

能源互联网

固体电蓄热技术的研究现状与展望

马美秀¹, 章康², 陈梦东¹, 康伟¹, 陈思艺², 姚文卓¹, 韩高岩²

(1. 北京智慧能源研究院, 北京 102200;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014)

摘要: 固体电蓄热技术是储热技术的重要组成部分, 其将低谷电能、风电、光伏等波动性电能转化为热能, 具有环保、高效、节能、安全等优势, 在区域采暖改造、电网深度调峰和工业生产用热等领域具有广阔的发展前景。为此, 介绍固体电蓄热技术的原理, 总结固体蓄热材料、装置结构的研究现状与进展, 指出固体电蓄热技术瓶颈问题与关键技术发展方向。在此基础上, 梳理固体电蓄热技术在国内外不同领域的应用现状并进行经济性分析, 为推动固体电蓄热技术的进一步发展提供思路。

关键词: 固体电蓄热; 蓄热材料; 装置; 应用

DOI: 10.19585/j.zjdl.202310004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research status and prospects of solid electric heat storage technology

MA Meixiu¹, ZHANG Kang², CHEN Mengdong¹, KANG Wei¹, CHEN Siyi², YAO Wenzhuo¹, HAN Gaoyan²

(1. Beijing Institute of Smart Energy, Beijing 102200, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: As a key component of energy storage technology, solid electric heat storage technology is adopted to convert valley electricity and various fluctuating electricity energy such as wind power and solar power into heat. The technology excels in environmental protection, efficiency, energy saving and safety and exhibits great potentials in regional heating renovation, deep peak regulating of the power grid and heat supply for industrial production. To this end, the principle of solid electric heat storage technology is introduced, and the research status and progress of solid heat storage materials and device structure are summarized. Moreover, bottleneck and key direction of the development of solid electric heat storage technology is discussed. Finally, the application status of the technology in different fields at home and abroad is sorted out and analyzed economically to provide ideas for promoting the development of the technology.

Keywords: solid electric heat storage; heat storage material; device; application

0 引言

近年来随着新能源的开发利用规模不断扩大, 电化学储能、储热等^[1-2]储能技术在电力系统调峰中占有越发显著的地位。其中, 储热技术是以储热材料为媒介将太阳能光热、地热、工业余热、低品位废热等热能存储, 按需释放, 力图解决时间、空间或强度上的热能供给与需求不匹配所带

来的问题, 最大限度地提高整个系统的能源利用率。据IRENA(国际可再生能源署)《创新展望: 热能存储》报告显示, 到2030年, 储热装机的容量大概将增长到800 GWh以上, 中国的储热装机规模目前已达到1.5 GWh。中国2020年9月宣布力争2030年实现“碳达峰”, 2060年实现“碳中和”。在“双碳”目标下, 储热技术有望在清洁供热、火电调峰、清洁能源消纳等方面迎来较大的发展空间和机遇。

在众多的储热技术中, 固体电蓄热技术将电网的低谷电能、风/光等波动性电能转化成热能储

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS20007N)

存,在用电高峰时段按需实现供暖、供汽或供水等,是一种先进、高效的储热技术,对提高电网灵活性具有重要意义^[3]。目前固体电蓄热技术在国内外都得到了应用,但针对电网的固体电蓄热技术还处在发展阶段,仍需要针对电网接入运行工况下的特点,提高装置及系统的适应性,促进其产业化、规模化应用。

本文围绕固体电蓄热技术,从工作原理、蓄热材料、装置结构、数值模拟等方面梳理其技术发展现状和趋势,并结合固体电蓄热技术的特点,分析典型行业固体电蓄热技术的应用现状,指出固体电蓄热技术关键环节及其发展方向,以推动固体电蓄热技术在工业及民用领域的广泛应用,助力各领域绿色低碳转型,加快我国“双碳”战略目标推进步伐。

1 固体电蓄热系统

1.1 固体电蓄热工作原理

典型的固体电蓄热系统如图1所示,主体结构包括电热单元、蓄热体、绝热层(保温层)、换热单元^[4]。

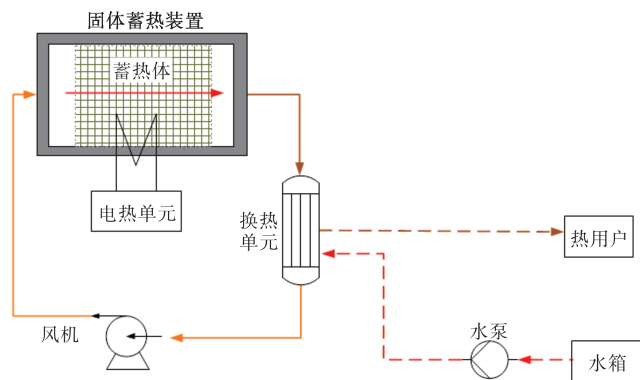


图1 固体电蓄热系统工作原理

Fig.1 Working principle of solid electric heat storage system

在低谷用电时段,电热单元接入电网将电能转换为热能,储存于绝热层包裹的蓄热体结构中,所储存的热能通过换热单元,与空气、水等工质进行热交换,最终以热风、热水、蒸汽等形式向终端用户提供热量。由于以电流焦耳热方式产热,固体电蓄热装置的电能-热能转换效率极高,产热阶段能量损失可以忽略,主要能量损失集中在储热及换热阶段,一般为5%~10%^[5],其能量效率

