文章编号:1674-7607(2026)01-0093-10 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.240653

新型电力系统下熔盐储热技术的研究进展

高 达[1,2], 王 峰[1], 刘伟华[1,2], 唐忠锋[1,2]
(1. 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 内蒙古呼和浩特 010051;
2. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘 要: 系统梳理了熔盐储热技术的研究进展和应用现状,深入探讨了其与光热发电、燃煤电厂及电加热系统的耦合技术,涵盖了熔盐储热与各类能源输入系统间的能量耦合机制及其在电力系统调度优化中的作用。熔盐储热技术的引入显著增强了光热电站的稳定性和效率,提升了燃煤发电厂调峰能力和灵活性,促进了可再生能源的整合与脱碳进程,提升了太阳能、风能的调节能力。在熔盐储热技术的加持下,可再生能源可以高效地转化为稳定的高温热流,解决了可再生能源波动性和间歇性对电网的冲击,成为新型电力系统重要组成部分。熔盐储热技术下一步将转向多能源的大规模协同调度,大型能源基地可能是熔盐储热应用的主要方向,其应用场景仍需一步拓宽。

关键词: 熔盐; 储热; 光热; 燃煤电厂; 电力系统
中图分类号:TK02 **文献标志码:**A **学科分类号:**480.40

Research Progress of Molten Salt Thermal Energy Storage Technology Under New Power System

GAO Da[1,2], *WANG Feng*[1], *LIU Weihua*[1,2], *TANG Zhongfeng*[1,2]
(1. College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, Inner Mongolia Autonomous Region, China; 2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The research progress and application status of molten salt thermal energy storage technology have been systematically reviewed, and its coupling technologies with solar thermal power generation, coal-fired power plants, and electric heating systems have been thoroughly explored. This encompasses the energy coupling mechanisms between molten salt thermal energy storage and various energy input systems, as well as its role in optimizing power system dispatch. The introduction of molten salt thermal energy storage technology has significantly enhanced the stability and efficiency of solar thermal power plants, improved the peak-regulation capacity and flexibility of coal-fired power plants, facilitated the integration of renewable energy and the decarbonization process, and increased the regulatory capacity of solar and wind energies. With the support of molten salt thermal energy storage technology, renewable energy can be efficiently converted into stable high-temperature heat flows, addressing the impact of the volatility and intermittency of renewable energy on the power grid and making it an important component of the new power system. In the next step, molten salt thermal energy storage technology will shift towards large-

收稿日期:2024-10-21 **修订日期:**2025-01-08
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB3700603);甘肃省首席科学院资助项目(24RCKA004)
作者简介:高 达(1999—),男,河北保定人,硕士研究生,研究方向为熔盐储热系统。
唐忠锋(通信作者),男,研究员,博导,E-mail:tangzhongfeng@sinap.ac.cn。

scale coordinated dispatch of multiple energy sources. Large-scale energy bases may become the primary direction for the application of molten salt thermal energy storage, and its application scenarios still need to be further expanded.

Key words: molten salt; thermal energy storage; solar thermal; coal-fired power plants; power system

随着“双碳”战略的提出,电力系统正构建以清洁能源(风电、光伏等)为主,强调多种能源之间互补,包括源网荷储(电源、电网、负荷、储能)的互动协调的新型电力系统。新型电力系统强调灵活性、智能化与高效性,能够适应可再生能源发电的间歇性和波动性,确保电网的安全稳定运行和深度脱碳。在此背景下,长时安全、成熟可靠、节能减碳且具有热电解耦的熔盐储热技术对于提高电力系统的灵活性、可靠性和经济性都发挥着关键作用,成为构建新型电力系统不可或缺的一部分,在新型电力系统中扮演着至关重要的角色。

熔盐储热采用熔盐(目前主要是硝酸盐)作为传蓄热介质,通过熔盐在升温和降温过程中的温差实现热量的存储与释放,进而实现能量的迁移和转化。熔盐储热是一种显热储热技术,具有安全性高、储热密度高、储热时间长等优点,可以缓解新能源系统的不连续性和波动性,为电力系统的削峰填谷和节能减碳做出重要贡献,目前在光热发电、火电的灵活性改造、清洁能源存储及综合能源系统方面应用前景广阔。熔盐储热技术起源于光热发电系统,目前在 50、100 MW 的光热发电系统中得到应用。至今已有 10 余个采用熔盐储热技术的光热电站并网运行,20 多个熔盐储热多能耦合的大基地项目在建。近 5 a 的研究表明,熔盐储热技术在火电灵活性改造、风力/光伏发电等能源存储领域也有广泛的应用前景。目前,已有 3 个相关示范项目在建或运行,未来熔盐储热技术在大规模中高温多场景应用方面潜力巨大。

本文综述了熔盐储热技术耦合光热发电、燃煤电厂灵活性改造及电力系统的技术发展,概括了熔盐储热技术进展及应用现状,分析了熔盐储热技术在电力系统应用中存在的问题。

1 光热发电系统中熔盐储热技术

光热发电系统通过集热单元进行集热,采用熔盐(主要为太阳盐、Hitec 盐、HitecXL 盐等)作为储热介质进行储热,熔盐储热系统使得光热发电系统能够克服太阳能固有的间歇性和波动性问题,实现电力的连续、稳定供应,进而与电网需求更好地进行匹配[1]。目前,国内已有 10 余个光热电站投入运行,其系统运行温度均在 370 ℃以上。熔盐储热技术使光热系统的发电效率和储能效率大幅度提高,相比于导热油工质电站,可以使发电成本降低 2%。通过熔盐优化与设备更新将获得更高的系统运行温度,进而允许光热电站工作在较高的热力学循环效率下,如使用超临界蒸汽参数或先进的布雷顿循环等高效发电技术,整体发电效率将进一步提高。长期运营下,通过提高发电时间和电价收益,有望降低度电成本,提高项目经济效益。

