

“双碳”目标下火电机组熔盐储热深度调峰协同运行机制与效益评估

王 赞

(大唐保定热电厂, 河北 保定 071051)

摘 要 在以“双碳”为目标的新型电力系统建设过程中, 火电机组具备良好深度调峰性能, 是保障大量新能源接入的必要条件。熔盐储热凭借大容量、长时储热、高效率的显著优势, 可以弥补传统火电机组的短板, 在破解热电联产机组“以热定电”的难题、提升整个电力系统灵活性方面发挥积极作用。本文聚焦火电机组与熔盐储热协同开展深度调峰的配合模式, 详细介绍了二者结合后整体结构及工作原理, 针对不同电网需求提出多模式融合的实施路径, 并明确了两者间的协同配合关系。在此基础上, 从提高调峰能力、低碳减排以及经济效益三个方面进行总体评价, 对耦合系统的调峰空间扩大、碳排放降低、投资回报等主要优点进行定量分析。结果表明, 熔盐储热与火电站联用能有效降低机组最小调峰负荷至 20% ~ 30%, 大幅增强系统的灵活性, 同时具有良好的低碳和经济效益, 对火电灵活性改造及新型电力系统的建立起到积极的作用。

关键词 “双碳”目标; 火电机组; 熔盐储热; 深度调峰; 协同运行

中图分类号: TM621

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.25.005

0 引言

“双碳”目标促进我国能源结构快速向清洁低碳发展, 风电、光伏等新能源装机量不断增加, 新型电力系统电源构成以及运行方式发生改变。随着大量新能源接入电网, 其出力的不确定性和随机性特征凸显, 对电网的调峰调频性能提出了更高要求。传统的火电机组运行方式由基荷电源转变为灵活调节电源, 而其中深度调峰是主要任务。但是热电联产机组由于长期以来采用“以热定电”的方式, 在供热无法进行大规模的发电量削减, 导致其不能满足大量新能源接入后对于电网调峰调频的需求。熔盐储热技术是较为成熟的大型长时储热技术, 利用熔融态硝酸盐混合物作为储热工质, 具有温区宽广、储热量大、运行可靠、经济性高等特点, 可以用来储存热能并在需要时释放出来。将熔盐储热系统与火电机组联结起来后, 可以通过热能的时间转移而解除两者之间的联系, 即实现热电解耦, 从而提高机组灵活性, 同时具有良好的经济效益。

1 火电机组熔盐储热耦合系统协同运行机制

1.1 耦合系统的架构与能量流特性

火电机组与熔盐储热耦合系统是基于传统的火电机组热力系统上增加熔盐储热子系统, 利用蒸汽抽汽、

热量传递等手段使二者之间形成能源联系并共同工作的一种方式。一般而言, 耦合结构为多源抽汽储热以及梯级释放热量的形式, 有主蒸汽、再热蒸汽、汽轮机四抽蒸汽三条抽汽支路为熔盐储热系统供能以满足各种工况下对热量的需求。

熔盐储热子系统采用双罐结构, 主要包含高、低温熔盐罐、熔盐泵及两类换热设备。系统选用 $\text{KNO}_3\text{-NaNO}_3\text{-NaNO}_2$ 三元熔盐作为储热工质, 熔点约 157 °C, 250 °C ~ 550 °C 区间热稳定性好, 适配火电机组换热工况。储热时低温熔盐经泵送入蒸汽—熔盐换热器吸收抽汽热量升温后存入高温罐; 放热时高温熔盐通过换热器释放热量, 降温后的熔盐回流至低温罐完成循环。

从能量流动分析, 耦合系统实现了能量的空间位移以及调配。传统的燃煤发电厂的能量流动是“锅炉燃烧→产生蒸汽→驱动汽轮机做功发电/供热”, 能量生产和消耗需要同步进行, 这就使得热电联产。但是加入熔盐储热之后, 则多了一个“锅炉产汽→储热→放热”的能量调节路径, 在时间上实现能量的解耦, 在电力系统用电量少、新能源大发的情况下, 可以将剩余热量存入熔盐中以减少机组发电功率; 而在电力系统用电量、新能源出力不够时, 就可以从熔盐中

作者简介: 王赞 (1997-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 电厂电力。

取出这部分热量来增加系统的发电或者供热的能力。这种能量流动方式改变,从本质上解除了传统热电联产机组“以热定电”限制条件,使系统具备一定的灵活性^[1]。

1.2 深度调峰场景下的多模式协同运行策略

根据不同的电网运行工况以及负荷需求,耦合系统可以切换到不同的工作状态,使火电机组与熔盐储热系统相互协作,提高整个系统的灵活性以及经济性。

1. 低谷深度调峰模式。在夜晚电网负荷较低以及新能源大发的情况下,电网需让火电机组减小其发电量以接纳更多的新能源,但又要保障居民供暖正常进行。在这种情况下,火电机组锅炉仍保持一定燃烧量,产生一定蒸汽量来保证基本供暖要求;然后从汽轮机中抽一部分蒸汽进入熔盐储热装置加热水,储存多余能量。汽轮机进气量减少导致其发电量下降,可以使机组最低发电能力由原来的45%~50%降低到20%~30%,即实现深度调峰。在此过程中,锅炉产汽一部分供给供暖,另一部分用于蓄热,所以供暖参数及流量不受发电负荷变化影响,达到热电解耦的效果,保证供暖稳定。