η 计算公式为:

$$\eta = \frac{Q}{Q_u} = 1 - \frac{Q_s + Q_e}{Q_u} \quad (1)$$

式中: Q_u 为电流产生的总焦耳热,即输入电量; Q 为向终端用户输送的热量; Q_s 为储热过程的热损失; Q_e 为换热器热损失。

1.2 固体电蓄热技术的研究现状

当前,固体电蓄热技术主要围绕蓄热材料、蓄热体结构、换热结构、蓄热-放热过程的流动传热特性等方面开展研究。对于蓄热材料,在工程应用中主要考虑其热物性参数、稳定性、成本等因素。为进一步提高蓄热-放热性能,国内外研究者对蓄热单元及换热器结构进行了多样化的尝试与研究。蓄热体结构及换热器内的传热流动特性对于系统性能至关重要,但由于难以获得实际系统运行工况中的局部参数,目前仍以数值模拟研究为主。为深入了解电蓄热系统在运行中的实际物理过程,应当大力发展原位检测实验技术(如非接触式光学测量技术、微机电系统嵌入式微型传感器等)以获得关键局部参数,基于全场物理建模,对系统运行进行精确预测,并进一步提出优化思路与方法。

1.2.1 固体蓄热材料研究现状

常见的蓄热材料包括显热蓄热材料、相变蓄热材料、化学蓄热材料和物理吸附蓄热材料等。在固体电蓄热技术中,应用最为广泛的是固体显热蓄热材料,即采用固体蓄热介质,该介质在蓄热过程中本身不发生相变反应,通过蓄热介质材料的温度变化进行热量储存和释放。固体蓄热材料的蓄热量 Q 计算公式为:

$$Q = mC_p(T_2 - T_1) \quad (2)$$

式中: m 为蓄热材料的质量; C_p 为蓄热介质的比热容; T_2 和 T_1 分别为换热过程中蓄热材料释热初始温度和释热后的温度。工程上常用的固体蓄热介质材料包括混凝土、陶瓷、铸铁等,其主要热物性参数对比如表1所示^[4,6]。

混凝土材料热容、工作温度等指标均较低,但价格便宜,装置构造简单,易于推广应用。金属类材料(如铸铁)密度大但比热容较低,在与电热元件进行封装时绝缘性能要求较高。砖、陶瓷、砾石等多孔非金属材料的工作温度上限较高,其密度小于金属材料,但容易构建蓄热体结构,缺

点是导热系数较差, 而以镁砖为代表的烧结多孔材料能够弥补其导热性差的问题, 同时还具有比热容和体积热容大的优势, 因此在商业上被广泛使用。

与一般工业蓄热场景相比, 电网输出具有功率高、蓄热体量大的特点。针对电网特有的运行工况, 亟需研发适用于电网蓄热的蓄热材料, 提高蓄热能量密度、提升蓄热/放热效率是蓄热材料发展的长期方向。随着新能源电力急剧增加, 储能系统配套势在必行, 但电网运行过程中的大幅波动与时变性问题, 将导致大功率蓄热装置频繁启停, 从而引起储热过程储热材料温差大、升降温频率高等问题, 因此储热材料的稳定性研究也是亟待解决的问题之一^[7-8]。

1.2.2 固体蓄热装置结构研究现状

固体蓄热装置的性能直接决定蓄热系统的能效, 国内外研究者围绕不同的蓄热体及其布置结构、数量, 以及换热器通道形式等开展了一系列研究, 力求提高装置的蓄热-放热效率。

Laing D 等^[9-10]以混凝土为介质, 构建了固体电蓄热装置并开展实验研究, 通过结构优化减少了换热管数量, 从而提升换热性能。李伟峰^[11]针对高温高压固体电蓄热装置进行电磁场绝缘特性研究, 总结出了新的电热单元排布方案。邢作霞等^[12]以镁砖作为蓄热材料构建固体蓄热器, 对其放热性能进行研究, 基于参数化分析, 结合流-固耦合传热分析与实验研究, 提出了单通道和双通道蓄热结构的优化方法。梁炬祥^[13]从蓄热材料的热物理性能出发, 研究了影响蓄热材料比热容、导热性能的因素, 并实验研究蓄热体单元在蓄热过程中的传热特性, 分析不同形状的加热元件(如矩形、圆形加热板、加热管等)对蓄热体蓄热/放

