

引用格式: 郑彦春, 陕超伦, 张晋宾. 长持续时间储能体系研究现状及发展展望 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 93-101. ZHENG Yanchun, SHAN Chaolun, ZHANG Jinbin. Current research status and development prospects of long duration energy storage system [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 93-101. DOI: 10.16516/j.cec.2024.2.09.

长持续时间储能体系研究现状及发展展望

郑彦春^{1,✉}, 陕超伦², 张晋宾¹

(1. 电力规划设计总院, 北京 100120;

2. 中煤华晋集团有限公司晋城热电分公司, 山西 晋城 048000)

摘要: [目的] 全球气候变化及其负面影响是人类面临的严峻挑战。加快建设新型能源体系, 推动能源绿色低碳转型, 是应对气候变化挑战的关键。构建新型电力系统, 是规划建设新型能源体系的中心环节。[方法] 描述并分析了以新能源为主体的新型电力系统构建6个阶段的特征、挑战及储能可发挥的作用; 提出储能, 特别是长持续时间储能, 是构建新型电力系统的关键技术。[结果] 为应对国内长持续时间储能存在的概念模糊、技术体系不清晰、研发体系不明确等现状, 通过分析国际主流机构用例, 给出了长持续时间储能的概念体系, 涵盖机械储能、储热、电化学储能、化学储能4个类别的长持续时间储能技术体系, 描述了发达国家的研发动态。[结论] 期待相关内容可以对国内长持续时间储能的研发及应用起到借鉴作用。

关键词: 能源转型; 新型电力系统; 长持续时间储能; 概念体系; 技术体系; 研发动态

中图分类号: TK02

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0093-09

DOI: 10.16516/j.cec.2024.2.09

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Current Research Status and Development Prospects of Long Duration Energy Storage System

ZHENG Yanchun^{1,✉}, SHAN Chaolun², ZHANG Jinbin¹

(1. China Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China;

2. Jincheng Thermal Power Branch of China Coal Huajin Group Co., Ltd. Jincheng 048000, Shanxi, China)

Abstract: [Introduction] Global climate change and its negative impacts are serious humanitarian challenges. Accelerating the construction of a new energy system and promoting energy transition to green and low-carbon are the key to addressing the above challenge. Building a new power system is the central link in planning and constructing a new energy system. [Method] The characteristics and challenges in the six stages of constructing a new power system with new energy source as the main body, and potential roles of energy storage were described and analyzed. The viewpoint that energy storage, especially long-term energy storage, is a key technology for building a new power system was proposed. [Result] To deal with vague concept, unclear technical system and undefined R&D system for long duration energy storage in China, by analyzing the international use cases, the concept system of long-duration energy storage and its technology system covering four categories (including mechanical energy storage, thermal storage, electrochemical energy storage, and chemical energy storage) are proposed. And the R&D trends in developed countries are shown. [Conclusion] It is expected that the relevant content can provide reference for the research and application of long duration energy storage in China.

Key words: energy transition; new power system; long duration energy storage; concept system; technical system; R&D trends

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-09-21 修回日期: 2023-10-30

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技专项“电化学储能系统集成技术与关键装备研发”(CEEC2021-KJZX-09)

0 引言

储能是支撑新型能源体系和新型电力系统的重要技术和基础装备,对推动能源绿色转型、应对极端事件、保障能源安全、促进能源高质量发展、支撑应对气候变化目标实现具有重要意义^[1]。没有储能,特别是长持续时间储能的加持,能源绿色低碳转型、新型电力系统的构建是不可想象的^[2]。

储能是涉及材料、能源、机械、化学、物理、电子、电气等学科的多学科强交叉的战略性新兴产业^[2]。其中的长持续时间储能更是新生事物,也是国际研发重点。目前国内存在长持续时间储能术语及定义模糊、技术体系不明确、研发技术路线不清晰等问题。为此,文章基于中国能源电力转型各个阶段需求,分析了储能,特别是长持续时间储能在能源转型中的重要作用;通过对比分析国际主流机构用例,界定了长持续时间储能的术语及定义;基于其内涵外延,给出了长持续时间储能的技术体系;基于国际研发动态分析,给出了长持续时间储能的研发方向及目标,以期促进我国长持续时间储能的研发攻关及示范应用。

1 储能在能源转型中的作用

1.1 能源转型是实现“双碳”目标的核心和关键

全球气候变化及其负面影响是全人类共同面临的迫切问题,给人类可持续发展带来严峻挑战。基于推动实现可持续发展的内在要求和构建人类命运共同体的责任担当,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出“中国将提高国家自主贡

献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和”的“双碳”战略目标^[3]。

维基百科将“能源转型”定义为:当前能源转型是用低碳能源替代化石燃料的持续过程。通常而言,能源转型会带来能源系统在能源供应和能源消费方面的重大结构性变化^[4]。国际可再生能源署(IRENA)指出,能源转型是到本世纪后半叶全球能源部门实现从化石能源向零碳能源转型之路,其核心是需要减少与能源相关的二氧化碳排放,以遏制气候变化^[5]。国际能源署(IEA)也指出,全球能源转型应与世界气候目标相适应,全球能源部门应力争在 2050 年实现净零二氧化碳排放,这是一项艰巨的任务^[6]。

