 3.2 实现路径

储能技术发展及推广应用可分 3 个阶段。第 1 阶段(2017—2030 年)是关键技术突破及商业应用阶段。突破现有体系下的储能本体制造、能量转换及规模化集成等关键技术,研制具有自主知识产权的 GW 级储能系统,实现多个 GW 级储能系统在用户侧和间歇式可再生发电接入电网中的示范应用,提出大规模储能系统并网接入技术规范。

第 2 阶段(2030—2040 年)是大规模推广和下一代技术攻关阶段。完善 GW 级储能装置的研制,并推广 GW 级储能装置在电力调峰、可再生能源大规模接入、提高供电可靠性和电能质量等场合的应用。突破锂空气、储氢、热相变等下一代储能关键技术,并逐步开展示范应用。

第 3 阶段(2040—2050 年)是全面推广应用阶段。电化学储能、压缩空气、热相变和储氢等不同类型的大容量电网储能技术得到推广应用。高比能电动汽车移动式锂空气储能、家庭分散储能装置等实现“即插即用”。实现多种储能方式的协调互补和统一规划调控。大规模储能关键技术突破的总体思路见图 3。

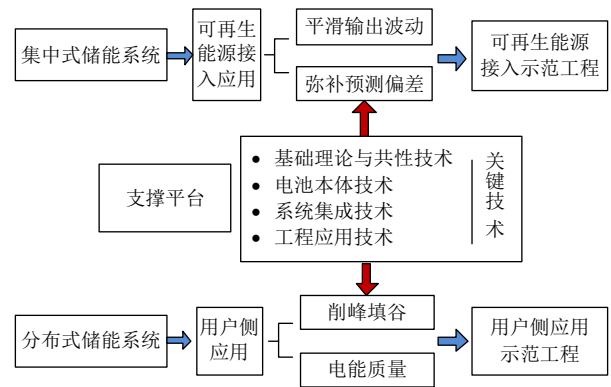


图 3 实现大规模储能关键技术突破的总体思路

Fig. 3 General idea to make critical technology breakthrough of large scale energy storage

在充分评估该技术领域我国现有水平和国内相关科研工作的基础上,参考国外储能技术相关技术路线图<sup>[30]</sup>,依据国家电网发展和建设对大规模储能技术的迫切需求<sup>[31-32]</sup>,应该以集中式储能系统在可再生能源接入中的应用、分布式储能系统在用户侧峰值负荷转移和提高电能质量中的应用为目标和突破口,集中力量解决制约大规模储能技术在关键部件、容量、寿命、可靠性等方面的制约瓶颈,实现示范应用。同时通过标准体系建设和完善,规范引导本体技术研发,为储能技术长期健康发展奠定基础,满足电网发展和建设对大规模储能技术和装置的迫切要求。

### 3.3 技术路线图

#### 3.3.1 常规模式下技术路线

作为一个战略性新兴技术领域,常规模式下的储能技术路线研究核心在于各种储能本体技术,包含关键材料、本体制造、特性分析、产业化转移等多个技术环节,涉及材料、固体物理、电化学、化工、自动控制等多个学科,是一个典型的前沿性交叉技术学科。通过资源整合和体系化平台,直面关键科学问题和技术难点,推动原始创新,加快集中攻关步伐。

如图 4 所示,常规模式技术路线下,全面掌握战略布局的先进储能技术,重点攻关化学储能、压缩空气储能、高温储热的材料制备和核心装置制造技术<sup>[33]</sup>。突破储能系统集成和能量管理等关键技术,实现不同场景不同规模的示范验证和推广应用。构建完备的储能技术标准体系,形成相对完善的产业链结构。

#### 3.3.2 突破模式下技术路线

突破模式下的整体技术路线应突破现有格局的限制,转而构建包括基础理论、材料制备和表征、本体制造、中试级产业化转移和综合性能评估分析

等覆盖全产业链的体系化研究实验平台,并建立相应的高水平研发实验能力,通过贯通材料设计、装置开发、工程示范和综合评估等全部环节,创新体系化研究模式,方能夯实研究基础,以顶层设计思维充分发挥顶端引领作用,加速推进技术与需求对接。

突破模式下的技术路线应该积极探索新材料<sup>[31]</sup>、新方法,实现具有优势的先进储能技术储备,在液体电池、镁基电池等新概念化学电池获得突破;研究热化学储热等前瞻性储热技术,探索高储热密度、低成本、循环特性良好的新型材料配对机制;应用 V2G 虚拟储能前瞻理论,研究服务与支

撑电动汽车推广应用技术。

开展 10~100MW·h 级示范工程,示范验证 10~100MW·h 级面向分布式供能的储热(冷)系统和 10MW 级以上太阳能光热电站用高温储热系统;研究可再生能源发电与质子交换膜/固体氧化物电池电解水制氢一体化技术<sup>[31]</sup>,突破高效催化剂、聚合物膜、膜电极和双极板等材料与部件核心技术,掌握适应可再生能源快速变载的高效中压电解制氢电解池技术,研发成本低、循环稳定性好、使用温度接近燃料电池操作温度的氨基、硼基、铝基、镁基和碳基等轻质元素储氢材料,技术路线如图 5 所示。