1.1 熔盐选择与优化

当前光热发电行业主要采用的储热介质为硝酸盐,尽管其具有较好的热物理性质,但在实际应用中仍需不断探索更优的熔盐配方,以提高效率并降低成本,同时高温熔盐对管道和容器材料有较强的腐蚀性,需要采用特殊材料或防腐措施来延长使用寿命。因此,研究人员正在探索不同的混合氯盐组分,以优化其热物理性质,研究结果表明,在 592~642 ℃,氯化物(50% Cl^-,摩尔分数,下同)的加入增加了太阳盐的热稳定性,熔化温度在 211 ℃(14% Cl^-)至 243 ℃(50% Cl^-)之间,符合光热发电的应用范围[2]。还有研究发现掺杂纳米颗粒可以提高熔盐的储热及传热性能,掺杂后的比热容与原样相比,提升 21.79%,导热系数提升 20.69%,在高温状态下具有较好的热稳定性[3]。在储热系统中,减少合金材料在高温下的熔盐腐蚀也十分重要,通过研究 316 不锈钢在 $NaNO_3$-NaCl-NaF 熔盐和水蒸气中的腐蚀行为获取其相应的腐蚀机制,发现氧化物有助于减轻熔盐对合金的腐蚀。这些发现为光热发电系统选择合适的熔盐和合金提供了直接的指导[4]。

1.2 熔盐储热耦合光热发电技术

熔盐储热技术在光热发电系统中发挥着至关重要的作用。通过调节熔盐的流量、温度和储热时间,能够实现太阳能的高效存储,并且在光照不足时释放热能,从而显著提高系统的发电效率和稳定性。

熔盐储热的基本工作流程是:将低温熔盐从储罐泵入集热场,吸收太阳能后,熔盐的温度升高并流入高温熔盐罐;在高温熔盐罐中,热熔盐与初始熔盐混合,随后通过热交换器将高温熔盐的热量传递给蒸汽或有机介质,从而产生电能[5]。在此过程中,采

用模型预测控制（MPC）对槽式集热器的运行进行调节，合理控制冷罐熔盐流量，可以显著提高太阳能的整体利用效率，并且通过优化各环节的耦合方式减少系统效率损失，从而提升系统的整体发电效率[6]。研究表明，在热力传输过程中，温差对高温储热（TES）系统的热性能具有显著影响，当温差从 50 K 增加到 150 K 时，系统效率降低了 12%；而在固定温差条件下，当输出功率（热功率）从 15 MW 增加到 35 MW 时，效率仅下降了 2.5%。熔盐储热与光热发电的耦合不仅能提高系统效率，降低投资成本，还能改善太阳能系统的热管理性能（例如加快启动时间、避免能量过剩及满足峰值需求）。这些改进有助于提升电力系统的灵活性和可靠性[7-8]。

1.3　基于熔盐储热的微电网算法研究

随着微电网建设率的不断提高，光热电站的电力需求和电力供应间的差距逐渐显现，为减小这一差距并提升太阳能系统的响应时间，研究人员对计算算法进行迭代，提出了适用于不同场景的优化算法。新型电力系统示意图如图 1 所示。

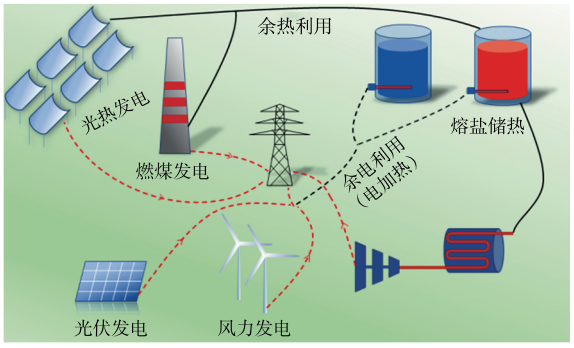


图 1　新型电力系统示意图

Fig. 1　Schematic diagram of new power system

Naserbegi 等[9]将下山单纯形法作为一种创新优化方法，结合 Excel 环境与 Thermoflex 工具，成功获得最佳经济设计模型，经过 77 次迭代，目标函数从 4.48 下降到 4.38，表明光热电站增加了 2.98 MW 的电功率。研究人员还建立了储热容量双层优化模型，并且通过开发多能源综合调度的多目标模型，对多种能源进行耦合，设计了自适应遗传算法与混合整数线性规划算法相结合的双层求解算法。通过该算法确定了储热系统的最优配置容量，并且发现标准煤价格对储热最优容量的影响最显著[10]。

在此基础上，研究进一步增加系统热平衡约束、热电机组的热电耦合约束、储热装置运行约束等，研究结果证明在热电厂中配置储热系统可有效提高电网的风电消纳水平，配置储热可以使得 300 MW 机组的调峰容量分别由额定容量的 16%提高到 37%，使得 200 MW 机组的调峰容量分别由额定容量的 13%提高到 27%[11]。

在新型电力系统中，太阳能和风能等新能源发电存在不确定性，因此在不同时间尺度的调度过程中，研究人员采用了模型预测控制与非支配排序遗传算法来解决这一问题；而针对负荷系统的不确定性，通常采用鲁棒优化方法来应对热负荷的波动[12]。Wu 等[13-14]以多功能园区为研究对象，建立了综合运营成本、㶲效率和污染物排放处罚成本的多目标优化模型，提出多目标快速非支配排序算法来求解优化模型。通过与多目标粒子群优化算法和鲸鱼算法的比较，得出所提出的算法在收敛性、解集的均匀性和连续性方面优于其他算法。