与美国、日本、欧盟等发达国家或地区相比,中国当前已成为全球温室气体年排放量(即碳源)最多的国家(见图 1),2060 年前实现碳中和之路面临着严峻挑战^[7]。

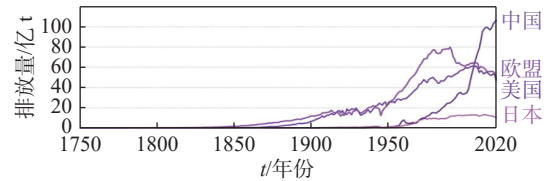


图 1 全球主要国家或地区年温室气体排放量一览表

Fig. 1 Annual greenhouse gas emissions by main countries or regions

(来源: Our World in Data)

当前能源活动是中国最大的碳源,其排放占比超过七成,其中电力碳排放占比超过三成(见图 2)^[8]。

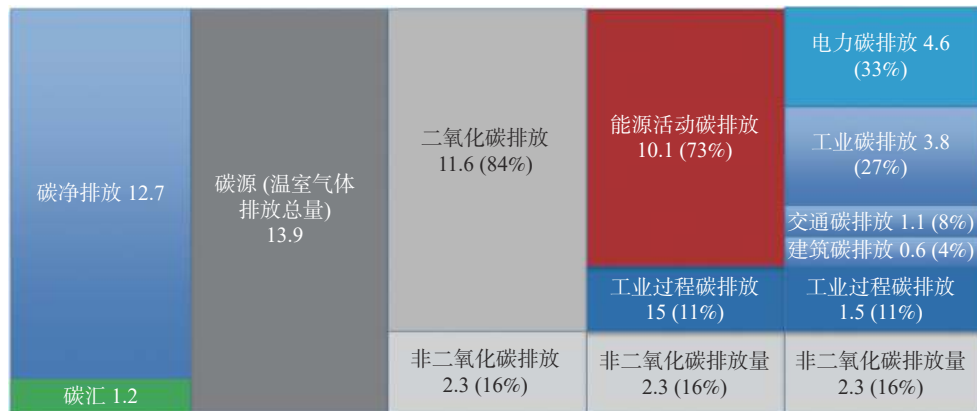


图 2 中国 2020 年温室气体排放总量(Gt CO₂eq)及分类占比

Fig. 2 China total greenhouse gas emissions (Gt CO₂eq) and each sector share in 2020

实现“双碳”目标,能源是主战场,电力是主力军。

推动能源绿色低碳转型,“加快建设新型能源体系”和“以新能源为主体的新型电力系统”,是实现“双碳”目标的核心和关键。

1.2 储能是能源转型的“瑞士军刀”

新型电力系统是新型能源体系的重要组成部分和关键环节。据相关研究,中国能源电力双碳实现路径可分为碳达峰阶段(当前—2030年)、深度低碳阶段(2030—2050年)和零碳阶段(2050—2060年)3个阶段^[9]。各个阶段的VRE(Variable Renewable Energy,可变可再生能源)发电量占比(见图3)预计分别为:碳达峰阶段2030年为25.4%,深度低碳阶段2050年为51.3%,零碳阶段2060年为54.3%。

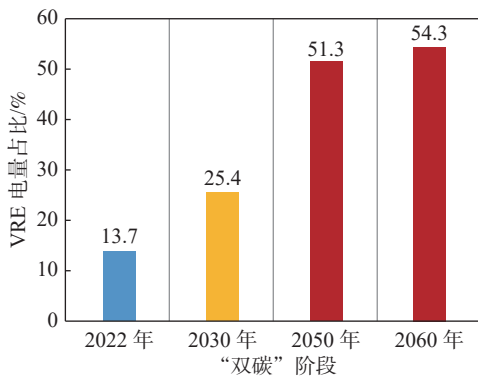


图3 “双碳”阶段主要时间点 VRE 电量占比

Fig. 3 The proportion of VRE electricity quantity at each stage of the carbon peak and neutrality

按照VRE集成到电力系统的程度不同,从低到高可分为6个阶段。6个阶段的特征及挑战分别为:(1)第一阶段:VRE渗透率<5%(VRE渗透率即VRE发电量占比)。借助电力系统自身所具有的储能特性,VRE对原有电力系统性能没有任何明显影响;(2)第二阶段:VRE渗透率介于5%~10%之间。VRE对原有电力系统运行有轻微至中度影响(电力系统运行模式有较小变化);(3)第三阶段:VRE渗透率介于10%~30%之间。VRE发电决定了电力系统的运行模式(净负荷波动更大,电力潮流模式发生变化);(4)第四阶段:VRE渗透率介于30%~50%之间。电力系统会经历VRE发电几乎占所有发电量的时间段(在高VRE发电量下,供电的鲁棒性遇到挑战,净负荷曲线会从鸭子曲线变化为峡谷曲线);(5)第五阶段:VRE渗透率更高,VRE发电量更大,出现不断增长的从天到周的电量盈余或亏缺(能量盈亏期变

