

储热参与电网调峰的技术及商业模式分析

姚文卓¹, 章康², 陈梦东¹, 马美秀¹, 康伟¹, 陈思艺², 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: 常规热电厂“以热定电”运行模式和新能源发电的随机性及波动性限制了其调峰能力, 通过储热技术参与电网调峰可以优化能源系统的配置能力。分别介绍了显热储热、相变储热和化学能储热 3 种不同储热技术的基本原理、适宜储热材料、优缺点及其未来发展趋势; 综述了国内外不同储热技术参与电力系统调峰的策略和实际调峰项目的应用情况。基于储热技术参与电网调峰面临的特殊工况, 指出了储热技术参与电网调峰需考虑的安全性、性能匹配、可靠性和经济性四类关键性评判指标; 探讨了储热参与电力交易的主要商业模式, 包括合同能源管理模式、两部制电价模式和辅助服务市场模式, 为储热技术参与电网调峰及其规模化商业运营提供了一定的参考。

关键词: 储热技术; 电网调峰; 商业模式; 辅助服务; 电力市场

DOI: 10.19585/j.zjdl.202402012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of heat storage technologies and business model in the peak regulation of power grid

YAO Wenzhuo¹, ZHANG Kang², CHEN Mengdong¹, MA Meixiu¹, KANG Wei¹, CHEN Siyi²,
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: The conventional operation mode of “power determined by heat” employed by thermal power plants, along with the randomness and volatility of new energy power generation, constrains the peak regulation capacity. The incorporation of thermal storage technology into grid peak regulation can optimize the allocation capacity of the energy system. The fundamental principles, appropriate materials, advantages, disadvantages, and future development trends of three different thermal storage technologies, namely, sensible heat storage (SHS), latent heat storage (LHS) and chemical energy storage (CES), are introduced. Furthermore, the strategies of different thermal storage technologies for power system peak regulation at home and abroad as well as the applications of actual peak regulation projects are discussed. Given the special working conditions faced by thermal storage technology in power grid peak regulation, four critical evaluation criteria, including safety, performance matching, reliability and economy that must be considered for thermal storage technology to participate in power grid peak regulation are proposed. The main business models, including energy management contracting (EMC), two-part tariff (TPT), and ancillary service market (ASM) for thermal storage to participate in power trading are explored. These models serve as valuable references for enabling the widespread commercial operation of thermal storage technology within the context of grid peak regulation.

Keywords: thermal storage technology; power grid peak regulation; business model; ancillary service; electricity market

0 引言

新型储能技术是我国早日实现“双碳”目标的重要支撑,发展新型储能技术既是发展新能源产业、完善新能源生态的关键环节,也是深化能源结构改革的必由之路^[1-3]。在众多新型储能技术中,储热技术在电网系统中极具应用潜力,具有削峰填谷、缓解新能源并网波动、调控电能品质等优势,同时由于其响应速度快(可达分钟级,能够实现与大多数发电系统功率和能量的快速转移)、建设成本低,因而得到国内外研究者的广泛关注^[4-9]。储热容量的大小对电网系统的综合效益起着重要作用。对于热电厂,储热容量不足削弱了调峰能力,储热容量过大则造成浪费,因此有必要探究储热容量与电网调峰之间的平衡关系^[10-12]。此外,储热技术参与电网调峰的商业模式也是影响储热技术推进的关键环节,因此本文从储热技术的分类、原理及特点,国内外应用实例,关键性能指标,潜在商业模式等方面进行归纳总结,为储热技术在各领域应用推广及特色工艺的热用户适应性提升提供建议与参考。

1 储热系统参与电力系统调峰典型形式

储热技术是指利用蓄热材料为媒介,将太阳能光热、电制热、工业余热、低品位废热等热能储存起来,在需要的时候直接利用或者转化为电能,最大限度地提高整个系统的能源利用率^[13]。热能储存根据储热原理的不同,主要分为显热储热、相变储热和化学能储热三大类,如图 1 所示。

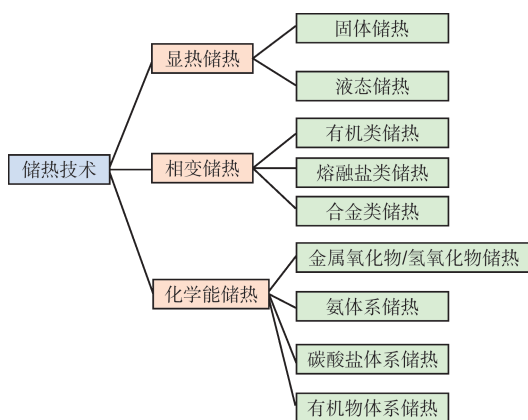


图 1 储热技术分类

Fig.1 Classification of thermal storage technologies

1.1 显热储热技术原理及特点

显热储热技术的热能储存是通过储热材料进行加热,使其温度升高,导致热能增加;而当需要利用显热储热时,储热材料通过降低温度释放储存的能量来实现。在利用显热的过程中,储热材料的物质形态保持不变,自身只发生温度的改变,存储量的大小取决于储热材料的密度和比热容,储热量的计算公式如式(1)所示。

$$Q = C_p m (T_H - T_L) \quad (1)$$

式中: Q 为储热材料的储热量; C_p 为储热材料的恒压比热容; m 为储热材料的质量; T_H 为使用过程中的最高温度; T_L 为使用过程中的最低温度。

显热储热按照材料的物态特性一般分为固态储热和液态储热。固态储热常见储热材料包括岩石、混凝土、陶瓷、铸铁和硅砖等^[14]。液态储热常见材料包括水、熔盐、导热油、液态金属等^[15]。