目前，针对多个微电网的能源管理系统，研究人员已经开发了多种基于模型预测控制的最优调度算法，旨在最大化能源利用效率并降低跨多个微电网的额外调度成本。Wang 等[15]提出了一种以运营成本最小化为目标的多阶段电力市场参与的能源管理系统，该系统包括预测阶段、日前调度阶段和实时调度阶段。在预测阶段，采用长短期记忆网络进行前一天数据预测；在日前调度阶段，通过预测数据使参与日前市场的成本最小；在实时调度阶段，基于滚动模型预测控制方法，最小化日内市场的调度成本和附加成本。研究结果表明，提出的优化方案相较于基准解决方案有显著优势，多个多能源微电网总净负载的峰均比从 5.30 降低至 2.35[16]。

综上所述，基于熔盐储热的调峰消纳过程，采用多目标快速非支配排序算法较适合，并且在调度过程中通过实时调度方法能够有效计算出最优的运行数据，实现能量的节约利用，同时动态框架能更准确地确定设备容量，从而提高系统的经济性与稳定性。

2　燃煤电厂中熔盐储热技术

2.1　燃煤电厂耦合熔盐储热技术

当前电力系统中，燃煤电厂是能源转型过程中的基础保障，且具有系统调节作用。随着新型电力系统的快速发展，燃煤电厂正面临负载跟踪频繁、容量系数降低与启动次数增加的运行态势，这导致燃煤发电机组的使用寿命缩短。

为了与快速发展的可再生能源匹配，燃煤电厂需具备快速启停、负荷调节的能力，以弥补可再生能源发电的间歇性和不确定性，进而保持电网的稳定性。现有严格的环保法规要求燃煤电厂减少污染物排放，特别是在负荷较低时避免低效、高污染运行，熔盐储热技术与燃煤电厂耦合是有效的解决方案。

燃煤电厂耦合熔盐储热后，可以在低负荷时段将部分热能储存起来，高峰时段再释放出来用于发电，避免了直接燃烧煤炭，以应对短时电力需求峰值，从而实现负荷的平滑调节。通过优化运行策略，可以确保燃煤发电机组高效运行，同时利用熔盐储热系统吸收和释放多余的热能，提高电厂的整体能源利用效率，减少燃料消耗和排放。

目前，主要的耦合模式是通过利用燃煤电厂不同工作区域的蒸汽热量和烟气余热与熔盐储热系统进行热交换。表 1 为熔盐储热与燃煤发电耦合的不同技术分析。根据表 1 可以发现，这些耦合模式和技术优化措施显著提高了电厂的灵活性、效率及调峰能力，尤其在降低熔盐储能成本、提升系统性能方面起到了关键作用。

为考察热电联产与熔盐储热耦合的性能，何烨[17]提出了熔盐储热耦合供热方案，研究发现熔盐储热供热模式在节能降耗与能源有效利用方面优于传统抽凝模式，是实现碳减排的有效方法。

表 1 熔盐储热与燃煤发电机组耦合的不同技术分析

Tab. 1 Technical assessment of alternative coupling approaches for molten salt thermal energy storage in coal-fired power plants

耦合模式	耦合效果
提取主蒸汽或再热蒸汽来储存能量，并且通过循环将蒸汽送回低压汽轮机或冷凝器[18]	在抽出再热蒸汽并将蒸汽循环回低压汽轮机模式(RtLP 模式)下，最高往返效率为 36.25%，放热时间最短为 0.11 h；从灵活性角度来看，主蒸汽抽出、蒸汽循环回凝汽器的模式(MtCON 模式)，排汽时间增加至 0.48 h，是 RtLP 模式下的 4 倍以上，同时在 RtLP 模式下的等效往返效率高于 MtCON 模式，差异约 10%；在 MtCON 模式下，通过将功率负载从 30%额定功率降低至 14.23%额定功率，实现了最小功率负载；通过降低熔盐的热存储温度，显著增强了集成系统在 MtCON 模式下的调峰性能；当热存储温度从 480 ℃降至临界温度(309 ℃)时，放热时间和往返效率分别增加近 2 倍和 1.7 倍
提取主蒸汽将熔盐储热与燃煤电厂进行集成[19]	在充热过程中，系统可以提供 64.12 MW 的调峰能力；在最优工况下，抽汽量(质量流量)为 237.44 t/h、热罐温度为 686.54 K、分流比为 0.78；优化结果表明，热耗率和调峰容量分别达到 14.48 MJ/(kW·h)和 73.54 MW；此外，系统功率提升率显著提升，达到了 88.27 kW·h/t
通过一次和二次高再冷段抽汽，实现高温熔盐储能和高温熔盐换热器替代高压加热器的放热，从而提高二次再热机组运行灵活性的方案[20]	在储热过程中，最大调峰能量可达 6.82%P_e(P_e为额定负荷)，负荷响应时间缩短 600 s，而在放热过程中，最大调峰量为 1.82%P_e，负荷响应时间缩短 1 800 s，有效改善了二次再热机组的响应速度；在汽轮机热耗率验收(THA)工况下，储热过程中的爬坡速率为 6.82%P_e/s，而在放热过程中的爬坡速率为 1.82%P_e/s，显著提高了机组负荷爬坡率
熔盐热能存储通过取代锅炉与超临界燃煤电厂集成，在用电减少或电网需求较低期间，使用电加热进行储热[21]	与传统燃煤电厂相比，集成电厂在热效率和灵活性方面具有优势；满负荷运行时，集成工厂的往返效率约为 41.8%
基于燃煤发电厂内集成的多个热源(如高温烟气和过热蒸汽)与熔盐换热器进行换热[22]	充热过程中，最小负荷从额定负荷的 30%下降到 14.51%；通过热源与储热介质的合理匹配，热能存储系统的等效往返效率达到 85.17%
同时抽取高压主蒸汽和高温再热蒸汽与熔盐换热，实现百兆瓦级储热和深度调峰[23]	有效提高了熔盐储热过程中的热熔盐温度，并且减少了熔盐的使用量，从而降低熔盐储能的初始投资，系统的综合效率达到 77.8%