热性能的影响。胡思科等^[14-15]以氧化镁砖作为蓄热材料, 研究蓄热孔尺寸、数量、结构对蓄热体蓄热/放热性能的影响。丁玉龙等^[16]设计了一种集产热、储热、供热于一体的复合相变材料蓄热式电热供暖系统, 利用缠绕方形翅片的换热盘管提高盘管与相变储热材料之间的换热效率。童敏等^[17]设计了一种相变储热峰谷供暖系统, 利用电加热管在谷电时为相变储热装置储热, 在峰电时为用户端供暖。

总的来说, 固体蓄热装置的性能主要受限于蓄热材料的填充度、蓄热体与换热器的布置结构、换热管件的形式及数量等因素。目前的实验研究多集中在材料的选取与装置构型的优化, 以宏观的蓄放热量、系统效率等参数为评价指标。事实上, 蓄热体结构与换热器内的传热流动过程对于装置性能研究同样至关重要。然而现有的实验技术难以获得蓄热体内及换热管道内的温度、压力、流场等分布信息, 从而限制了对其传热流动机理的深入认识。针对这些问题, 国内外研究者采用数值模拟的方式进行了大量研究, 以获取实验方法难以直接观测到的局部参数信息, 建立蓄热装置与系统的物理模型, 对不同工况下的性能进行预测并提出优化方案。

苏俊林等^[18]基于数值模拟, 对固体蓄热器的蓄热体温度场和传热特性开展研究, 并结合实验数据验证了模拟结果的有效性。徐德玺^[19]利用有限元分析软件对固体蓄热器的蓄放热阶段进行模拟分析, 并通过改善蓄热体结构的改善, 提高系统的蓄放热效率。邢作霞等^[20]通过建立传热速率平衡方程, 利用数值模拟的方法分析电储热系统各设计参数与传热匹配的交互特性; 结果表明, 储热单元温度与加热功率线性正相关, 与孔占比和

表 1 工程常用固体蓄热介质材料热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters of solid heat storage materials commonly used in engineering

| 蓄热介质材料 | 温度范围/°C | 密度/(kg·m ⁻³) | 导热系数/[W·(m·K) ⁻¹] | 比热容/[kJ·(kg·K) ⁻¹] | 体积热容/(kWh·m ⁻³) |
|--------|-----------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 混凝土 | 200~400 | 2 200 | 1.28 | 0.85 | 100 |
| 铸铁 | 200~400 | 7 200 | 48 | 0.57 | 226 |
| 铸钢 | 200~700 | 1 820 | 1.50 | 1.00 | 253 |
| 硅砖 | 200~700 | 1 820 | 1.50 | 1.00 | 253 |
| 镁砖 | 200~1 200 | 3 000 | 5.00 | 1.15 | 958 |
| 陶瓷 | 200~1 100 | 2 400 | 1.20 | 0.85 | 510 |
| 砾石 | 200~1 000 | 1 600 | 0.70 | 0.50 | 178 |

循环风速指数型负相关,降低加热功率、提高孔占比和循环风速能改善储热体均热性,通过多参数协同优化设计和前馈补偿控制,可以实现较好的传热匹配效果。蒋招武等^[21]建立相变储能高温换热器的相变过程数学模型,通过显热容法简化相变过程,采用MATLAB对相变过程进行求解,获得了相变材料及介质空气的温度变化规律,为实验研究相变储能换热器的性能提供了理论基础。徐桂芝等^[22]通过研究储热单元的换热特性,基于FLUENT软件,结合装置的设计参数和相变复合材料的物性参数,对相变储热系统储/放热过程中内部的温度分布、传热速率和储/放热效率进行了数学建模及模拟分析,重点研究了不同传热流体速度对单元储/放热性能的影响规律。马美秀等^[23]采用商业软件ICEPAK建立高温相变蓄热电暖器的数学模型,对电暖器的加热过程进行数值模拟研究,得到电暖器稳态时的温度分布图、非稳态储热过程温度上升曲线图,研究了高温相变蓄热电暖器的升温速率、储热量、释热速率及用户使用效果。杨岑玉等^[24]提出一种基于流固耦合的蓄热体建模与仿真方法,对流场、温度场耦合的问题进行三维数值模拟,从而得到蓄热体在不同工作时刻的温度场、流场分布,通过数值模拟结果与实验数据的对比,验证流固耦合建模与分析方法的正确性。