由于显热储热操作简单,技术成熟,成本较低,是目前储热技术中实际应用最为广泛的一种。但是,显热储热通常储热密度低,使得储热时间短,同时由于放热过程中温度连续变化,导致温度波动范围较大,为了提高储热量,储热系统建设规模庞大,从而限制了其大规模应用前景。现阶段显热储热技术多用于太阳光热发电、小型工业设备余热回收等领域。研发具有高热容、高导热系数、储放热温度稳定的新型显热材料将是显热技术的重点发展方向。

1.2 相变储热技术原理及特点

相变储热技术是利用储热材料在物质的相态发生变化过程中,吸收或释放大量潜热以实现热量储存和释放的技术,也称为潜热储热技术。与显热储热相比,该技术具有储热能量密度高、相变过程温度近乎恒定的优点^[16]。其储热量的计算公式如式(2)所示。

$$Q = C_{ps} m (T_m - T_L) + m \Delta H_m + C_{pl} m (T_H - T_m) \quad (2)$$

式中: Q 为储热材料的储热量; C_{ps} 为储热材料固态的恒压比热容; C_{pl} 为储热材料液态的恒压比热容; m 为储热材料的质量; T_m 为储热材料的相变温度; T_H 为使用过程中的最高温度; T_L 为使用过程中的最低温度; ΔH_m 为储热材料的相变潜热。

从相变方式进行分类,相变储热可分为固—

液、固-固、固-气、液-气等方式。其中固-气、液-气方式虽然相变潜热大,但因为气体膨胀所需体积较大,对系统构建要求较高。在实际应用中,以固-液与固-固方式为主。固-液相变通过相变材料熔化进行储热,通过材料凝固进行放热。固-固相变则利用相变过程中材料分子晶体结构有序-无序之间的可逆转变来进行储热与放热。按照相变材料类型进行划分,可以分为无机熔融盐、合金、有机以及复合等4类^[17]。

一般而言,相变储热材料通常具有以下优点:

1) 优异的热力学特性,具有较高的相变焓值,较大的热导率和合适的相变温度。

2) 良好的物理加工特性,相变前后组分相同且体积变化较小。

3) 稳定的化学特性,无毒,不燃烧和不爆炸。

4) 较高的经济性,来源广泛且价格低廉。

目前,以相变材料为基础的相变储热技术在建筑节能、太阳能热水系统、工业废/余热回收利用和冷链物流及食品干燥等领域得到了具体应用。在相变储热技术实际应用过程中,仍然存在工作温度低、热损失大和泄漏腐蚀问题需要进一步克服。新型高温相变固体储热材料,具有较高储热温度、无泄漏、安全性高、易于集成等优势。然而在大功率、高电压运行工况下,装置单元绝缘问题仍然是实际工程应用中的关键瓶颈。相变储热技术有望向高温、高储热密度储热材料和高压大功率电网消纳的储热装置发展,进而推广至高产量、高品位能源消耗的用户,实现绿色能源替代。

1.3 化学能储热技术原理及特点

化学能储热技术是利用储热材料的可逆热化学反应进行热量储存和释放的技术。在吸热反应阶段,储热材料通过吸收热能来打破自身化学键进行热量储存,同时转化为其它的物质;而在放热反应阶段,储热材料以其它物质形态进行接触反应,在产生储热材料本身的同时,将化学能转化为热能释放。储热量的计算公式如式(3)所示。

$$Q = am\Delta H_r \quad (3)$$

式中: Q 为储热材料的储热量; α 为储热材料的转化系数; m 为储热材料的质量; ΔH_r 为储热材料的反应热。

化学能储热材料按照工作温度,分为中、低温热化学储热材料和高温热化学储热材料。其中,中、低温热化学体系以水合盐的热分解为主,多适用于建筑采暖、结构紧凑的跨季节储热^[18];高温热化学材料可分为金属氢氧化物和氢氧化物体系、有机物体系、氨分解体系和碳酸盐体系等^[19]。

综合而言,相比显热储热和相变储热,化学能储热的能量储存密度最高,可以在环境温度下进行无损或低损储存,且便于热能的长期存储,适用于大规模太阳能及发电厂峰谷负荷调节。然而其反应速率难以控制,储热效率低,寿命较短且成本较高,目前还处于实验室研究开发阶段。随着技术不断发展成熟,化学储热将有望替代现有储热手段,在动力装置、武器装备、大功率电子元器件、航空航天等领域的余热回收与热管理方面极具应用前景。