2.2 优化策略与热电联产耦合性能

我国正在构建以新能源为主体的新型电力系统，这对燃煤发电机组深度调峰提出了更高的要求。

通过对电网需求的分析及各种储能技术的对比，马汀山等[24]以燃煤发电机组的系统特征为出发点，提出了一种基于熔盐储热辅助燃煤发电机组深度调峰的系统，建立了熔盐系统加热、储热、换热 3 个子系统的主要参数计算方法，为核算项目投资和占地提供了可靠的数据支撑。同时，研究人员提出最优火电机组耦合熔盐储热深度调峰工艺系统，储热过程电加热熔盐系统循环热效率为 33.2%，机组最低发电负荷率可降低至 25%，单位调峰深度熔盐流量为抽汽蓄热系统的 6.6%～31.2%，进一步得出机组负荷对调峰系统循环热效率影响不大，可以为火电机组耦合熔盐储热深度调峰技术的工程应用提供参考[25-26]。

通过研究大规模储热与火电厂协同调峰交易机制，罗桓桓[27]制定了详细的储热系统与可再生能源互动调峰、储热系统与火电机组协同深度调峰的交易规则，并且考虑储热能够迅速响应调峰调度的特性，建立储热系统的容量价格模型。在实时交易机制方面，针对现行政策下机组参与调峰的积极性不足且市场价格虚高的问题，提出了一种储热与火电厂协同调峰的辅助服务体系，并且研究了电储热负荷功率计算模型、额定功率和采暖期弃风用电需求模型。经过计算，机组调峰收入与机组提供的调峰

功率的相关系数为0.989 7，并且储热企业参与调峰辅助服务市场的盈利情况与弃风量有关，当弃风充足时可储热企业的投资回报周期明显缩短。

为分析熔盐储热对发电系统的影响，研究人员对单级熔盐蓄热、常压储水双级蓄热和加压储水双级蓄热3种理论循环模式进行了热力学分析，发现烟气温度对循环熵产及㶲效率有较大影响，热盐罐和冷盐罐温度对熵产分布和设备设计有显著影响；同时，释热循环中的换热器夹点温差及熔盐的熔化温度决定最低熔盐温度[28]。根据分析，蓄热罐可以在一定程度上提高机组的调峰能力，但受到机组容量限制，当蓄热罐和电锅炉容量分别为73和70 MW时，调峰深度增量为187.1 MW，机组最大供热能力提高了72.3%[29]。

热电厂配置了蓄热装置后，在发生弃风时间段内放热，可以减少热电机组的供热量，从而降低“以热定电”导致的强迫出力，减小系统最小出力水平。对抽汽位置进行分析发现，热电联产系统在机组的采暖抽汽口抽汽进行蓄热最经济合理，配置蓄热装置后的机组相比于原机组，最高可以节省总煤耗量7 003.74 kg，平均每小时可以减少1 167.29 kg的燃煤量[30]。

为准确评估热电联产改造效果，研究人员开发了一个双层框架，优化了可再生能源、热电联产和能源储存之间的灵活性选择和每小时运行的投资决策层间调度，仿真模型考虑了热电联产的机组级和过程级约束，在给定的灵活性选项投资配置下，使整个供暖季的能源系统运行成本最小化。双层优化投资框架可确定最经济、最实用的灵活性选项组合，以促进可再生能源整合并减少二氧化碳排放。由于电能和化学能之间能量转换的不可逆损失，长时电能储存整体效率低至40%。相比之下，采用相变材料和保温良好的TES系统的整体效率可以达到95%[31]。同时，热电联产存在过饱和期的热量大量冗余和不饱和期的热量供给不足的问题，何烨等[32]在某600 MW热电联产机组上集成了一个储能辅助循环系统，发现在不降低综合供热系统电力输出的情况下，该系统可以将供暖的热饱和度提升到100%，同时使供热偏差降低0.98百分点，并且室外气温越低，综合供热系统的优势越明显。

为了实现长期脱碳，必须开发灵活的能源转换器和高温储热解决方案。现阶段，热电联产和能源转换器之间的互补性成为电网灵活性的重要支撑。随着可再生能源的扩张和化石燃料淘汰的进行，极端天气引起的电力短缺逐渐成为一类主要问题，而长时间能量储存将是一种十分具有前景的解决方案，可以实现季节性能源平衡。耦合熔盐储热系统会影响整个系统运行服役期间的能量分布，因此应进一步探讨熔盐储热系统对机组经济性的影响。

3　电力系统中熔盐储热技术

构建新能源为主体的新型电力系统需要利用大规模长时储热技术解决弃风弃光现象。电力系统中的熔盐储热技术将一部分电力采用电加热的方式储存至熔盐中，需要时再把热量取出，这便是电-热-电的储能方法。对于朗肯循环和布雷顿循环，其效率受到卡诺循环效率的限制。尽管涡轮机械在放电过程中限制了效率，但用于充电的组件相对便宜，因此通过电加热可以吸收短峰和大峰值功率（例如中午的光伏）来减少充热费用，同时熔盐储热技术有预期寿命在20～30 a、低容量成本（7.79元/(kW·h)）、低环境影响和场地的灵活性等其他优势，其必将为电网提供很大的灵活性选择。