长);(6)第六阶段:VRE供电出现月度或季节性盈亏(需利用合成燃料或氢、跨季节性等长持续时间储能来应对)^[10]。当VRE在电力系统中的渗透率超过20%~25%时,为了维持电力系统的可靠性和韧性,必须配置长持续时间储能系统。

从图3可知,当前中国电力系统VRE渗透率正处于从第二阶段到第三阶段的过渡期,VRE对电力系统的影响会从低、中烈度向中、高烈度扩展。众所周知,电力系统的稳定高效运行需要电力供给和电力需求的时刻精准匹配,而VRE具有不可调度、不同步、间歇性、波动性、难以预测的天然特性,随着VRE渗透率向10%及以上的增加,不断增加的VRE量会加剧从毫秒、秒、分钟、小时、天、周到季节等不同时间尺度上发电和负荷之间的不匹配,加之VRE代替火电同步发电机组后带来的物理转动惯量的下降,极易给电网运行带来不稳定性,造成电力系统可靠性的下降。

储能是一种应对能源电力供给与需求在时间、空间、形态、强度等维度上矛盾的颠覆性技术,可提供大宗能源服务、辅助服务、电网基础设施服务、用户能量管理服务等各类服务^[2],具备能量控制、能量转移、能量后备、能量管理、惯量备用、电压控制、无功补偿、平滑出力、黑启动等多种功能,故国际上常称储能为能源转型的“瑞士军刀”(见图4)^[11]。IEA将不同类别储能技术在能源净零排放中的重要性分别界定为重要、非常重要(如将抽水蓄能、液流电池储能、显热储热、高温潜热储热、储氢等储能技术界定为重要,将锂离子电池等储能界定为非常重要)^[12]。储能是VRE的完美搭配,通过VRE+储能的互补互济有机融合,可有效解决VRE的间歇性、波动性、不确定性、难以预测性、调频调压、快速频率响应等问题,使VRE成为电网友好型可调度电源。储能系统与火电机组集成,除可进一步提升火电机组的灵活性和辅助服务性能外,还可消除电力系统对发电机组过度灵活运行的需求,使其能够以最佳出力和效率运行,减少寿命损耗,降低因机组快速变负荷而带来的污染物增多几率,减少对环境的负面影响。特别是当长持续时间储能取得重大技术及经济性突破后,可有效解决新能源可靠替代化石能源的难题,保障长时间极端天气下的用能供应,实现新能源的跨季节等长时间尺度的能量转移。可见,储能能在提高电力绿色可持续性的同时,还可实现电力

系统更大的安全性、韧性、灵活性、可靠性、成本节约和更高效能。因此,储能是电力绿色低碳转型的倍增器、赋能器,是构建以新能源为主体的新型电力系统的利器。

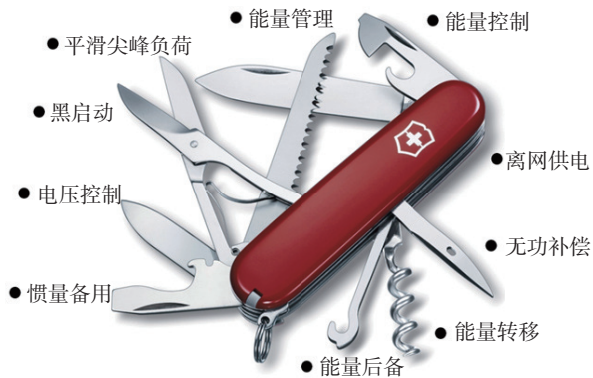


图 4 储能——能源转型“瑞士军刀”

Fig. 4 Energy Storage - "Swiss Army Knife" of Energy Transition

2 概念体系

储能除根据储能装置或系统所储存能量的形式不同分类外(依此可将储能分为机械式、电化学式、电能式、热能式和化学式等 5 大类),还常按照储能装置或系统以额定功率来输出所存储能量的持续时间尺度长短来分类为:短持续时间储能(Short Duration Energy Storage, SDES)和长持续时间储能(Long Duration Energy Storage, LDES)。值得说明的是,国内常将短持续时间储能和长持续时间储能分别称为“短时储能”或“长时储能”。实际上,这是一种不规范的称谓,如就“长时”而言,是指“长响应时间”?还是指“长周期时间”?“长时间尺度”?可见,“长时储能”术语界定不清,其概念内涵和外延模糊,极易与储能装置或系统对释能请求的响应时间长短等概念混淆。例如,按照对释能请求的响应时间快慢,也将储能装置或系统分为短时响应储能装置或系统(如超级电容器、超导磁储能装置、飞轮、电化学电池等)、长时响应储能装置或系统(如抽水蓄能、压缩空气储能等)2 个类别。因此,从科学严谨、规范用语角度而言,不宜采用“长时储能”,而宜采用“长持续时间储能”的称谓。