上述储热形式中,显热储热的技术最成熟,但储热量小且放热时不恒温,限制了其未来应用前景。相变储热具有单位体积储热密度大的优点,且在相变温度范围内具有较大能量的吸收和释放,但其储热介质一般有过冷、相分离和导热系数较小、易老化等缺点。热化学反应储热的储能密度比显热储热和相变储热都高,但应用技术和工艺太复杂,反应条件苛刻,储能体系寿命短、储能材料对设备的腐蚀性大,并且一次性投资大,如能很好地解决这几方面的问题,则其应用前景广阔^[20]。

2 国内外储热技术参与电网调峰现状

2.1 储热参与电网调峰技术特点

储热技术将电能存储于蓄热材料内,电力输出取决于储热装置储热容量,而储热装置释热过程根据热用户的需求而定,完成了电、热在时间与空间上隔离,实现了分钟级甚至小时级电热错峰响应,为新能源电力消纳、高峰电力短缺提供了空间桥梁,加快推动清洁能源在各领域用热工艺中的替代步伐。

2.2 储热参与电网调峰相关研究

国内研究者们已经对不同储热技术参与电力系统调峰的问题进行了深入的研究。目前储热技术主要用于耦合热电厂机组运行,提高电网的调

峰能力。通过不同模型或者算法分析优化储热体系、协同热电机组运行调峰在诸多模拟中都有报道。李平等^[21]针对供热期热电联产机组“以热定电”运行模式导致的电热耦合运行约束,造成系统调峰能力不足的问题,提出了一种利用热网储热与建筑储热解耦电热联合运行策略,提升了电网系统的调峰能力;吕泉等^[22]提出了配置储热来提高热电厂机组调峰能力的消纳方案,结果表明机组调峰能力取决于储热机组所承担的热负荷水平与热电联产机组的最大供热水平对比关系。王耀函等^[23]采用图解法,分析了储热罐与供热机组的热力学特性和机组运行特性,揭示了储热罐储热流量范围与供热机组调峰区间的匹配关系,证明了含储热罐供热机组可以提高其自身调峰能力;邓拓宇等^[24]利用城市供热管网储热,提出了一种带供热前馈的供热机组协调控制方案,仿真结果表明利用热网蓄热有效减少了供热机组机前压力波动,从而提高了机组参与调峰调频的能力。崔杨等^[25]基于火电机组向下调峰与储热特性对储热系统容量配置的影响,提出了一种光热电站储热容量配置方法,实现了低成本火电机组调峰;李峻等^[26]提出了在传统的“锅炉-汽机”热力系统中嵌入大容量高温熔盐储热系统,削弱原本刚性联系的“炉机耦合”,实现火电机组深度调峰。

国外储热供热在电网调峰中应用的相关技术已经比较成熟。Haeseldonckx 等人^[27]就储热装置对供热机组运行及其二氧化碳排放量的影响开展了相关模拟研究;Khan 等人^[28]研究指出,供热机组和储热装置耦合可以充分利用机组的余热,降低系统能耗,并证明储热装置在机组运行中“移峰填谷”的可行性;Fragaki 等人^[29]就供热机组和储热装置之间容量匹配开展研究,并分析了该系统的经济性;Tveit 等人^[30]基于混合整数非线性规划模型,分析了耦合储热装置-供热机组耦合后,区域热网中供热机组的长期运行情况。

2.3 储热参与电网调峰相关工程介绍

在基础研究和试验验证基础上,国内外采用储热技术参与电网调峰已有相关工程应用。

全球大部分大型储热技术设施的装机主要来自欧洲。2009年3月,西班牙 Andasol 槽式光热发电成为全球首个成功运行配置熔盐储热系统的商

业化 CSP(聚光太阳能热发电厂)电站^[31]。Highview Power(高瞻公司)于2018年在英国曼切斯特完成了试商用液体空气储能电站(5 MW/15 MWh)的建设,并于2022年在英格兰北部竣工世界首套商用级液态空气储能电站(50 MW/250 MWh)^[15]。

在我国,储热技术在调峰工程上已有初步应用。如华电昌吉热电厂辅助调峰服务项目,是目前我国单机装机规模最大的调峰储热项目,其中高压固体电蓄热项目的建设,将有效促进新能源的消纳,有效解决冬季供热电厂的调峰需求;内蒙古通辽霍林河坑口发电公司电储热调峰项目达到世界领先水平,在供热期内,当用电需求下降,电网无法消纳风、光等新能源发电量时,电厂投入电锅炉及储热罐运行,将电能转换为热能进行存储,以降低火电机组的上网电量,储热水罐在供热负荷高峰期对外供热。借鉴国外储热供热参与电网调峰技术的发展,国内储热协同电网调峰技术将朝着多因素和全方位考虑方向发展,更充分考虑碳排放、新能源结合、经济指标以及长周期运行等影响因素。此外,随着不同储热技术参与电网调峰示范工程的递增,各种储热技术优势与劣势更加凸显,混合储热系统将是未来耦合电网调峰的主力。

3 储热技术参与电网调峰的关键性指标

与其他储热场景相比,参与电网调峰的储热技术面临功率大、波动性强、长时间运行等特殊工况。在这种情况下,储热材料与装置首先应具备出色的安全性与稳定性,以保证长时间运行过程中的可靠性。其次,储热/放热容量与功率需要与电网运行功率高度匹配,以实现高效能量储存与释放。此外,电网储热系统体量大,其成本与经济性直接影响其规模化应用。围绕上述问题,本文针对各个关键性指标进行逐一梳理与探究,并提出相关建议。