对于固体电蓄热装置,新结构的研发与性能优化,以及能质传输机理的深入认知都是目前研究的热点及关键。相关研究不仅涉及到传统机械、能源动力学科,同时也高度依赖新型材料、新型探测技术的发展,多学科交叉互补将是固体蓄热技术发展的重要方向。高效的原位检测技术能够获得蓄热装置及材料内部的关键局部运行参数,对于深入探究能质传输机理至关重要。以新型传感技术为例,近年来MEMS(微机电系统)迅速发展,基于MEMS技术的微型传感器具有体积小、可嵌入度高、集成度高等优势,可获取蓄热装置内局部温度、压力、流速等关键参数^[25]。此外,将实际装置与在线获取的关键参数进行一体化建模,是系统仿真的发展趋势,其代表技术之一——数字孪生技术近年来崭露头角,受到了国内外学者与业界的普遍关注^[26]。数字孪生技术通过

将现实空间中的物理实体精确映射到数字虚体,可以对系统性能与运行进行精确预测,对于性能优化与运行管理具有重要意义。先进原位探测与系统建模技术将成为固体电蓄热的相关机理及应用、装置开发、系统集成等方面深入研究的重要方法。

2 国内外典型行业固体电蓄热应用与经济性

深入的经济性评价和完善的商业运营模式对于固体电蓄热相关技术和产业的长期健康发展至关重要。事实上由于固体电蓄热技术所具备的能效高、体积小、储热量大和负荷调整灵活等优势,目前在国内外均有不少典型的应用案例,包括太阳能与风电储热、纺织制造业储热以及电蓄热供热等领域。

2.1 国内典型行业固体电蓄热应用与经济性

2.1.1 可再生能源电储热领域

太阳能与风电作为可再生能源的代表,是解决当前能源危机和环境污染的理想能源,但是都表现出不稳定性,需要利用储能装置与之匹配,使其在能源富裕时储存能量,在能源不足时释放能量。

高嵩等^[27]依托某100 MW熔融盐塔式太阳能热发电站的实际工程参数,模拟分析了采用不同储热时长对熔融盐塔式太阳能热发电站初投资成本、内部收益率和平准化度电成本的影响,研究指出:太阳倍数为2.6的前提下,最优储热时长12 h时,该熔融盐塔式太阳能热发电站具有合理的初始投资成本、较高的内部收益率和平准化度电成本。围绕风电领域弃风弃电问题,葛维春等^[28]研究了电储热消纳弃风电量以及同等热量下燃煤锅炉的节煤效果,以某地区电网运行管理部门实际弃风数据为例,对于500 MW风电场、40万m²供暖面积的供暖示范工程项目,研究发现通过使用60 MW的电储热锅炉对弃风进行消纳,可获得1 680万元的年均收益,节煤量超过2 000 t。张诗钜等^[29]研究弃风电量与储热容量的匹配关系,基于某省级电网连续5年实际运行案例进行分析,指出按照年弃风电量和总需求的百分比配置储热装置的容量,比按照最大弃风功率和最大日弃风

电量配置储热容量, 更能高效利用储热装置且更具有经济性。

固体储热技术在可再生能源领域具有广阔的应用前景。对于可再生能源, 相应的固体储热技术应当充分考虑其时变性强、波动幅度大等特点, 提高系统响应性以及波动工况下的稳定性。另一方面, 应当充分考虑光伏、光热、风电场等发电位置的地理因素, 根据不同的温度、海拔、湿度等环境因素, 因地制宜地设定固体蓄热装置各模块的参数, 提升其灵活性与适应性。

2.1.2 传统工业储热领域

在传统工业领域, 高能耗用能工艺中的 70% 热能由化石燃料提供, 而随着“双碳”方案落实, 工业领域高效、绿色、低碳转型成为重中之重。同时, 随着各领域用能方式的改变, 近年来夏季用电高峰出现严重赤字。以四川省为例, 2022 年夏季四川省出现大面积缺电现象, 根据国家电网测算, 用电缺口达 10 GW。因此, 固体蓄热技术在高能耗传统工业中的推广应用迫在眉睫。

以典型制造业领域——针织业为例, 袁黎等^[30]分析了电蓄热锅炉技术在针织行业的应用及经济效益。基于某针织厂项目 2020 年 9 月—2021 年 1 月共 5 个月的电锅炉运行状况, 分析发现纺织厂 5 个月消耗总电量为 482 722 kWh, 其中低谷用电量接近 90%。按照江苏电价, 1~10 kV 大工业用电高峰时段、平时段和低谷时段电价分别为 1.034 7 元/kWh、0.606 8 元/kWh 和 0.258 9 元/kWh 计算, 电力蓄能技术的效益明显。通过采用夜间储存谷电、白天释放储存热能的方法, 可节约 51.2% 的成本。与传统直热式电锅炉生产蒸汽方式和热力管网供汽相比, 电蓄热技术可降低成本 34% 和 10% 以上, 经济效益显著。

对于规模化产业节能, 固体电蓄热技术的成本是首要考虑因素, 应最大限度提高装机容量与电网端峰谷功率的匹配度和相容度。现阶段固体储热技术组件的加工与安装成本在总成本中占比较高, 但存在规模化效应, 即随着储热容量不断增大, 单位成本显著下降。与初期投资成本相比, 储热技术的运维成本相对较低, 这有利于储热技术在传统工业中的应用。另一方面, 在传统电力系统中引入灵活的交易模式, 可形成推动固体储