图 4 常规模式下储能关键技术路线图

Fig. 4 Technology road map of energy storage for normal mode

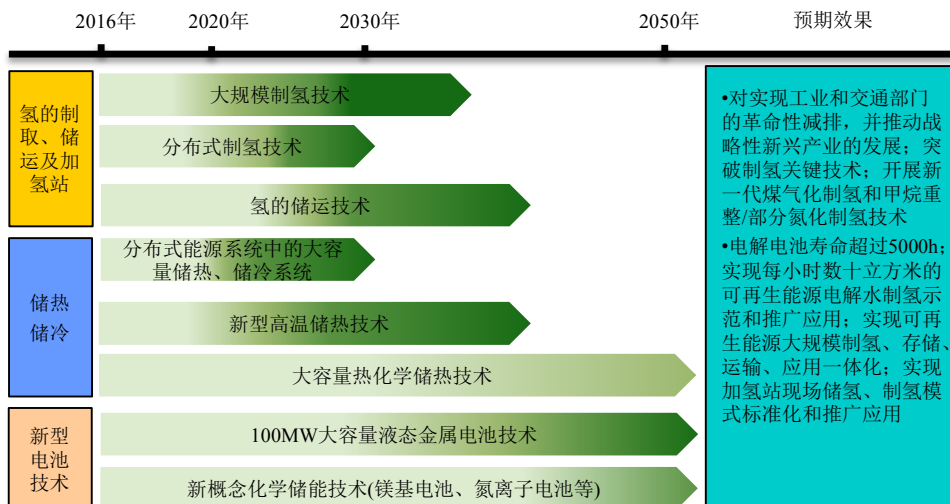


图 5 突破模式下储能突破技术路线图

Fig. 5 Technology road map of energy storage for breakthrough mode



## 4 结论

我国储能技术在基础性研究方向,尤其是储能基础理论、新型材料研究方面尚有欠缺,在基础性、前瞻性交叉技术领域的个别环节较为薄弱,储能装置技术水平与巨大需求之间存在较大差距,在产业化转移能力建设方面有待加强,尚未建成完整的体系化研究闭环,还不能发挥战略作用,亟待补充和强化。

在 2050 年技术攻关重点和顶层设计中,以需求引导为驱动,建立以基础理论为指导、先进储能材料及本体技术为创新根本、关键装备技术为抓手的全新研发模式,完善储能领域创新研究体系。

目标是突破大规模储能技术局限,满足电网接纳大比例新能源并网消纳及调峰需求。针对未来电网与热力网、氢-天然气网等不同能源网络之间互联互通的需求,突破低成本相变储热(蓄冷)技术、高转换效率、长寿命储氢技术,实现以电为中心的不同能源网络间柔性互联、调剂和联合调控,促进清洁能源大规模转化、网络化存储和多形态消纳。突破高比能量锂空气储能电池技术,满足电动汽车续航里程的要求,并在电动汽车领域的大规模、大范围推广应用,实现 V2G 运行模式,开创适用于电网新形态的电网运行管理新模式。

## 参考文献

- [1] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3482-3494.  
Tian Shiming, Luan Wenpeng, Zhang Dongxia, et al. Technical forms and key technologies of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3482-3494(in Chinese).
- [2] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 15-25.  
Li Jianlin, Tian Liting, Lai Xiaokang. Prospect of energy storage technology under energy internet[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 15-25(in Chinese).
- [3] 余贻鑫, 秦超. 智能电网基本理念阐释[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 694-701.  
Yu Yixin, Qin Chao. Expatiation on the basic ideas of smartgrid[J]. Science China: Information Science, 2014, 44(6): 694-701(in Chinese).
- [4] Cao J W, Yang M B. Energy internet-towards smart grid2[C]// Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing. Los Angeles, USA: Fourth International Conference on Networking and Distributed Computing, 2013: 105-110.
- [5] 张军, 戴炜轶. 国际储能技术路线图研究综述[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(3): 260-266.  
Zhang Jun, Dai Weiye. Overview of international roadmap studies on energy storage technologies[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(3): 260-266(in Chinese).
- [6] 中关村储能产业联盟. 储能产业研究白皮书 2017[R]. 北京: 中关村储能产业联盟, 2017.
- [7] 封红丽. 2016 年全球储能技术发展现状与展望[J]. 电器工业, 2016(10): 23-29.  
Feng Hongli. Conditions and outlook of global energy-storing technological development in 2016[J]. China Electrical Equipment Industry, 2016(10), 23-29(in Chinese).
- [8] 吴贤章, 尚晓丽. 可再生能源发电及智能电网储能技术比较[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(3): 316-320.  
Wu Xianzhang, Shang Xiaoli. A review of electrical energy storage technologies for renewable power generation and smart grids[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(3): 316-320(in Chinese).
- [9] 杜晨, 陶维青, 孙雯. 微网中储能技术比较及应用[J]. 电源技术, 2013, 37(4): 703-706.  
Du Chen, Tao Weiqing, Sun Wen. Discussion on energy storage technologies in micro grids and its application[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(4): 703-706(in Chinese).
- [10] Diaz-González F, Sumpera A, Gomis-Bellmunt O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2154-2171.
- [11] 陈海生, 刘畅, 齐智屏. 分布式储能的发展现状与趋势[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 224-231.  
Chen Haisheng, Liu Chang, Qi Zhiping. Developing trend and present status of distributed energy storage[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 224-231(in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.  
Zhang Chuan, Yang Lei, Niu Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154(in Chinese).
- [14] 闫金定. 锂离子电池发展现状及其前景分析[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2767-2774.  
Yan Jinding. Current status and development analysis of lithium-ion batteries[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2767-2774(in Chinese).
- [15] 李泓. 锂离子电池基础科学问题(XV)——总结和展望[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(3): 306-317.  
Li Hong. Fundamental scientific aspects of lithium ion batteries(XV)--Summary and outlook[J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(3): 306-317(in Chinese).
- [16] Zu C X, Li H. Thermodynamic analysis on energy densities of batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 22(4): 2614-2624.
- [17] 荆平, 徐桂芝, 赵波, 等. 面向全球能源互联网的大容量储能技术[J]. 智能电网, 2015, 3(6): 486-492.  
Jing Ping, Xu Guizhi, Zhao Bo, et al. Large-scale energy storage technology for global energy internet[J]. Smart Grid, 2015, 3(6): 486-492(in Chinese).
- [18] 陈来军, 梅生伟, 王俊杰, 等. 面向智能电网的大规模压缩空气储能技术[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(6): 1-6.  
Chen Laijun, Mei Shengwei, Wang Junjie, et al. Smart grid oriented large-scale compressed air energy storage technology[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(6): 1-6(in Chinese).