3.1 安全性

储热技术的安全性包括:材料安全、装置系统设计安全和预警系统等。储热材料尤其是相变储热材料,在高温以及变温工况下的安全稳定性,对整个储热系统至关重要。以相变熔融盐为例,当前研究较多的包括硝酸盐、碳酸盐、氯化盐

等^[32]。不同的盐类在运行过程中存在冻结、粘结、腐蚀等问题。与相变材料相比, 显热储热材料相对较为安全。化学储热材料目前尚未大规模应用, 但可以预见其化学腐蚀、稳定性、密封性等问题将是规模化工程应用的主要限制因素。

在装置层面, 高效紧凑的储热装置是提高蓄热、放热效率的关键。一方面, 需要考虑介质密闭性、绝热层设计、机械强度等因素。另一方面, 装置构型和布置方式决定了装置内的流动传热特性, 直接决定了蓄、放热性能。目前, 储热装置的构型包括填充床式、管壳式、板式等结构。其中, 填充床式结构简单, 具有较大的换热面积和较高的换热效率, 然而其内部流动传热过程比较复杂^[33-34]。管壳式是传统工业换热器常见的设计结构, 如何提高其传热性能是主要挑战, 目前研究主要集中在流场与传热性能优化上^[35-37]。板式结构具有结构紧凑、热损失小、传热系数较高等优势。但同时也存在易阻塞、难以密封及维护清理等问题^[38-39]。尽管研究者们对于不同形式的换热装置开展了大量研究, 然而对于装置安全性、耐久性、可靠性研究相对匮乏, 对于内部运行过程仍以数值模拟研究为主^[40-41]。未来研究应关注先进原位检测技术, 以获得精确的瞬态局部运行参数。

在检测与预警层面, 现有的储热技术还不具备基于流程的完整预警检测系统。随着原位传感技术以及数字孪生等新技术的迅速发展, 未来将有望在系统建模基础上, 结合实时检测反馈与虚拟运行系统, 对关键参数、关键零部件实施实时监控, 实时掌握系统运行状况, 进一步提高系统安全性与可靠性。

3.2 性能匹配

储热技术的储存-释放能量速率能否与电网设备匹配是能否实现高效率调峰的关键^[42]。对于我国的能源结构而言, 以燃煤发电为代表的火电在很长一段时间内仍将占据主导地位, 因此以燃煤发电-储热耦合技术的系统性能进行分析。Li 等^[43]对 600 MW 超临界燃煤机组中的相变储热装置在不同储热策略和不同放热策略下的调峰能力进行了分析。庞力平等^[43]模拟研究了高温熔融盐储热-放热过程对二次再热机组、锅炉、汽轮机负荷的

响应特性。对于性能匹配的相关研究, 目前多以数值模拟为主, 电热综合调度模型中, 风、光、水等可再生能源的预测模型需进一步精确优化。Zhang 等人^[44]提出一种基于机组组合的电力系统时序仿真改进方法, 用于评估内蒙古西部地区抽水蓄能和电储热的潜在效益。Nielsen 等人^[45]利用一个两阶段随机规划策略, 对丹麦能源系统中电储热和热泵的经济价值进行评估, 得出不同容量、效率、电力市场价格因素影响电储热和热泵盈利能力, 需在投资建设前对其进行详细的评估。

由于可再生能源并网存在波动性强、不确定高等特点, 因此预测端误差对储热系统的运行方式影响较大。我国幅员辽阔, 各地区情况差异大, 不同地域的可再生能源电功率预测模型需要经过多种不同的场景验证, 才能有效减小预测过程中产生的误差, 从而提升储热系统与电力系统的匹配度, 提高系统运行效率。

3.3 耐久性和可靠性

储热技术应用过程中影响装置性能的最主要指标是储热材料。其中, 储热材料的耐久性尤为重要。耐久性是指储热材料在多次储热和放热循环后保持储热性能的能力。以储热量较大的相变储热材料为例, 可靠的复合相变技术、高效的传热强化技术、提高储热材料高温及循环稳定性等方面是未来的主要研究方向。然而, 泄漏、腐蚀、受潮、过冷、相分离等问题是制约储热发展的瓶颈^[46], 亟待通过开发新型材料、新型换热结构装置来解决上述问题。此外, 相应的行业技术标准应早日指定, 这对于行业的发展与储热技术在电力行业中的大规模推广具有重要意义。

3.4 经济性

储热技术的综合成本主要包括储热材料、储热系统辅助设备及运行成本等, 因供热用户、储热材料不同差异较大。储热系统的成本包括储热材料、装置设备以及运营成本等, 对储热系统的经济性评估主要根据其在特定场景下的运行应用情况而定, 包括储热-放热循环次数和频率。对储热材料与装置而言, 不同的储热技术由于其自身技术特点, 其成本构成也不尽相同。以显热储热技术中的熔盐储热为例, 其主要成本包括: 熔盐材料价格、储热罐体管道等主要零部件、建设维