热装置在工业领域发展的一大助力。根据储热的相关政策、分时电价机制、电力市场机制、电网业务监管机制和应用场景等, 目前可将固体蓄热商业模式划分为两大类, 分别为输配电成本监管模式和竞争性业务模式。

在输配电成本监管模式方面, 目前研究报道较少。周贺璇等^[31]以输配电成本监管为切入点, 基于国内外文献分析, 探讨了输配电成本监管的必要性和特殊性, 结合国外输配电成本监管体系的实践经验, 提出完善我国输配电成本监管体系的建议。王晓芸等^[32]考虑到电网经营企业成本监管与核算成本归集口径不一致导致信息反馈结果不同的情况, 从监管和核算制度两个层面的现状和差异着手, 对两者之间的融合进行了相关研究, 旨在满足在当前形势下的改革监管需求和会计制度核算要求。

在竞争性业务方面, 南国良等^[33]针对电网侧储能参与调峰辅助服务市场, 提出了储能参与辅助服务市场的交易模式及出清模型, 以市场化方式进行出清, 并结合我国现行调峰需求进行算例分析, 为电网侧储能在电力系统中的商业化推广应用提供参考。陈晓利等^[34]基于熔盐储热-换热系统, 提出了包含风、光、储一体化的综合智慧能源系统方案, 开发了覆盖电、热、冷、水的分布式能源多联供功能模块, 研究指出系统在分布式电站、工业园区、办公楼宇等多场景应用模式下具备商业推广价值, 为熔盐储热技术在供热制冷领域、热电解耦以及在综合智慧能源系统中的推广应用提供重要理论与技术支撑。整体上看, 目前我国尚未形成关于储热的比较成熟的商业模式, 潜在商业应用具有较大的探索空间。随着未来商业模式的不断发展, 储热市场将迎来巨大的发展机遇。

2.1.3 电蓄热供热领域

在供热领域, 国内固体电蓄热装置多用于居民电采暖供热, 发展相对成熟。苗常海等^[35]针对电采暖应用场景, 采用临界电价法分析典型蓄热式电采暖项目经济性, 基于典型项目中市政采暖费用 27 元/m²、接口费 70 元/m²、利率 6%、项目寿命期 20 年等参数, 分析得出高温固体蓄热电锅炉方案、电锅炉和水蓄热方案、电锅炉和相变蓄

热方案的临界低谷电价分别为0.301 5元/kWh、0.294 2元/kWh、0.244 2元/kWh,考虑到某地实际低谷电价0.280 2元/kWh,高温固体蓄热电锅炉方案具备较好的经济可行性。岳云力等^[36]以张家口某医院电蓄热式清洁供热改造工程为例,按照住院部楼面积约4万m²、谷电8h核算,分析表明固体电蓄热可以大幅节约医院的能源支出,投资回报率更高,维护简单且占地面积更小,计算得到该项目使用固体电蓄热的静态投资回收年限6.7年。

针对固体蓄热装置的经济性,近年来陆续开展了不少参数优化研究。围绕储热装置关键技术参数,赵永亮等^[37]基于固体填料床的泵热储能系统,建立了详细的热力学数学模型和平准化储能成本评价模型,开展不同工质、不同储热介质和不同设备设计参数的热-经济性分析,研究指出当泵热储能系统选取氦气为工质、磁铁矿为储热介质,最大蓄能温度为850 K,装置的做功部件多级效率为92%,填料床孔隙率为40%时,可获得最小的平准化储能成本0.210 8美元/kWh。邢作霞等^[38]提出了电制热固体储热装置的投资费用和运行费用计算方法,分析不同供暖设备初始投资成本及运行成本,研究谷电利用系数对电制热固体储热装置投资运行经济性的影响。研究表明:相比于其他清洁供暖方式,电制热固体储热供暖机组具有较高经济性与性价比;由于地域峰谷电价的差异性,不同地域谷电利用系数不同,如在辽宁地区,当谷电利用系数为0.85时,蓄热装置具有较高性价比。

随着“双碳”目标的推进,构建以新能源为主体的新型电力系统是实现各领域低碳绿色转型的重要手段之一,固体电储热技术是新能源电力与供热的纽带,尤其是小型、独立、孤岛型分布式新能源消纳与供热场景,将成为未来清洁供暖发展的领域。

2.2 国外典型行业固体电蓄热应用与经济性

固体电蓄热在国外也有不少典型的成功应用案例,并实现了较好的经济效益。Bedouani等^[39]对加拿大蒙特利尔地区6所房屋的4种不同存储容量的蓄热单元进行模拟研究,结果表明电蓄热系统的投资回报时间为4~5年。此外,技术经济模