- [19] 王晓丽, 张宇, 张华民. 全钒液流电池储能技术开发与应用进展[J]. 电化学, 2015, 21(5): 433-440.  
Wang Xiaoli, Zhang Yu, Zhang Huamin. Latest progresses in vanadium flow battery technologies and applications[J]. Journal of Electrochemistry, 2015, 21(5): 433-440(in Chinese).
- [20] 霍现旭, 王靖, 蒋菱, 等. 氢储能系统关键技术及应用综述[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(2): 197-203.  
Huo Xianxu, Wang Jing, Jiang Ling, et al. Review on key technologies and applications of hydrogen[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(2): 197-203(in Chinese).
- [21] 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与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10.  
Li Jianlin, Ma Huimeng, Hui Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10(in Chinese).
- [22] 张静. 电力现货市场的发展助力储能商业化进程[N]. 中国能源报, 2016-08-01(6).
- [23] 中关村储能产业联盟. 储能产业研究白皮书 2015[R]. 北京: 中关村储能产业联盟, 2015.
- [24] 李建林, 靳文涛, 惠东, 等. 大规模储能在可再生能源发电中典型应用及技术走向[J]. 电器与能效管理技术, 2016(14): 9-14.  
Li Jianlin, Jin Wentao, Hui Dong, et al. The typical application and technology trend of large-scale energy storage in renewable energy generation[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(14): 9-14(in Chinese).
- [25] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-19.  
Lu Zongxiang, Li Haibo, Qiao Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19(in Chinese).
- [26] 国家电网公司“电网新技术前景研究”项目咨询组. 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.  
Consulting Group of State Grid Corporation of China to Prospects of New Technologies in Power Systems. 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(in Chinese).
- [27] Luo X, Wang J, Dooner M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation[J]. Applied Energy, 2015, 137(6): 511-536.
- [28] 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(in Chinese).
- [29] 杨锡运, 张璜, 修晓青, 等. 基于商业园区源/储/荷协同运行的储能系统多目标优化配置[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 3996-4003.  
Yang Xiyun, Zhang Huang, Xiu Xiaoqing, et al. Multi-objective optimal configuration of energy storage systems based on coordinated operation of source/storage/load in commercial park[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 3996-4003(in Chinese).
- [30] IEA. The energy storage road map toward 2050[R]. Paris: International Energy Agency, 2014.
- [31] 国家发改委, 国家能源局. 能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)[R]. 北京: 国家发改委, 国家能源局, 2016.
- [32] 国家电网公司. 国家电网公司能源技术革命行动计划—重点任务—基础与共性技术[R]. 北京: 国家电网公司, 2016.
- [33] 国家发改委, 国家能源局. 能源技术革命重点创新行动路线图[R]. 北京: 国家发改委, 国家能源局, 2016.



张明霞

收稿日期: 2017-10-20。

作者简介:

张明霞(1979), 女, 博士, 高级工程师, 通信作者, 研究方向为储能技术与电力系统技术等, E-mail: zhangmingxia@epri.sgcc.com.cn;

闫涛(1979), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为储能技术与功率电子变换技术, E-mail: front79@163.com;

来小康(1960), 男, 教授高级工程师, 研究方向为储能技术与高电压技术等。

(责任编辑 徐梅)