护费用等。对相变储热技术而言,相变换热器和相变材料占据了总装置成本的80%。研发新型储热材料与换热装置是提高系统能效与降低成本的直接手段。

另一方面,不同的运行模式带来不同的运营成本,其经济性评价指标也不尽相同。张红斌^[47]等人对多方参与的用于消纳风电、光伏的分布式电储热进行了经济性评价建模,对主要参与方和分布式电储热项目的经济性进行了定性与定量评估。Petrichenko等人^[48]利用最大功率、配电损失成本、供暖用电成本等多个指标,量化了电储热的优势和潜在的问题,并分别评估了电储热与传统电加热对电网端的影响。可见,运行模式影响储热系统运行成本,是整体运行收入的关键因素之一,因此通过优化管理流程,提高成本控制水平等管理手段是目前控制储热系统运行成本的关键因素。

4 储热参与电力交易的商业模式

储热参与电网调峰主要有可再生能源消纳、火电灵活性改造、清洁供暖、工业供汽等市场参与方式。可再生能源消纳如风电消纳,能够有效调节电网峰谷;火电灵活性改造如火电厂调峰,通过热电厂供暖季的热电解耦,提高供热机组的运行灵活性,能够增加热电厂低负荷运行能力,也能增加高峰时段的顶负荷能力,具有较强的技术优势和市场竞争力。通过储热技术可有效解决由于时间、空间或强度上的热能供给与需求间不匹配所带来的问题,有效提高能源综合利用水平。

电网热储能除了传统意义上的调节电网峰谷,补偿其他并网可再生能源波动等作用之外,由其长时间储热所衍生出的主要营利途径是电价交易收入和容量电价,不同时间段的电力差价是电价交易的基础。然而电力交易只有当储热容量达到一定规模,以企业形式参与时,才能实现实际营利。将储热技术应用在电网调峰中应结合电网的实际需求如容量、技术成本、经济性和储热技术本身的特点综合评估,以期构建能够与新型电力系统相适应的新型热电联产协同供应系统。我国目前尚未形成成熟的储热相关的电力交易运营商业模式。根据储热的分时电价机制、电力市场机制、

电网业务监管机制和应用场景等内容,储热商业模式可分为三大类:合同能源管理模式、两部制电价模式、辅助服务市场模式。本文将对不同商业模式的投资回收机制、利益相关方、收益水平等方面进行对比,对未来商业模式发展给出建议。

4.1 合同能源管理模式

合同能源管理模式中,储热服务企业与电网,采用合同/契约的形式约定电网储能项目与指标,提供电网热储能服务,实现成本优化^[49]。其优势在于可提升资源利用率,优化经营成本,提供设备改造服务等;而其劣势在于,商业合作普遍存在技术风险、资金风险和政策风险。执行过程中合理规避相关风险尤为重要,应重视过程管理,优化整体流程,实时跟进相关数据,制定阶段性的验收标准并严格按时执行验收流程。

在合同能源管理模式中,储热减少输配电过程电能损耗服务能够按照一定价值衡量,需要从电网企业增加的输电量利润中扣减。利益相关方主要涉及综合能源服务公司以及储热项目公司。综合能源服务公司主要负责项目商业化运营和储热厂商签订合同,并按照提前约定好的方法分红,也可直接投资,通过合同能源管理的形式从电网企业获得效益。储热项目公司主要负责储热项目投资建设以及运维等内容。针对电网开展降低线路损耗、无功优化、热力设备建设及运维、热能利用率核算等合同能源管理服务,由第三方评估节能效益,电网企业从节能获益中扣减用于支付储热运营商节能服务费用。

4.2 两部制电价模式

两部制电价分为容量电价和电量电价,即按电厂的可发电功率以及实际用电量分别计算电费的电价模式,在国际上被广泛采用^[50]。该模式有利于电网资源的灵活调度和合理应用,电量电价上的竞争促使发电企业加强运行管理,降低成本提升效率。储热系统如果实施两部制电价,那么电价应该体现电量效用,容量电价应该反映系统效用。利益相关方主要涉及电网企业、储热厂商和第三方储热投资运营企业等。储热厂商和电网企业进行购售电交易,电网企业需要按照约定时间,按照一定容量支付容量费用,根据电力系统调度情况同意安排储热设备运行方式。第三方储

热投资运营公司主要负责储热项目的投资、建设和运维等。两部制电价按合理收益水平核定,项目可维持合理收益水平。

长远来看,将用户意愿纳入电网调度进行建模可极大提升市场模型精度。在需求侧应当以价格机制为引导,包括更加灵活的分时电价、自适应电价、实时电价等。针对不同的用户,按用电习惯进行划分,引导其能源消费,最终提高用户和供电方的双方利益。