时间尺度长短是相对的,短持续时间储能和长持续时间储能的时间界限,当前国际上尚无统一标准。欧洲一些学者及机构将小时级以上界定为长持

续时间储能^[13],国际 LDES(长持续时间储能)委员会将 6~8 h—150 h 界定为 LDES^[14],美国加利福尼亚公共事业委员会(CPUC)要求为 8 h 及以上^[15],美国能源部则要求 10 h 及以上^[16],还有的机构要求一天及以上水平(24~72 h)、周水平(100 h)甚至季节水平。以美国能源部为例,美国能源部在其“Long Duration Storage Shot”(长持续时间储能攻关行动中),将长持续时间储能(LDES)定义为一次可以储存能量(可持续以满功率释放能量)超过 10 h 的储能系统^[17]。如图 5 所示,释能持续时长 0~10 h 的称为“短持续时间储能”(如飞轮储能),10 h 以上的统称为“长持续时间储能”,且长持续时间储能还可细分类为 10~36 h 的为“日间长持续时间储能”(有时也称为“日内长持续时间储能”,如传统抽蓄、新型抽蓄、重力储能、压缩空气储能、液态空气储能、液态二氧化碳储能等机械式储能技术)、36~160 h 的为“多日/周持续时间储能”(如显热、潜热、热化学储热技术,液流电池、金属阳极电池、混合液流电池等电化学储能技术等)、超过 160 h 的称为“季节性时移储能”(如储氢、热化学储热)等。有的也将“多日/周持续时间储能”和“季节性时移储能”统称为“季节性储能”^[18]。

长持续时间储能的时间尺度不统一,会给科研、工程、市场、政策等带来不利影响。参考国际主要经济体和机构的做法,“长持续时间储能”可界定为能满足下列 3 个方面要求的任何储能技术:

- 1) 可有竞争力地进行部署,用以长期储能。
- 2) 可经济地扩大规模,用以维持 8~10 h 以上的能源供应。
- 3) 有显著促进经济体去碳化的潜力。

3 长持续时间储能技术体系

按照前述长持续时间储能(LDES)的定义,长持续时间储能技术包含技术经济性、储能时长、去碳潜力三要素。依此三要素尺度衡量,飞轮储能技术、超级电容储能技术、锂离子电池储能技术、铅酸电池储能技术等,则排除在长持续时间储能技术范畴之外。

长持续时间储能技术类别详见表 1,包括机械储能类、热能储能类、电化学储能类、化学储能类 4 个类别^[2]。

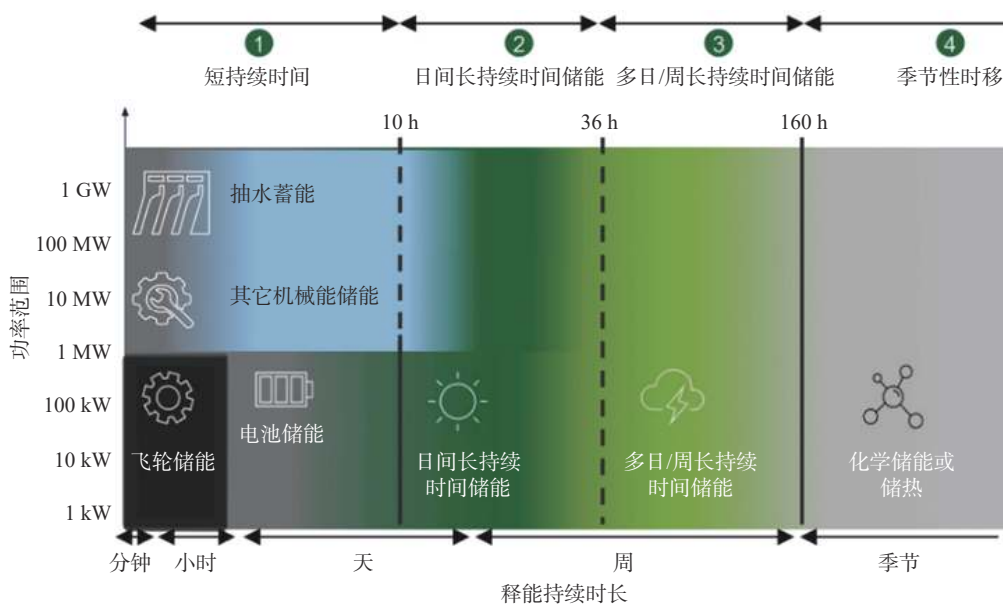


图 5 不同时间尺度储能示例

Fig. 5 Examples of Energy storages at a variety of duration scales

(来源:DOE)

表 1 各类长持续时间储能技术主要参数及市场成熟度

Tab. 1 Main parameters and market maturity of various long-duration energy storage technologies

储能类型	技术类别	市场成熟度	最大部署容量/MW	最大额定持续时间/h	平均充放效率/%
机械式LDES	新型抽水蓄能	商业化	10 ~ 100	0 ~ 15	50 ~ 80
	基于重力式储能	试验示范	20 ~ 1000	0 ~ 15	70 ~ 90
	压缩空气式储能(CAES)	商业化	200 ~ 500	6 ~ 24	40 ~ 70
	液态空气式储能(LAES)	初期商业化	50 ~ 100	10 ~ 25	40 ~ 70
	液态二氧化碳式储能	试验示范	10 ~ 500	4 ~ 24	70 ~ 80
热式LDES	显热式(如熔融盐、岩石材料、混凝土等)	研发、试验示范、商业化	10 ~ 500	200	55 ~ 90
	潜热式(如铝合金等)	研发、试验示范、商业化	10 ~ 100	25 ~ 100	20 ~ 50
	热化学热式(如沸石、硅胶等)	研发、试验示范	—	—	—
电化学式LDES	液流电池	试验示范/商业化	10 ~ 100	25 ~ 100	50 ~ 90
	金属阳极电池	研发/试验示范	10 ~ 100	50 ~ 200	40 ~ 70
	混合液流电池(液体电解质+金属阳极)	商业化	>100	25 ~ 50	55 ~ 75
	混合阴极电池	商业化	10	3 ~ 12	75
化学式LDES	电-气(如氢气、合成气等)-电	试验示范、商业化	10 ~ 100	500 ~ 1000	40 ~ 70