3.1　设计与调度模式

为耦合电力系统与熔盐储热，可在光热电站储热系统中加装感应或电阻式电加热器。该装置在消纳电力系统余能以补充太阳能场时，电热转换效率高达近100%；然而，因储存的热能需通过朗肯循环转换回电能，系统往返效率较低[33]。

因此，为保证能源利用率，张尧翔等[34]将电加热作为夜间弃风时段下光热储热来源及紧急条件下的系统备用资源，正常场景下保持低负荷率运行，当系统直接弃风电量为零时，电加热设备可消纳的弃风电量达到最大值。通过将多余风电通过电加热转换为热能存入光热电站的TES系统中，可以使储热光热电站与电加热、火电机组共同为系统提供旋转备用。研究人员构建了含储热光热电站与风电系统的日前调度模型，该调度策略能够在降低系统旋转备用成本的同时提高风电消纳能力及光热电站的调度灵活性，使系统净收益最大化[35]。Guo等[36]提出了一种带有电加热器的风光储热混合发电系统，如果风电场和光伏电站的发电量超过输电通道容量，多余的电力将通过电加热转换为热能并存储在TES系统中。其通过多目标粒子群优化算法求解容量优化，并且通过帕累托前沿和决策方法得到最终的最优容量。通过比较风光互补储热系统、风光互补电池系统和风光互补系统发现，在风光互补系统中添加电加热和12 h的高温储热，上网电量从591.24 GW·h增加到658.5 GW·h，能够有效提高输电通道的利用率，呈现出更好的可靠性和经济性。

研究人员对以电加热作为能量输入途径的场景建立了一种可实现直接接触式加热的电伴热熔盐管道模型，发现解冻熔化过程电加热装置附近先熔化的熔盐逐渐向管道上方迁移并汇聚到顶端；对电加热装置进行研究发现，扩大电伴热直径，可以改善熔盐熔化效率和熔化过程的均匀性[37]。通过对系统进行电负荷动态研究，发现将熔盐流量设置为跟随电负荷变化能够有效减少出口熔盐温度的波动，并且熔盐流量响应时间越短，出口熔盐温度的变化幅度越小[38-39]。将感应或电阻加热器加入光热电站有助于弥补当前的技术差距、减少能源削减、提高光热电站性能并减少对准确太阳能可用性预测的需求。

3.2 集成技术

张腾飞等[40]考虑了在发电侧，光热电站与火电机组联合参与风电系统调峰，并且在负荷侧加入电加热与储能装置，形成源荷两侧协调调度的模型，发现将电加热与储能装置作为可控负荷与光热电站联合调度时，能够在弃风较少时选择经济效益更好的储能系统，而在弃风较多时，通过电加热进行弃电回收，可以及时止损，弥补风电反调峰特性的不足。同时，通过源荷两侧协调调度共同提高系统风电消纳能力，降低火电机组出力。发现此场景下弃风率可由无储热系统中的 13.7%下降至 0%，风电被完全消纳，并且系统综合成本最低，旋转备用成本减少超过 105 元/d，表明电加热、熔盐储热能够同时为风电和负荷预测误差提供旋转备用，缓解火电压力，以保证系统的安全稳定运行。在不同 TES 容量配置下，电加热安装均降低了年度生产成本，证明电加热安装使光热电站资源能够足够快地响应风电变化并从电网提取电力以供进一步利用，提高了运行灵活性[41]。

基于弃风、弃光、弃电或低谷电的熔盐储热供热系统具有环境友好、改造成本低、占地面积小、电网友好、负荷稳定可调等优势，可实现弃风弃光的就地消纳和电力削峰填谷，提高可再生能源利用率，是燃煤替代、解决北方雾霾的有效途径之一。吴玉庭等[42]以辛集低谷电加热熔盐蓄热供暖工程为例，分析其经济性及环保效益，结果表明，项目的经济效益可观，环保效益非常显著，每年可减少 CO_2 排放 1 889 t、粉尘排放 70 t、二氧化硫排放 6 t、氮氧化物排放 5.3 t，无论是分散式还是连接到区域供热网，电加热对系统成本、可再生能源整合和脱碳均具有极大的好处[43-44]。

4 熔盐储热的应用现状与趋势

4.1 应用现状

随着全球能源转型步伐的加快，新型电力系统正逐步形成并快速发展。新型电力系统是一种以清洁能源为主导的电力系统，它强调灵活性、智能化、高效性，并致力于实现电力系统的深度脱碳。当前，新型电力系统正在经历重大转型与重塑，虽然目前火电仍然是主要的电源，但其装机容量占比已从 2011 年的高位下降了 15 百分点左右，煤电装机容量占比已降至 40%以下。未来，火电机组将更多地承担调峰和备用保障的角色，以适应可再生能源的波动性。而新能源装机容量快速增长，特别是在风能和太阳能领域，预计到 2030 年，新能源将成为装机规模最大的电源类型。

截至 2023 年底，我国兆瓦级规模以上光热发电机组累计装机容量为 588 MW，并网光热发电机组容量为 570 MW。目前，已有 11 座光热电站，其中，最大装机规模为 100 MW，最小装机规模为 10 MW。甘肃金昌高温熔盐储热绿色调峰电站储能规模最大，达到 600 MW/3 600 MW·h。在我国并网光热电站中，塔式占比为 64.9%，槽式占比为 26.3%，线性菲涅尔式(简称线菲式)占比为 8.8%；而在我国兆瓦级规模以上光热发电累计装机容量中，塔式占比为 63.1%，槽式占比为 25.5%，线菲式占比为 11.4%。截至 2023 年底，我国在建和拟建的光热发电项目有 43 个，总装机容量为 4 800 MW。