4.3 辅助服务市场模式

迄今为止尚未形成一种普适的辅助服务适用于所有的电力市场^[51]。目前我国储热参与辅助服务市场相关规则正处于试运行阶段,如2023年,浙江能源监管办组织开展了第三方独立主体参与电力辅助服务结算试运行。在电力市场过渡期内,为了应对源侧装机容量富余、系统调度灵活性差的问题,许多地区的调频、调峰、备用服务试行政府制定价格^[52]。例如,2021年4月执行的新版《南方区域电化学储热电站并网运行管理及辅助服务管理实施细则(试行)》中指出,为了补偿充电调峰辅助服务的电量,制定0.05万元/MWh的补偿标准。随着我国电力市场不断完善,形成储热参与调频、调峰等辅助服务市场竞价机制将成为储热回收投资的重要手段。利益相关方涉及辅助服务市场中发电企业、售电企业、电网企业、电力用户和储热厂商等。在中国辅助服务市场未完全成熟前,储热可通过提供辅助服务获得补偿收益,调峰、调频补偿费用由没有承担电网调峰、调频义务但享受调峰服务的各类机组支付,主要包括陈旧的火电,风、电、光伏等可再生能源机组以及核电机组等。但是,调频市场容量有一定限制,储热虽然是一种优质的调频源,其规模化应用必然会引起价格下降以及市场饱和的现象。

5 未来调控技术及商业模式建议

储热技术属于能量型储能技术,能量密度高、成本低、寿命长、利用方式多样、综合热利用效率高,在可再生能源消纳、清洁供暖及太阳能光热电站储能系统应用领域均可发挥较大作用。近年来,熔融盐储热技术和高温相变储热技术备受关注。熔融盐储热技术规模大,方便配合常规燃

气机使用,主要应用于大型塔式光热发电系统和槽式光热发电系统。高温相变储热技术具有能量密度高、系统体积小、储热和释热温度基本恒定、成本低廉、寿命较长等优点,也是目前研究的热点。该技术适用于新能源消纳、集中/分布式电制热清洁供暖、工业高品质供热供冷,同时可作为规模化的储热负荷,为电网提供需求侧响应等辅助服务,目前已应用于民用供热领域,并逐步向对供能有更高需求的工业供热领域拓展。

受政策波动大、机制不健全、商业模式不成熟等因素影响,目前电网侧储能主要采取经营租赁、合同能源管理模式。为了吸引各类资本加码储能赛道,促进储热技术在电网调峰中的大规模应用,未来需进一步创新储能商业模式,如独立储能电站、共享储能电站等^[53],支撑新型电力系统建设与发展。

6 结论

为积极响应“双碳”战略目标,我国能源系统正在经历清洁-低碳-零碳的逐步转型与深化改革。在以电网为主体的电力能源系统中,储热技术在平峰填谷、缓解波动、提高系统的灵活性率等方面发挥着重要作用。本文从参与电网调峰的储热技术出发,梳理了不同储热技术的分类、原理及特点、工程应用实例、关键性指标、商业模式等,得到如下结论。

1)在众多储热技术中,相变储热技术具有较高的相变焓值、优异的热物性、稳定的化学特性以及较高的经济性,从而在电网调峰中具有较高的工程使用价值。尤其是新型高温固体相变储热技术有望与高压大功率电网消纳相匹配,实现电网的深度调峰控制,然而其运行过程中的绝缘密封等问题仍然是规模化工程应用需要突破的关键瓶颈。

2)国内外已有部分将储热技术与电网电力系统相整合的典型工程实例,但其整体仍处于发展初期。考虑到参与电网调峰的储热技术面临功率大、波动性强、运行时间长等特殊工况,需要从安全性、性能匹配、耐久与可靠性以及经济性等4类关键性指标进行全方位评估,从而实现大规模推广。

3) 储热参与电力交易具有合同能源管理模式、两部制电价模式、辅助市场模式等多种潜在的商业形式。通过市场化作用, 引入竞争性商业机制, 在提升资本参与度的同时提高了技术开发、工程管理、市场运营等各环节的效率, 但现有商业模式仍处于起步阶段, 随着政策推进和能源消费形式的变革以及市场经济形态的改变, 商业模式将规模化推进和成熟化运行, 有助于储热技术在电力电网系统中的长期稳定健康发展。