1) 机械储能类: 指利用机械能的动能或势能改变来储存能量的储能技术。机械储能类 LDES 包括经典抽水蓄能、新型抽水蓄能、重力式储能、压缩空气储能(CAES)、液态空气式储能(LAES)、液态二氧化碳式储能等各类储能技术。

(1) 经典抽水蓄能技术(常简称抽蓄, PSH): 是通过将水从下游水库抽水至上游水库, 以水的重力

势能的形式来储存能量的储能技术。经典 PSH 技术是一种经长期工程实践验证、技术成熟度最高、往返效率较高(70% ~ 80%)、最广泛商业应用、规模化和大型化(达 GW 级)、在役时间长(寿命可达 50 ~ 60 a)的长持续时间储能技术。

(2) 新型抽水蓄能技术: 经典 PSH 存在受地理环境限制、能量密度低、建设周期长、投资成本高等方

面不足。为克服经典 PSH 技术原有的不足,新型抽水蓄能技术应运而生。新型 PSH 具有受地理环境限制小、建设周期短、小型化、模块化等特征。当前,国际上新型抽水蓄能电站技术的发展及应用方向可归纳为混合式抽水蓄能(如与储热耦合)、改造及升级型抽水蓄能(如利用废弃矿井)、新型抽水蓄能(如海水抽蓄)等类别。

(3)重力式储能技术:重力储能是一种利用重物(如重力砖块)高度变化来储能/释能的新兴储能技术。其工作原理是储能时利用来自电网的多余能量来提升重物高度,产生重力势能;释能时通过发电机再将重物的重力势能转化为电能。重力储能技术具有选址灵活、长寿命、储能时间长、充放效率高(70%~90%)等优势,当前主要有山地式、铁轨式、塔吊式、竖井式、电梯式等多种形式的重力储能技术。

(4)压缩空气式储能技术:压缩空气储能(CAES)是一种以压缩空气作为储能介质,储能时利用机械力(空气压缩机)将电能储存于压缩空气中,用能时再通过释放压缩空气来推动涡轮机(膨胀机)发电的机械储能技术。CAES 具有储能容量大、储能时间长、系统寿命长、转动惯量支持、安全性能好、充放效率适中等特点,主要有非绝热压缩空气储能、绝热压缩空气储能、等温压缩空气储能等技术类别。

(5)液态空气式储能技术:液态空气式储能技术(LAES)是一种利用液态空气(或液态氮气)作为储能介质和储能/释能工质的深冷储能技术,有时也被称为低温储能(CES),兼具机械式和热能式特点。储能时,利用低谷电来冷却空气,直到将空气低温液化,并将液态空气储存在储罐或其他密闭空间中;释能时,通过暴露于环境空气或利用工业过程中的废热,来将所存储的液态空气恢复到气态,并使用恢复气态后的高压空气来驱动空气透平机组做功发电。LAES 具有储能密度大、易于维护、不受地理条件限制、充放效率适中等特点。

(6)液态二氧化碳储能技术:液态二氧化碳储能技术是基于压缩空气储能和布雷顿循环、以二氧化碳作为储能介质的一种新型 LDES 机械储能技术,具有储能密度大、运行寿命长、系统设备紧凑、成本低等优势,具有较好的发展和应用前景。

2)热能储能类:指通过加热或冷却储能介质(如水、岩石、熔融盐、氧化铝)来存储热能的储能系

统。热能储能类 LDES 包括显热式、潜热式、热化学式等储能技术。

(1)显热式储热技术:显热式储热(SHS)指储热系统所采用的储热介质的温度随系统中热能的存储/释放而相应升高/降低,且储热介质不发生相变的储热技术。SHS 技术原理简单,应用历史悠久,近几十年来得到了广泛发展,其总体技术成熟度在显热、潜热、热化学 3 类储热技术中最高。

(2)潜热式储热技术:潜热式储热(LHS)指储热系统所采用的储热介质通过介质熔化/凝固、蒸发/冷凝、升华/凝华或在一定恒温条件下产生其它某种状态变化来存储/释放热能的储热技术。LHS 主要是利用相变材料发生相变来蓄积或释放热能,因而有时也称为“相变储热”。LHS 具有相变潜热大、蓄热密度高、储热温度恒定(储热、放热过程近似等温)、化学稳定性和安全性较好等特点,因而有助于保持储热装置几何结构紧凑,实现储热装置的小型化。