我国采用熔盐储热技术的光热发电示范电站如表 2 所示。

表 2 光热发电示范电站

Tab. 2 Solar thermal power demonstration plant

项目	储热时间/h	熔盐用量/t
中广核德令哈 50 MW 槽式光热电站	9	
首航高科敦煌 100 MW 塔式光热电站	11	30 000
青海中控德令哈 50 MW 塔式光热电站	7	10 116
中电建共和 50 MW 塔式光热电站	6	
中国能建哈密 50 MW 塔式光热电站	13	16 920
兰州大成敦煌 50 MW 线菲式光热电站	15	
中船新能乌拉特 100 MW 槽式光热电站	10	
鲁能格尔木多能互补工程 50 MW 塔式光热电站	12	

其中，鲁能格尔木多能互补工程是世界上首个集风光热储调荷于一体的多能互补项目。与国家第一批光热发电示范项目相比，目前大多数光热＋新能源电站项目均配备了大容量的电加热器与熔盐储

热装置，用于吸纳光伏和风电的弃电。光热电站由此前的“能发尽发”的独立电源调整为“储能调峰”，储能时间优化为8 h左右。

4.2　发展趋势与挑战

规模化的熔盐储热技术会吸引上下游供应商参与，形成稳定的供应链体系。规模化后市场竞争机制将促进行业成本降低，促使供应商寻找低成本、高品质的替换材料并开展技术创新，加快关键设备和材料的国产化发展，提高国产设备的先进性和可靠性，从而实现降本增效。由于开发商和参与方经验越来越丰富，各方面的风险和试错成本也会降低，设计和建设周期也会大幅度缩短。随着光热发电的规模化发展和技术快速进步，储能时间从2 h增加至12 h，光热发电造价水平随之从2 567元/(kW·h)下降至1 153元/(kW·h)，其中储换热系统造价占比为19.19%。主要通过主要设备和原材料的批量化采购以降低供应成本，整个电站造价降低2.26%～2.74%。

未来熔盐储热技术应加强包括高性能熔盐开发、系统优化与集成、规模化与商业化推进等方面。在熔盐开发方面，开发更低熔点和工作温度范围更宽的熔盐可以提升储热系统的能量密度，进而增强系统的整体效率，并且提升系统集成度。在系统优化与集成方面应加强熔盐储热与可再生能源技术的深度融合，通过与电网调度系统的智能化对接，实现灵活高效的能源管理，应用先进的热管理系统以提升储热系统的整体性能和可靠性。在规模化推进上应优化供应链管理，降低关键设备及熔盐的制造成本，拓宽熔盐储热技术在城市供暖、农业温室供热、数据中心冷却、充电站热管理等领域的应用，实现能源的多用途高效利用。

熔盐储热技术挑战主要在于现有熔盐长期稳定性差，熔盐的腐蚀和泄漏等风险会影响储热系统的长期可靠性，尤其是频繁充放热循环过程中的可靠性。另外，熔盐储热技术的初期投资成本较高也限制了该技术的推广应用。未来发展熔盐储热的关键在于建立储能市场健全的定价机制和商业模式，确保熔盐储热项目合理收益预期，吸引投资者参与。

5　总结与展望

本文综述了熔盐储热技术在光热发电、燃煤电厂灵活性改造、电网弃风弃光能源消纳等方面的研究进展。熔盐储热技术的引入显著增强了光热电站的稳定性和效率，提升了燃煤发电厂调峰能力和灵活性，促进了可再生能源的整合与脱碳进程，提升了太阳能、风能的调节能力。在熔盐储热的加持下，可再生电力可以高效地转化为稳定的高温热流，为能源大基地建设提供了强有力的技术支持。

目前，熔盐储热技术主要应用于光热发电及燃煤电厂热电联产领域，与电网融合的研究相对较少。

未来应加强熔盐储热技术与应用场景的匹配性，致力于开发高储热密度、优良传热性能和宽温度范围的高性能储热技术。研发低成本新型电加热器，充分利用电力系统能量，实现电网的削峰填谷，提高电网的灵活性。熔盐储热技术在工业供热、核能综合利用等中高温领域展现出广阔的多元化应用前景。为此，必须优先建立健全市场机制与商业模式，以明确的项目收益预期，有效吸引社会投资，推动该技术的规模化发展。

总之，熔盐储热技术在推动电力系统稳定、促进可再生能源消纳及提升能源利用效率方面展现出巨大潜力。随着技术进步与成本下降，预计其将在未来能源结构调整和可持续能源发展中扮演更加重要的角色，尤其是在多能互补与能源互联网的构建中发挥核心储能的支撑作用。然而，实现这一愿景需持续的研发投入、产业链优化及政策引导，以解决现存的技术瓶颈、降低成本并拓宽应用场景。

参考文献：

[1] 王义豪，许茜，唐忠锋，等. 纳米TiO_2增强$NaNO_3$-KNO_3-$NaNO_2$熔盐的中温储热特性[J]. 核技术，2018，41(6)：060603.
WANG Yihao，XU Qian，TANG Zhongfeng，et al. Heat storage characteristics of $NaNO_3$-KNO_3-$NaNO_2$ ternary molten salt enhanced by nano-TiO_2 at medium temperature[J]. Nuclear Techniques，2018，41(6)：060603.

[2] CASTRO-QUIJADA M，FAUNDEZ D，ROJAS R，et al. Improving the working fluid based on a $NaNO_3$-KNO_3-NaCl-KCl molten salt mixture for concentrating solar power energy storage[J]. Solar Energy，2022，231：464-472.