拟结果表明,使用100%或者80%名义规模的电蓄热对投资回报几乎没有影响。Moffet等^[40]使用一年内魁北克典型的家庭用电情况作为输入信息,并考虑定期费率和使用时间费率,评价了使用集中电蓄热系统代替常规电加热系统的经济效益,结果表明使用电蓄热供暖系统每年可节省约15%的电费;此外,研究评估了电蓄热对冬季用电高峰周配电变电站负荷曲线的影响,基于分时电价控制,电蓄热系统的最大许可占比约为4%。

在整个欧洲,仅2022年欧洲电网规模的储能需求同比增长97%,达到2.8 GW/3.3 GWh,这反映了储能系统作为主流能源技术已经得到规模化应用。例如,瑞典能源公司Vattenfall目前正在建造据称是欧洲最大的电蓄热装置,该设施位于柏林的600 MW路透西燃煤发电站,计划于2023年4月上线启用。

对于接入电网的系统性储能工程而言,实现长期营利是其健康发展的前提。国外大型储能资产在商业模式上率先进行了尝试。以欧洲为例,商业电价收入仍然是欧洲电网规模储能资产的主要收入来源。尽管在英国、德国、法国等国家已经建立了一系列大型储能项目,然而保证其全生命周期内的盈利能力仍然是巨大的挑战。现有的商业模式依赖于不稳定的可再生能源电力和辅助市场电力价格,电力价格波动与储能系统成本造价的提升都是潜在的市场风险。目前,辅助服务仍是电网规模的储能项目的主要应用方向。

3 结语

1)固体电蓄热材料在实际应用中应当充分考虑热物性参数、稳定性、工艺性能及经济性等因素,实现各方面平衡与兼顾,高储热能量密度、高蓄热/放热效率和高稳定性是新型固体蓄热材料的发展趋势。

2)在固体蓄热装置的性能提升方面,已取得理论研究、仿真及宏观试验的显著成果,基于仿真模拟方法获得了其内部的流场、温度场等分布情况,通过测量换热介质参数得到蓄/放热量、系统效率等宏观参数。同时,原位探测技术与仿真技术相结合的微观测试方法,将成为优化蓄热装置结构、提升装置效率的重要方法。

3) 固体电蓄热系统在国内外已有成功运行案例, 在传统工业制造业以及民用领域均存在广阔的市场和发展前景。推动固体电蓄热技术在新能源并网、传统工业节能、民用供暖等方面的应用与普及, 将极大促进我国新能源产业的迅速发展, 助力实现“双碳”战略目标。同时, 借鉴国外储能参与的电力商业模式经验, 探索符合我国能源结构及电力系统特点的新型商业模式, 有利于储能行业的长期健康发展。