(3)热化学式储热技术:热化学式储热技术指储热系统利用储热介质发生可逆的化学吸附或化学反应进行热量的存储/释放的储热技术。热化学储热是一种新兴技术,其发展潜力巨大。与显热和潜热技术相比,热化学储热系统有着更高的储能密度、更长的储能持续时长且储热整个过程几乎无热量损失,并还可调节其温度水平以适应不同储热/放热场景,满足变温储热的要求。

3)电化学式储能类:电化学式储能技术是指以电化学形式储存电能的储能技术。电化学式储能类 LDES 包括液流电池、金属阳极电池、混合液流电池、混合阴极电池等技术类别。液流电池的正极和负极电解液是分别装在两个储罐并用离子交换膜(或离子隔膜)分隔,电池充/放电是通过循环泵使离子从一侧储罐穿过膜转移到另一侧储罐来实现的。与常规电池的基本区别是,常规电池将能量存储在电极材料中,而液流电池则主要将能量存储在电解液中。液流电池有全钒氧化还原液流电池(VRB)、锌-溴(Zn-Br)液流电池、溴-多硫化物液流电池、铁-铬(Fe-Cr)液流电池、锌-氯液流电池等。其中,VRB 是最成熟、最常见的液流电池之一。金属阳极电池等是一种新兴技术,可利用如铝、铁、镁、锌等廉价且丰富的正电金属与空气中的氧气进行电化学作用来发电。正在研发或商业初期应用的有锂-空气、锌-空

气等类型。

4) 化学储能类:指通过如氢、甲烷、合成气(CO+H₂)和氨等化学品的生产,将电能转换为化学能的储能系统。这些生成的化学品随后可以作为燃料等介质来发电。

4 长持续时间储能研发及应用体系

储能是支撑新型能源体系的重要技术和基础装备,是确保能源顺利转型、如期实现碳达峰碳中和目标的关键,也是催生能源新业态、抢占国际战略新高地的重要领域。煤、石油、天然气等是大自然赋予人类的天然“长持续时间储能”介质,人类若没有在长持续时间储能技术方面取得重大突破,则全球碳中和实现难度巨大。

长持续时间储能研发及应用体系包括技术研发体系、制造和供应链体系、工程应用体系、劳动力栽培体系、政策和价值链体系等。当前国内长时间尺度储能近乎全部采用的是抽水蓄能技术(压缩空气储能、液流电池等占比极低),且国内已形成完备的抽水蓄能制造和供应链、工程应用等体系。截至2022年底,中国大陆抽水蓄能总装机容量已达45.790 GW^[19],居全球第一(日本抽水蓄能装机容量达21.814 GW,排名全球第二;美国抽水蓄能装机容量达19.288 GW,排名全球第三)。国内长时间尺度储能研发重点是新型抽水蓄能机组(开发高水头、大容量、高转速、可变速水泵水轮机组)、压缩空气储能机组(力争突破单机300 MW级及以上先进压缩空气储能系统的关键技术)、新一代液流电池、宽液

体温域高温熔盐储热技术等。限于篇幅,以下仅围绕国际研发动态进行简略介绍。

4.1 美国研发动态

在储能研发及应用方面,美国领先优势明显。美国政府在过去4个财政年度(FY17-20)在储能研究方面的投资超过16亿美元,其长持续时间储能研发项目主要性能指标十分严苛(见表2和图6)^[20]。近年的主要行动有:

1) 借鉴当年的登月攻关计划,美国推出了能源地球系列攻关计划。

(1) 2021年6月启动第一个能源地球攻关计划——“氢能攻关”(氢能是钢铁、交通行业减排的重要抓手,也是化学储能的主要载体)。拟用十年时间,将清洁氢成本降低80%^[21]。

(2) 2021年7月启动第二个能源地球攻关计划——“长持续时间储能攻关”。拟在十年内将10 h以上持续时间的电网规模储能成本降低90%^[17]。

2) 为了加速长持续时间储能的商业化,2023年3月美国能源部技术转型办公室、爱迪生电力院能源转型院、EPRI(电力研究院)、国际长持续时间储能委员会等多方签署谅解备忘录,同月还发布“长持续时间储能商业腾飞之路”报告,旨在加速长持续时间储能的商业化进程^[18]。

其主要的代表性研发项目有:Antora能源的基于碳块的固态储热+TPV(热光伏)项目、布雷顿能源的海底压缩空气储能项目、哥伦比亚大学的锌溴液流电池项目、Echogen动力系统的基于二氧化碳热泵的储热项目、Form能源的铁-空气电池项目、密歇

表2 长持续时间储能研发主要技术性能指标要求

Tab. 2 Main technical performance indexes for long-duration energy storage R&D

指标名称	指标要求	说明
额定功率下的释放能量持续时间	10 ~ 100 h	储能持续时间尺度考虑日间、季节等场景所需。
平准化储能成本	5美分/kWh-周期	储能成本包括投资、运营、维护及其它所有成本。按贴现率10%,系统寿命20 a考虑。
购电价格	2.5美分/kWh	—
选址要求	没有地理限制	LDES技术可利用地下储能,但不可依赖于特定地点的特定地质结构。
能量加充和能量释放的能源形式	仅电能进,仅电能出	—
最小储能系统规模	100 kW	基于电能输出峰值。
工作循环	分为日循环和非日循环两个类别,具体要求见图6	—