[3] 张月，王敏，李锦丽，等. 纳米粒子掺杂太阳盐复合材料热物性研究[J]. 无机盐工业，2022，54(5)：54-60.
ZHANG Yue，WANG Min，LI Jinli，et al. Study on thermophysical properties of solar salt composites doped with nanoparticles[J]. Inorganic Chemicals Industry，2022，54(5)：54-60.

[4] LAI Xing，YIN Huiqin，YANG Zhigang，et al. Synergistic effect of Cl^- and F^- on the corrosion behavior

and mechanism of 316 stainless steel in $NaNO_3$-based molten salts and vapor[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 65: 107243.

[5] LI Junfen, GUO Hang, WU Yuting, et al. Experimental investigation of solar organic Rankine cycle with parabolic trough concentrator using nitrate salt as heat transfer and storage fluid[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 46(5): 6847-6865.

[6] YU Qiang, FU Peng, YANG Yihui, et al. Modeling and parametric study of molten salt receiver of concentrating solar power tower plant[J]. Energy, 2020, 200: 117505.

[7] ABDULLA A, REDDY K S. Effect of operating parameters on thermal performance of molten salt packed-bed thermocline thermal energy storage system for concentrating solar power plants[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 121: 30-44.

[8] 张宇恒，宋晓辉，杨荣贵，等. 基于再热蒸汽抽汽-熔盐储热的火电系统分析[J]. 动力工程学报，2024，44(3)：447-454.
ZHANG Yuheng, SONG Xiaohui, YANG Ronggui, et al. Performance of molten salt thermal energy storage system based on reheat steam extraction from coal-fired power plants[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 447-454.

[9] NASERBEGI A, AGHAIE M, NOURANI Z. Optimal design of a concentrated solar power plant with a thermal energy storage system using the downhill simplex method[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 240: 122264.

[10] 张辉. 提升风电消纳能力的热电厂储热容量优化研究[D]. 呼和浩特：内蒙古工业大学，2021.

[11] 陈天佑. 基于储热的热电厂消纳风电方案研究[D]. 大连：大连理工大学，2014.

[12] WANG Yuwei, TANG Liu, YANG Yuanjuan, et al. A stochastic-robust coordinated optimization model for CCHP micro-grid considering multi-energy operation and power trading with electricity markets under uncertainties[J]. Energy, 2020, 198: 117273.

[13] WU Xiaonan, LIAO Borui, SU Yaogang, et al. Multi-objective and multi-algorithm operation optimization of integrated energy system considering ground source energy and solar energy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144: 108529.

[14] FANG Ruiming. Multi-objective optimized operation of integrated energy system with hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(56): 29409-29417.

[15] WANG Yubin, DONG Wei, YANG Qiang. Multi-stage optimal energy management of multi-energy microgrid in deregulated electricity markets[J]. Applied Energy, 2022, 310: 118528.

[16] 马康超. 考虑共享储能与综合需求响应的多区域多能流耦合系统优化调度研究[D]. 西安：西安理工大学，2023.

[17] 何烨. 集成储能系统的热电联产系统的供热运行分析[D]. 青岛：青岛科技大学，2022.

[18] WANG Baigong, MA Huan, REN Shaojun, et al. Effects of integration mode of the molten salt heat storage system and its hot storage temperature on the flexibility of a subcritical coal-fired power plant[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 58: 106410.

[19] LI Bo, CAO Yue, HE Tianyu, et al. Thermodynamic analysis and operation strategy optimization of coupled molten salt energy storage system for coal-fired power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121702.

[20] 庞力平，张世刚，段立强. 高温熔盐储能提高二次再热机组灵活性研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(8)：2682-2690.
PANG Liping, ZHANG Shigang, DUAN Liqiang. Flexibility improvement study on the double reheat power generation unit with a high temperature molten salt thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2682-2690.

[21] YONG Qingqing, TIAN Yanpei, QIAN Xin, et al. Retrofitting coal-fired power plants for grid energy storage by coupling with thermal energy storage[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 215: 119048.

[22] ZHANG Kezhen, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Design and performance evaluation of a new thermal energy storage system integrated within a coal-fired power plant[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50: 104335.

[23] 王辉，李峻，祝培旺，等. 应用于火电机组深度调峰的百兆瓦级熔盐储能技术[J]. 储能科学与技术，2021，10(5)：1760-1767.
WANG Hui, LI Jun, ZHU Peiwang, et al. Hundred-megawatt molten salt heat storage system for deep peak shaving of thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1760-1767.

[24] 马汀山，王伟，王东晔，等. 基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统设计及容量计算方法研究[J]. 热力发电，2023，52(7)：113-118.

MA Tingshan, WANG Wei, WANG Dongye, et al. Research on system design and capacity calculation method for deep peak shaving of coal-fire unit based on molten salt heat storage assistance[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 113-118.

[25] 邹小刚，刘明，肖海丰，等. 火电机组耦合熔盐储热深度调峰系统设计及性能分析[J]. 热力发电，2023，52(2)：146-153.
ZOU Xiaogang, LIU Ming, XIAO Haifeng, et al. Design and performance analysis of deep peak shaving system of thermal power units coupled with molten salt heat storage[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 146-153.

[26] 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.

[27] 罗桓桓. 电储热参与电力调峰交易机制与动态电价模型研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2022.

[28] 董益华，罗海华，陈云菲，等. 用于高温供汽的燃机热电联产蓄热系统热力特性[J]. 流体机械，2020，48(12)：62-67，73.
DONG Yihua, LUO Haihua, CHEN Yunfei, et al. Thermodynamic characteristics of heat storage system of gas turbine cogeneration plants for high temperature steam supply[J]. Fluid Machinery, 2020, 48(12): 62-67, 73.