参考文献

- [1] 沈汉铭, 俞夏欢. 用户侧分布式电化学储能的经济性分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(5): 50-54.
SHEN Hanming, YU Xiaohuan. Economic analysis of distributed electrochemical energy storage on the user-side [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(5): 50-54.
- [2] 闫百涛, 刘冠杰. 固体储热与燃煤发电系统耦合的数值模拟分析[J]. 工业加热, 2020, 49(5): 29-33.
YAN Baitao, LIU Guanjie. Numerical simulation and analysis of coupling solid heat storage with coal-fired power generation system [J]. Industrial Heating, 2020, 49(5): 29-33.
- [3] 赖业宁, 张政, 薛峰, 等. 电热协同互补提升电网灵活性的评估及仿真[J]. 浙江电力, 2022, 41(3): 34-41.
LAI Yening, ZHANG Zheng, XUE Feng, et al. Evaluation and simulation of grid flexibility improvement by electric-thermal complement [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(3): 34-41.
- [4] 吴娟, 毕月虹, 鲁一涵. 固体电蓄热技术研究现状及展望[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(2): 65-71.
WU Juan, BI Yuehong, LU Yihan. Research status and prospect of solid electric heat storage technology [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(2): 65-71.
- [5] 闫水海. 固体电蓄热系统传热建模与控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
YAN Shuihai. Study on heat transfer modeling and control strategy of solid electric heat storage system [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [6] 徐耀祖. 固体蓄热器蓄放热过程分析与优化研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
XU Yaozu. Analysis and optimization of heat storage and release process of solid heat accumulator [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [7] 凌浩恕, 何京东, 徐玉杰, 等. 清洁供暖储热技术现状与趋势[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 861-868.
LING Haoshu, HE Jingdong, XU Yujie, et al. Status and prospect of thermal energy storage technology for clean heating [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 861-868.
- [8] 刘伟, 李振明, 刘铭扬, 等. 高温相变储热材料制备与应用研究进展[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(2): 398-430.
LIU Wei, LI Zhenming, LIU Mingyang, et al. Research progress in preparation and application of high temperature phase change heat storage materials [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(2): 398-430.
- [9] LAING D, BAHLL C, BAUER T, et al. High-temperature solid-media thermal energy storage for solar thermal power plants [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(2): 516-524.
- [10] 林丽娟, 缪正坤, 缪策, 等. 利用冶炼钢渣配制蓄热混凝土[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(7): 88-90.
LIN Lijuan, MIAO Zhengkun, MIAO Ce, et al. Using smelting slag preparing heat storage concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2014(7): 88-90.
- [11] 李伟锋. 高温高电压固体蓄热装置电磁场绝缘特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
LI Weifeng. Study on electromagnetic field insulation characteristics of high temperature and high voltage solid heat storage device [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [12] 邢作霞, 赵海川, 陈雷, 等. 基于耦合传热的电制热固体蓄热结构优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5999-6007.
XING Zuoxia, ZHAO Haichuan, CHEN Lei, et al. Research on optimal design of electric heating and heat storage structure with coupled heat transfer [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5999-6007.
- [13] 梁炬祥. 固体蓄热传热过程的模拟分析及实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
LIANG Juxiang. Simulation analysis and experimental study on heat transfer process of solid heat storage [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [14] 胡思科, 邢姣娇. 固体蓄热装置的蓄、放热特性数值模拟分析[J]. 流体机械, 2014, 42(8): 78-83.
HU Sike, XING Jiaojiao. Solid heat storage device storage and heat release characteristics of the numerical simulation analysis [J]. Fluid Machinery, 2014, 42(8): 78-83.
- [15] 胡思科, 刘建宇, 邢姣娇. 具有圆、方孔道的固体蓄、放热特性的分析与比较[J]. 流体机械, 2015, 43(9): 73-78.
HU Sike, LIU Jianyu, XING Jiaojiao. Analysis and comparison of characteristics of heat storage and release on the solid with round or square bores [J]. Fluid Machinery, 2015, 43(9): 73-78.
- [16] 丁玉龙, 张叶龙, 赵伟杰, 等. 一种基于复合相变储热的电热供暖系统: CN108980950A [P]. 2018-12-11.
- [17] 童敏, 孙爱东, 张鹏飞, 等. 一种相变储热峰谷供暖系统:

- CN208779535U[P].2019-04-23.
- [18] 苏俊林,张亚仁,胡月红.固体蓄热式电锅炉蓄热模拟及实验[J].热能动力工程,2007,22(6):638-641.
SU Junlin, ZHANG Yaren, HU Yuehong. Heat-storage simulation and experiments of a solid heat-storage type electric boiler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(6): 638-641.
- [19] 徐德玺.固体电蓄热装置的热力学有限元分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2016.
XU Dexi. Thermodynamic finite element analysis of solid electric heat storage device[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.
- [20] 邢作霞,樊金鹏,陈雷,等.固态电制热储热传热匹配特性及热控制方法[J].电工技术学报,2020,35(11):2439-2447.
XING Zuoxia, FAN Jinpeng, CHEN Lei, et al. Heat transfer matching characteristic and heat control method of solid-state electric heating thermal storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(11): 2439-2447.
- [21] 蒋招梧,沈国清,赵钧,等.相变储能高温换热器的数学模型和仿真分析[J].智能电网,2017,5(6):529-535.
JIANG Zhaowu, SHEN Guoqing, ZHAO Jun, et al. Mathematical model and simulation analysis of phase change energy storage high temperature heat exchanger [J]. Smart Grid, 2017, 5(6): 529-535.
- [22] 徐桂芝,胡晓,金翼,等.高温相变储热换热装置仿真建模及分析[J].储能科学与技术,2019,8(2):338-346.
XU Guizhi, HU Xiao, JIN Yi, et al. Simulation modeling and analysis of a high temperature phase change heat storage and exchange device [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(2): 338-346.
- [23] 马美秀,李振东,康伟,等.高温相变蓄热电暖器的数值模拟及验证[J].储能科学与技术,2020,9(1):88-93.
MA Meixiu, LI Zhendong, KANG Wei, et al. Numerical simulation and verification of high temperature phase change thermal storage electric heater [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(1): 88-93.
- [24] 杨岑玉,胡晓,李雅文,等.流固耦合固体相变蓄热建模与分析方法[J].储能科学与技术,2019,8(3):538-543.
YANG Cenyu, HU Xiao, LI Yawen, et al. Modeling and simulation of phase change material based energy storage system using fluid-solid coupling [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(3): 538-543.
- [25] ALGAMILI A S, KHIR M H M, DENNIS J O, et al. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices [J]. Nanoscale Research Letters, 2021, 16(1): 16.
- [26] JONES D, SNIDER C, NASSEHI A, et al. Characterising the digital twin: a systematic literature review [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 29: 36-52.
- [27] 高嵩,任博涵,许继刚,等.100 MW 熔融盐塔式太阳能热发电站的吸热器输出热功率与储热时长的优化研究[J].太阳能,2022(3):42-47.
GAO Song, REN Bohan, XU Jigang, et al. Optimization research on output heat power of heat absorber and heat storage duration of 100 MW molten salt tower CSP station [J]. Solar Energy, 2022(3): 42-47.
- [28] 葛维春,程珊珊,孙鹏,等.电、煤锅炉联合供暖消纳弃风策略及效益分析[J].太阳能学报,2019,40(4):986-994.
GE Weichun, CHENG Shanshan, SUN Peng, et al. Wind power accommodation strategy and benefit analysis of combined heating of electric and coal boilers [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(4): 986-994.
- [29] 张诗钏,楚帅,葛维春,等.大规模弃风与储热协调调控评估方法[J].储能科学与技术,2022,11(1):283-290.
ZHANG Shitan, CHU Shuai, GE Weichun, et al. Evaluation method for the coordinated regulation of large-scale abandoned wind power and heat storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 283-290.
- [30] 袁黎,袁俊球,柴婷逸,等.电蓄热锅炉技术在针织行业应用及经济效益分析[J].电力需求侧管理,2022,24(1):68-72.
YUAN Li, YUAN Junqiu, CHAI Tingyi, et al. Application and economic benefit analysis of electric heat storage boiler technology in knitting industry [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1): 68-72.
- [31] 周贺璇,彭涛.输配电成本监管体系构建的国外经验与借鉴[J].财政监督,2018(12):73-78.
- [32] 王晓芸,刘淑宾,邬良军.输配电成本监管模式下电网企业成本归集的思考[J].电力与能源,2020,41(5):645-646.
WANG Xiaoyun, LIU Shubin, WU Liangjun. Thoughts on cost collection of power grid enterprises under the supervision mode of transmission and distribution cost [J]. Power & Energy, 2020, 41(5): 645-646.
- [33] 南国良,张露江,郭志敏,等.电网侧储能参与调峰辅助服务市场的交易模式设计[J].电气工程学报,2020,15(3):88-96.
NAN Guoliang, ZHANG Lujiang, GUO Zhimin, et al. Design of trading mode for grid-side energy storage participating in peak-shaving assistant service market [J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(3): 88-96.
- [34] 陈晓利,高继录,李博,等.基于熔盐储热的综合智慧能源系统方案研究[J].节能技术,2020,38(3):230-234.
CHEN Xiaoli, GAO Jilu, LI Bo, et al. Research on comprehensive smart energy system scheme based on molten salt