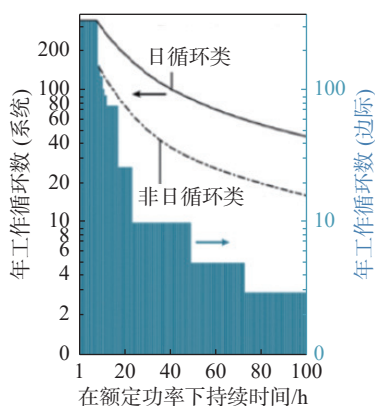


图 6 工作循环指标要求

Fig. 6 Duty cycle requirements

根州立大学的 Mg-Mn-O 热化学储能项目、NREL 的固体颗粒储热+布雷顿联合循环项目、Quidnet 能源的地质力抽蓄项目、Redoxblox 的可变规模热化学储能项目、雷神技术的基于硫锰无机反应材料的高性能液流电池项目、田纳西大学的电解装置/可逆燃料电池项目等。

4.2 英国研发动态

英国政府 2021 年 3 月发布“净零创新一揽子计划”，旨在为低碳技术提供全方位支持。该计划中“储能及灵活性”是其重要内容^[22]。当前所开展的长持续时间储能示范竞赛主要项目类别有：

1) P2X 储能：包括 20 MW 无膜电解装置绿氢项目、金属氢化物储氢项目、降低电解装置铂族金属项目、碳 280 Hydrilyte 储氢项目等。

2) 储电：Gravitricity 重力储能项目、增压海水和压缩空气储能项目、40 MWh 钒液流电池项目、Hydrostor 先进压缩空气储能项目、Cheesecake 能源的储热及压缩空气储能项目、锂硫液流电池项目、锌金属储能项目、有机液流电池项目、铜-锌电池项目、海水抽蓄项目等。

3) 储热：热量电池项目、36 MWh 超高温储能项目、长持续时间储热及其智能控制系统项目、复合相变材料潜热储热项目、Q-zeta 储热项目、Sunamp 热量电池项目等。

4.3 欧盟研发动态

欧盟知名的储能研究机构有欧洲能源研究联盟 (EERA)、德国弗劳恩霍夫协会、德国航空航天研究中心等，其在潜热储热、热化学储热、跨季节低温储热领域有长期布局。2017 年 10 月 EERA 和欧洲储

能协会 (EASE) 联合发布了《欧洲储能技术发展路线图》(2017 更新版)^[23]，提出未来 10 年欧洲储能技术主要围绕化学储能、电化学储能、电储能、机械储能、储热等方面进行研发及应用。2022 年 2 月，AEPIBAL、AKU-BAT CZ、ECOS、EnergyIN、流量电池欧洲等 11 家机构联名发布致欧盟理事会、欧洲议会及有关欧洲专员的公开信^[24]，考虑到从现在至 2030 年是全球碳中和竞赛的关键期，欧洲长持续时间储能现处于发展的初期阶段，需要更强有力的政策支持和投资，要求在欧洲绿色新政中为长持续时间储能考虑更多的措施，涉及研发、资金、项目、税收、电力系统服务、合约时长等多个方面。

5 结语

实现“双碳”目标，能源须从以化石燃料为主的传统能源体系向以无碳排放的新能源（如风、光）为主体的新型能源体系转型。由于风光等新能源无法如化石燃料般灵活满足用能需求，故新型能源体系需要一种新的方式来满足能源供给灵活性和可靠性的需求。长持续时间储能 (LDES) 将是在未来去碳电力系统中提供这种灵活性和可靠性的关键。