参考文献

- [1] 饶宇飞, 司学振, 谷青发, 等. 储能技术发展趋势及技术现状分析[J]. 电器与能效管理技术, 2020(10):7-15.
RAO Yufei, SI Xuezhen, GU Qingfa, et al. Energy storage technology development trend and technology status analysis [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(10):7-15.
- [2] 杨于驰, 张媛, 莫堃. 新型储能技术发展与展望[J]. 中国重型装备, 2022(4):27-32.
YANG Yuchi, ZHANG Yuan, MO Kun. Development and outlook of new technologies for energy storage [J]. China Heavy Equipment, 2022(4):27-32.
- [3] 沈小晓, 李强, 岳林炜. 多国加快新型储能技术发展[N]. 人民日报, 2022-07-19(17).
- [4] 北京国际能源专家俱乐部. 储能技术与电网发展[J]. 电气时代, 2019(8):26-29.
Beijing energy club. Energy storage technology and power grid development [J]. Electric Age, 2019(8):26-29.
- [5] 陈永翀, 李爱晶, 刘丹丹, 等. 储能技术在能源互联网系统中应用与发展展望[J]. 电器与能效管理技术, 2015(24):39-44.
CHEN Yongchong, LI Aijing, LIU Dandan, et al. Application and development of energy storage in energy Internet system [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(24):39-44.
- [6] 钟苏帆. 协同新能源发展的电网规划关键技术探讨[J]. 电子世界, 2019(24):74-75.
ZHONG Sufan. Discussion on key technologies of power grid planning for collaborative new energy development [J]. Electronics World, 2019(24):74-75.
- [7] 董海鹰, 房磊, 丁坤, 等. 基于热电联产运行模式的光热发电调峰策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(10):2763-2772.
DONG Haiying, FANG Lei, DING Kun, et al. Peak regulation strategy of CSP plants based on operation mode of cogeneration [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(10):2763-2772.
- [8] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17):4283-4290.
CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17):4283-4290.
- [9] 葛维春. 电网储能与弃风协调运行方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12):3628-3634.
GE Weichun. Coordinated operation method of power grid energy storage and wind abandonment [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(12):3628-3634.
- [10] 文贤馗, 张世海, 邓彤天, 等. 大容量电力储能调峰调频性能综述[J]. 发电技术, 2018, 39(6):487-492.
WEN Xiankui, ZHANG Shihai, DENG Tongtian, et al. A summary of large capacity power energy storage peak regulation and frequency adjustment performance [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(6):487-492.
- [11] 蒋浩, 冯云岗. 太阳能储热系统容量配置优化设计[J]. 电力与能源, 2015, 36(5):660-665.
JIANG Hao, FENG Yungang. Optimal design of solar thermal storage system capacity configuration [J]. Power & Energy, 2015, 36(5):660-665.
- [12] 葛维春, 李军徽, 马腾, 等. 提高风电接纳的储热系统容量优化配置[J]. 电工电能新技术, 2019, 39(4):64-70.
GE Weichun, LI Junhui, MA Teng, et al. Optimal allocation of heat storage system capacity for increasing wind power integration [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 39(4):64-70.
- [13] 李拴魁, 林原, 潘锋. 热能存储及转化技术进展与展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5):1551-1562.
LI Shuankui, LIN Yuan, PAN Feng. Research progress in thermal energy storage and conversion technology [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5):1551-1562.
- [14] 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.
- [15] 姜竹, 邹博杨, 丛琳, 等. 储热技术研究进展与展望[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9):2746-2771.
JIANG Zhu, ZOU Boyang, CONG Lin, et al. Recent progress and outlook of thermal energy storage technologies [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9):2746-2771.
- [16] 杨波, 李汛, 赵军. 移动蓄热技术的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(3):515-520.
YANG Bo, LI Xun, ZHAO Jun. Research progress of mo-

- bilized thermal energy storage technology[J].*Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(3):515-520.
- [17] 陈久林,段洋,王志雄.相变储热技术的研究现状及应用[J].*广东化工*, 2020, 47(2):101-104.
CHEN Jiulin, DUAN Yang, WANG Zhixiong. Research status and application of phase change heat storage technology[J].*Guangdong Chemical Industry*, 2020, 47(2):101-104.
- [18] 赵璇,赵彦杰,王景刚,等.太阳能跨季节储热技术研究进展[J].*新能源进展*, 2017, 5(1):73-80.
ZHAO Xuan, ZHAO Yanjie, WANG Jinggang, et al. Research progress on solar seasonal thermal energy storage[J].*Advances in New and Renewable Energy*, 2017, 5(1):73-80.
- [19] 李亚溪,李传常,白开皓,等.热储能技术及其工程应用[J].*长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(3):1-19.
LI Yaxi, LI Chuanchang, BAI Kaihao, et al. Thermal energy storage technologies and its engineering applications[J].*Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2022, 19(3):1-19.
- [20] 汪翔,陈海生,徐玉杰,等.储热技术研究进展与趋势[J].*科学通报*, 2017, 62(15):1602-1610.
WANG Xiang, CHEN Haisheng, XU Yujie, et al. Advances and prospects in thermal energy storage: a critical review[J].*Chinese Science Bulletin*, 2017, 62(15):1602-1610.
- [21] 李平,赵适宜,金世军,等.基于热网与建筑物储热解耦的调峰能力提升方案[J].*电力系统自动化*, 2018, 42(13):20-28.
LI Ping, ZHAO Shiyi, JIN Shijun, et al. Promotion method of peak regulation capacity by power and heat decoupling based on heat storage of district heating network and buildings[J].*Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13):20-28.
- [22] 吕泉,陈天佑,王海霞,等.配置储热后热机组调峰能力分析[J].*电力系统自动化*, 2014, 38(11):34-41.
LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator[J].*Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(11):34-41.
- [23] 王耀函,曾德良,陈凯.基于图解法的含储热罐供热机组特性分析[J].*热力发电*, 2017, 46(11):57-60.
WANG Yaohan, ZENG Deliang, CHEN Kai. Characteristic analysis for combined heat and power units with thermal storage device based on graph method[J].*Thermal Power Generation*, 2017, 46(11):57-60.
- [24] 邓拓宇,田亮,刘吉臻.利用热网储能提高供热机组调频调峰能力的控制方法[J].*中国电机工程学报*, 2015, 35(14):3626-3633.
DENG Tuoyu, TIAN Liang, LIU Jizhen. A control method of heat supply units for improving frequency control and peak load regulation ability with thermal storage in heat supply net[J].*Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(14):3626-3633.
- [25] 崔杨,杨志文,严干贵,等.降低火电机组调峰成本的光热电站储热容量配置方法[J].*中国电机工程学报*, 2018, 38(6):1605-1611.
CUI Yang, YANG Zhiwen, YAN Gangui, et al. Capacity configuration of thermal energy storage within CSP to reduce the cost of peak load regulation[J].*Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(6):1605-1611.
- [26] 李峻,祝培旺,王辉,等.基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造技术及其应用前景分析[J].*南方能源建设*, 2021, 8(3):63-70.
LI Jun, ZHU Peiwang, WANG Hui, et al. Flexible modification technology and application prospect of thermal power unit based on high temperature molten salt heat storage[J].*Southern Energy Construction*, 2021, 8(3):63-70.
- [27] HAESLONCKX D, PEETERS L, HELSEN L, et al. The impact of thermal storage on the operational behaviour of residential CHP facilities and the overall CO₂ emissions[J].*Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(6):1227-1243.
- [28] KHAN K H, RASUL M G, KHAN M M K. Energy conservation in buildings: cogeneration and cogeneration coupled with thermal energy storage[J].*Applied Energy*, 2004, 77(1):15-34.
- [29] FRAGAKI A, ANDERSEN A N, TOKE D. Exploration of economical sizing of gas engine and thermal store for combined heat and power plants in the UK[J].*Energy*, 2008, 33(11):1659-1670.
- [30] TVEIT T M, SAVOLA T, GEBREMEDHIN A, et al. Multi-period MINLP model for optimising operation and structural changes to CHP plants in district heating networks with long-term thermal storage[J].*Energy Conversion and Management*, 2009, 50(3):639-647.
- [31] 吴皓文,王军,龚迎莉,等.储能技术发展现状及应用前景分析[J].*电力学报*, 2021, 36(5):434-443.
WU Haowen, WANG Jun, GONG Yingli, et al. Development status and application prospect analysis of energy storage technology[J].*Journal of Electric Power*, 2021, 36(5):434-443.
- [32] 毛翠骥,余雄江,徐进良,等.耦合熔融盐储热的火电机组灵活调峰系统关键技术研究进展[J].*热力发电*, 2023, 52(2):10-22.
MAO Cuiji, YU Xiongjiang, XU Jinliang, et al. Research progress on key technologies of flexible peak shaving sys-