- thermal storage [J]. Energy Conservation Technology, 2020, 38(3): 230-234.
- [35] 苗常海, 白中华, 王雯, 等. 典型蓄热式电采暖项目经济性对比分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6): 36-39.
MIAO Changhai, BAI Zhonghua, WANG Wen, et al. Economic comparison and analysis of typical regenerative electric heating projects [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6): 36-39.
- [36] 岳云力, 訾振宁, 李顺昕, 等. 电蓄热技术在张家口清洁供热领域的适用性研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 112-116.
YUE Yunli, ZI Zhenning, LI Shunxin, et al. The applicability of electric heat storage technology in clean heating in Zhangjiakou region [J]. Electric Power, 2018, 51(8): 112-116.
- [37] 赵永亮, 刘明, 王朝阳, 等. 基于固体填料床的泵热储能系统热-经济性分析[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 1-8.
ZHAO Yongliang, LIU Ming, WANG Chaoyang, et al. Thermo-economic analysis on the pumped thermal energy storage system based on the solid packed beds [J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 1-8.
- [38] 邢作霞, 赵海川, 马士平, 等. 电制热固体储热装置关键参数设计研究和经济性评估[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(6): 1211-1216.
XING Zuoxia, ZHAO Haichuan, MA Shiping, et al. Study on key parameters design and economic evaluation of the electric heating and solid sensible heat thermal storage device [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8(6): 1211-1216.
- [39] BEDOUANI B Y, LABRECQUE B, PARENT M, et al. Central electric thermal storage (ETS) feasibility for residential applications: part 2. Techno-economic study [J]. International Journal of Energy Research, 2001, 25(1): 73-83.
- [40] MOFFET M A, SIROIS F, JOÓS G, et al. Central electric thermal storage (ETS) heating systems: impact on customer and distribution system [C]// PES T&D. May 7-10, 2012, Orlando, FL, USA. IEEE, 2012: 1-7.
-
- 收稿日期:** 2023-01-10; **修回日期:** 2023-02-23
- 作者简介:**
马美秀(1986), 女, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事高温固体储热技术及装置研发方面的研究工作。
章康(1992), 男, 工学博士, 工程师, 主要从事综合能源、储能技术和电能替代等方面的研究工作。(通信作者)
(本文编辑: 张瑞敏)