[29] 严晓生，王小东，韩旭，等. 耦合电锅炉和蓄热罐的热电机组供热能力提升[J]. 汽轮机技术，2023，65(1)：57-60.
YAN Xiaosheng, WANG Xiaodong, HAN Xu, et al. Improvement of heating capacity of thermoelectric units coupled with electric boilers and heat storage[J]. Turbine Technology, 2023, 65(1): 57-60.

[30] 张云鹏，金晶，高新勇，等. 配置蓄热装置对热电机组运行经济性的影响分析[J]. 热能动力工程，2022，37(8)：143-149.
ZHANG Yunpeng, JIN Jing, GAO Xinyong, et al. Analysis of the influence of heat storage device on the operation economy of thermal power unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 143-149.

[31] MA Huan, SUN Qinghan, CHEN Lei, et al. Cogeneration transition for energy system decarbonization: from basic to flexible and complementary multi-energy sources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 187: 113709.

[32] 何烨，李超，高佳圣，等. 集中供热网蓄热式热电联产机组的综合热力学分析[J]. 动力工程学报，2022，42(12)：1272-1280.
HE Ye, LI Chao, GAO Jiasheng, et al. A comprehensive thermodynamic analysis of CHP unit incorporating thermal energy storage for district heating network[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(12): 1272-1280.

[33] YAGI K, SIOSHANSI R, DENHOLM P. Using concentrating-solar-power plants as economic carbon-free capacity resources[J]. Energy Conversion and Management: X, 2021, 12: 100112.

[34] 张尧翔，刘文颖，庞清仑，等. 高比例风电接入系统光热发电-火电旋转备用优化方法[J]. 电工技术学报，2022，37(21)：5478-5489.
ZHANG Yaoxiang, LIU Wenying, PANG Qinglun, et al. Optimal power spinning reserve method of concentrating solar power and thermal power for high-proportion wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5478-5489.

[35] 崔杨，张家瑞，仲悟之，等. 计及电热转换的含储热光热电站与风电系统优化调度[J]. 中国电机工程学报，2020，40(20)：6482-6493.
CUI Yang, ZHANG Jiarui, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal scheduling of concentrating solar power plant with thermal energy storage and wind farm considering electric-thermal conversion[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6482-6493.

[36] GUO Zeqing, WANG Jiangjiang, DONG Fuxiang, et al. Multi-objective optimization of multi-energy complementary system based on cascade utilization of heat storage[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 299: 117864.

[37] 吴旺松，匡敬柱，毛正江，等. 管内加装电伴热装置时熔盐熔化过程研究[J]. 热力发电，2022，51(3)：79-87.
WU Wangsong, KUANG Jingzhu, MAO Zhengjiang, et al. Study on melting process of molten salt in pipe equipped with a built-in electric tracing heater[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 79-87.

[38] 张国龙，居文平，常东锋，等. 电阻式熔盐加热器动态建模与参数化分析[J]. 热力发电，2023，52(9)：155-161.
ZHANG Guolong, JU Wenping, CHANG Dongfeng, et al. Dynamic modeling and parametric analysis of resistance molten salt heater[J]. Thermal Power

Generation, 2023, 52(9): 155-161.

[39] 李旭东. 电热熔盐单罐设计方法及释热过程中罐内温度场变化规律研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.

[40] 张腾飞, 田书, 郭成威. 考虑可控负荷的光热电站和风电系统调度策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(9): 32-39.
ZHANG Tengfei, TIAN Shu, GUO Chengwei. Scheduling strategy for concentrating solar power plant and wind power system considering controllable load[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(9): 32-39.

[41] XU Ti, ZHANG Ning. Coordinated operation of concentrated solar power and wind resources for the provision of energy and reserve services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1260-1271.

[42] 吴玉庭, 张晓明, 王慧富, 等. 基于弃风弃光或低谷电加热的熔盐蓄热供热技术及其评价[J]. 中外能源, 2017, 22(2): 93-99.
WU Yuting, ZHANG Xiaoming, WANG Huifu, et al. Molten salt heat storage and supply technology based on heating using abandoned wind power, PV power or off-peak power[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(2): 93-99.

[43] BLOESS A, SCHILL W P, ZERRAHN A. Power-to-heat for renewable energy integration: a review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials[J]. Applied Energy, 2018, 212: 1611-1626.

[44] 张学镭, 梁建雄, 王普, 等. 基于 S-CO_2 布雷顿循环的太阳能发电储能一体化系统性能分析[J]. 动力工程学报, 2024, 44(8): 1205-1215.
ZHANG Xuelei, LIANG Jianxiong, WANG Pu, et al. Performance analysis of an integrated solar power generation and storage system based on the S-CO_2 brayton cycle[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(8): 1205-1215.

(上接第 84 页)

[14] 杨茂, 孟玲建, 李大勇, 等. 基于类 3σ 准则的光伏功率异常数据识别[J]. 可再生能源, 2018, 36(10): 1443-1448.
YANG Mao, MENG Lingjian, LI Dayong, et al. Identification of abnormal data of photovoltaic power based on class 3σ[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(10): 1443-1448.

[15] MISHRA M, BYOMAKESHA DASH P, NAYAK J, et al. Deep learning and wavelet transform integrated approach for short-term solar PV power prediction[J]. Measurement, 2020, 166: 108250.

[16] 王言文, 邱启荣, 王宝坤. 基于 Lasso 和 SVR 的向量夹角余弦变权重组合预测模型[J]. 统计与决策, 2020, 36(18): 22-26.
WANG Yanwen, QIU Qirong, WANG Baokun. Forecasting model of vector angle cosine variable weight combination based on lasso and support vector regression[J]. Statistics & Decision, 2020, 36(18): 22-26.