- tem for thermal power units coupled with molten salt heat storage [J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52 (2) : 10-22.
- [33] KANG K, HONG S K, NOH D S, et al. Heat transfer characteristics of a ceramic honeycomb regenerator for an oxy-fuel combustion furnace [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 70(1):494-500.
- [34] 郑志伟, 仇性启, 祁风雷, 等. 蜂窝陶瓷蓄热体传热和阻力特性实验研究[J]. *石油化工设备*, 2013, 42(1):9-13.
ZHENG Zhiwei, QIU Xingqi, QI Fenglei, et al. Experimental study of heat transfer and resistance characteristics on honeycomb ceramic regenerator [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2013, 42(1):9-13.
- [35] ZHANG Y W, FAGHRI A. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally finned tube [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, 39(15):3165-3173.
- [36] YUSUF Y M, METE A, ORHAN A, et al. Effect of eccentricity on melting behavior of paraffin in a horizontal tube-in-shell storage unit; an experimental study [J]. *Solar Energy*, 2014, 101:291-298.
- [37] VELRAJ R, SEENIRAJ R V, HAFNER B, et al. Experimental analysis and numerical modelling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit [J]. *Solar Energy*, 1997, 60(5):281-290.
- [38] 张森源, 董金善, 周瑞均, 等. 一种凸台板式换热器传热与流阻性能的研究[J]. *化工机械*, 2022, 49(4):598-605.
ZHANG Senyuan, DONG Jinshan, ZHOU Ruijun, et al. Study on heat transfer and flow resistance performance of a boss plate heat exchanger [J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2022, 49(4):598-605.
- [39] 白书诚, 吴俐俊, 田梦雨. 波纹板式换热器传热与流动特性分析[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(6):114-121.
BAI Shucheng, WU Lijun, TIAN Mengyu. Analysis of heat transfer and flow characteristics of corrugated plate heat exchanger [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(6):114-121.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 张显荣, 徐玉杰, 杨立军, 等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较[J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5):1565-1578.
ZHANG Xianrong, XU Yujie, YANG Lijun, et al. Performance analysis and comparison of multi-type thermal power-heat storage coupling systems [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(5):1565-1578.
- [44] LI D C, WANG J H. Study of supercritical power plant integration with high temperature thermal energy storage for flexible operation [J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 20:140-152.
- [45] ZHANG N, LU X, MCELROY M B, et al. Reducing curtailment of wind electricity in China by employing electric boilers for heat and pumped hydro for energy storage [J]. *Applied Energy*, 2016, 184:987-994.
- [46] NIELSEN M G, MORALES J M, ZUGNO M, et al. Economic valuation of heat pumps and electric boilers in the Danish energy system [J]. *Applied Energy*, 2016, 167:189-200.

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-04-03

作者简介:

姚文卓(1993), 男, 硕士, 主要从事流体换热数值模拟计算方面的研究工作。

马美秀(1986), 女, 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。(通信作者)

(本文编辑: 徐 晗)