储能，特别是长持续时间储能，作为战略性新兴产业，美英等发达经济体已在政策、研发、制造、市场、应用、教育等多维度全面布局。长持续时间储能，对于清洁能源高效利用，推进能源、工业、建筑、交通等各领域清洁低碳转型、应对极端天气、解决绿色-经济-可靠性能源不可能三角难题起着至关重要的作用，是端牢能源饭碗、保障能源安全、推动能源绿色低碳转型，建设新型电力系统和新型能源体系，构建能源强国的利器 and 重要抓手。为此，我国也应尽早在长持续时间储能方面出台战略规划，在分析各种长持续时间储能技术路线的现状、资源、需求、前景等基础上，制订相应的近期、中期、远期发展目标和实施路线图，在政策、市场、研发、工业体系、投融资、教育培训等多方面全面布局，持续按照我国已形成的重大技术研发、重大装备研制、重大示范工程、科技创新平台“四位一体”能源科技创新体系，按照集中攻关一批、示范试验一批、应用推广一批“三个一批”路径，推动我国长持续时间储能产业取得重要进展，以在大国竞争的战略必争领域——长持续时间储能的科技及应用方面处于领先地位，从而确保“双碳”战略目标的如期必成。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.关于加快推动新型储能发展的指导意见 [EB/OL].(2021-07-23) [2023-09-05].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gxwj/202107/t20210723_1291321.html. National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Guiding opinions on accelerating the development of new energy storage [EB/OL]. (2021-07-23) [2023-09-05]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gxwj/202107/t20210723_1291321.html.
- [2] 杜忠明,张晋宾,等.电力系统新型储能技术 [M].北京:中国电力出版社,2023.
DU Z M, ZHANG J B, et al. New energy storage technology for power systems [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [3] 新华社.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 [EB/OL].(2020-09-22) [2023-09-05].https://www.xuexi.cn/lpage/detail/index.html?id=17443756313685536978&item_id=17443756313685536978. The Xinhua News Agency. Speech at the General Debate of the 75th United Nations General Assembly [EB/OL]. (2020-09-22) [2023-09-05]. https://www.xuexi.cn/lpage/detail/index.html?id=17443756313685536978&item_id=17443756313685536978.
- [4] Wikipedia. Energy transition [EB/OL]. (2023-08-31) [2023-09-06]. https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_transition.
- [5] IRENA. Energy transition outlook [EB/OL]. [2023-09-06]. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>.
- [6] IEA. Net zero by 2050 - a roadmap for the global energy sector [R]. Paris: IEA, 2021.
- [7] 张晋宾.双碳战略下的能源转型与数字化转型 [J].自动化博览, 2022, 39(11): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0492.2022.11.023.
ZHANG J B. Energy transition and digital transformation under the carbon peaking & neutrality strategy [J]. Automation panorama, 2022, 39(11): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0492.2022.11.023.
- [8] 北极星太阳能光伏网.中国工程院院士、原副院长杜祥琬:能源的走势与“双碳”目标 [EB/OL].(2022-11-21) [2023-09-11].<https://guangfu.bjx.com.cn/news/20221121/1270503.shtml>. GUAGNFU.BJX.COM.CN. The trend of energy and the carbon peak and neutrality goal [EB/OL]. (2022-11-21) [2023-09-11]. <https://guangfu.bjx.com.cn/news/20221121/1270503.shtml>.
- [9] 舒印彪,赵勇,赵良,等.“双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径 [J].中国电机工程学报,2023,43(5): 1663-1671. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221407.
SHU Y B, ZHAO Y, ZHAO L, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221407.
- [10] IEA. Status of power system transformation 2019 [R]. Paris: IEA, 2019.
- [11] Siemens energy. Why storage is the Swiss Army knife of energy transition [EB/OL]. (2022-06-29) [2023-09-11]. <https://www.powerengineeringint.com/energy-storage/why-storage-is-the-swiss-army-knife-of-energy-transition/>.
- [12] IEA. ETP clean energy ztechnology guide. Paris: IEA, 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide>.
- [13] FAIAS S, SANTOS P, Sousa J, et al. An overview on short and long-term response energy storage devices for power systems applications [J]. Renewable energy and power quality journal, 2008, 1(6): 442-447. DOI: 10.24084/repqj06.327.
- [14] LDES Council. Net-zero power: long duration energy storage for arenewablegrid [R/OL].(2021-11-22) [2023-09-23].<https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/net-zero-power-long-duration-energy-storage-for-a-renewable-grid>.
- [15] The Public Utilities Commission of the State of California. Decision requiring procurement to address mid-term reliability (2023-2026) [R/OL]. (2021-06-30) [2023-09-18]. <https://docs.cpuc.ca.gov/PublishedDocs/Published/G000/M389/K603/389603637.PDF>.
- [16] DOE. Long-duration energy storage demonstrations [EB/OL]. [2023-09-19]. <https://www.energy.gov/oced/long-duration-energy-storage-demonstrations>.
- [17] DOE. Long-duration energy storage shot [EB/OL]. [2023-09-18]. <https://www.energy.gov/eere/long-duration-storage-shot>.
- [18] DOE. Pathways to commercial liftoff: long duration energy storage [R]. Washington DC: DOE, 2023.
- [19] 水电水利规划设计总院.中国可再生能源发展报告 2022 [M].北京:中国水利水电出版社,2023.
China Renewable Energy Engineering Institute. China renewable energy development report 2022 [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2023.
- [20] DOE. Duration addition to electricity storage overview [R]. Washington DC: DOE, 2018.
- [21] DOE. Hydrogen Shot [EB/OL]. [2023-09-18]. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>.
- [22] UK government. Net Zero innovation portfolio [EB/OL]. (2021-03-03) [2023-09-19]. <https://www.gov.uk/government/collections/net-zero-innovation-portfolio>.
- [23] EASE, EERA. European energy storage technology development roadmap-2017 update [R]. Brussels: EASE-EERA, 2017.
- [24] EASE. A-call-for-more-energy-storage-provisions-in-Fit-for-55 [EB/OL]. (2022-02-03) [2023-10-19]. <https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2022/02/A-call-for-more-energy-storage-provisions-in-Fit-for-55-03.02.2022.pdf>.

作者简介:



郑彦春

郑彦春(第一作者,通信作者)

1976-,男,高级工程师,武汉大学地理信息系统专业硕士,主要从事电力工程、新型能源等研究工作(e-mail)yczheng@eppei.com。

陕超伦

1986-,男,助理工程师,主要从事电厂运行、检修及维护工作(e-mail)94590942@qq.com。

张晋宾

1967-,男,副总工程师/教授级高级工程师,主要从事能源科技创新及智库战略研究与管理(e-mail)jbzhang@eppei.com。

(编辑 叶筠英)