2. 高峰顶峰模式。在白天电网负荷高峰期以及新能源发电量较低的情况下,电网需增加火电机组发电量,保障供电的同时还要应对不断增加的供热需求。在这种情况下,火电机组主机组处于最大出力状态;而熔盐储热系统进行放热操作,放出之前储存高温热量,对给水或者产汽起到全部或者一部分供热作用。这样可以使主机组不必为供热保留蒸汽而处于低负荷状态,可以做到满发,又可以通过储热系统提供热量,解决供热问题,提高了系统的顶峰能力。此外,释热产生的蒸汽也可以引入增设的小型汽轮机进行发电,从而增加整个系统的发电能力,以满足电网的高峰负荷^[2]。

3. 调频辅助模式。在调峰的基础上,耦合系统还可以向电网提供调频辅助服务,熔盐储热系统具有非常短的响应时间,其储热量可以在1秒之内发生改变,可以充当快速可控制载荷以帮助火电机组进行一次调频以及AGC控制,当电网频率下降,需增加发电量的情况下,熔盐储热系统可以迅速减少自身的储热量,甚至转入放热状态,放出热量提高发电量;而当电网频率上升,需要减小发电量的情况下,熔盐储热系统可以迅速增大自身的储热量,吸收多余的电能,快速响应电网的需求,这样快速的变化可以大大提高火电机组调频的效果,获得相应的补偿费用。

1.3 协同运行的协调控制逻辑

为使耦合系统正常可靠工作并使二者良好配合,必须有合理的协调控制策略来对负荷指令进行合理分配及对运行参数进行反馈控制。

协调控制的目标在于依据电网所给定的发电负荷指令、供热负荷以及熔盐储热系统的工作状况进行火电机组及熔盐储热系统的功率分配,使整个系统达到最佳工作状态。系统输入为电网下达的发电负荷指令、热网供热负荷指令、高温熔盐罐温度、低温熔盐罐温度、低熔盐罐液位、火电机组当前工况等,控制器通过对以上信息分析得出当前的工作情况,选择熔盐系统的工作方式(储存热量、释放热量或者停机备用)并得出相应的储存或释放功率,然后改变火电机组的锅炉负荷、汽轮机进汽量、抽汽量等参数,使得全厂的有效功率和无功功率符合外界的要求。

在深度调峰储热状态下,控制系统先判断低温熔盐罐剩余可储热量是否足够,在有足够空间的情况下,调节抽汽阀开度,使相应功率蒸汽进入熔盐换热器,同时调节汽轮机阀门,减小汽轮机进汽量,降低机组发电量,但不影响锅炉燃烧良好,不会造成锅炉燃烧不良现象。在顶峰释热工况下,控制系统先判断高温熔盐罐中有多少可以放出的能量,如果能量足够多,则改变熔盐泵流量,控制释热功率,同时也改变给水或者蒸汽量,使供热或者发电的蒸汽参数维持在一个恒定值上。

此外,控制系统配置保护逻辑,设置机组最小稳燃负荷约束,避免锅炉熄火。系统引入模型预测控制,基于电网负荷、新能源出力、供热需求开展24小时滚动优化,确定熔盐充放热功率,实现系统安全经济运行。

2 耦合系统的综合效益评估

2.1 调峰能力提升效益

熔盐储热与火电机组耦合可改变机组原有热力特性,有效拓宽机组负荷调节区间,提升调峰潜力^[3]。传统的热电联产机组受“以热定电”的限制,其最小出力一般在额定出力的45%~50%之间,调峰幅度较小,不能很好地适应长时间大范围的调峰。而熔盐储热系统的引入使得热电解耦,在此情况下,最小出力可以降低到额定出力的20%~30%,提高了30%~40%,可以较好地解决电网大范围调峰的问题。

耦合系统变负荷响应速度显著提升,机组变负荷速率由常规1%~2%Pe/min提升至约3%Pe/min,可快速平抑新能源出力波动;依靠熔盐储热缓冲,机组深度

调峰持续时长可延长至 5 小时以上, 适配夜间新能源大发下的长时间调峰工况。

熔盐储热与火电机组耦合协同有利于提高系统的调峰能力, 从而更好地接纳新能源。当新能源大发时, 火电机组进行大幅度调峰降低出力, 给新能源腾出上网的空间, 减少弃风弃光现象发生。一般情况下, 该类联合系统的年均增加新能源消耗电量约在 1 000 万千瓦时以上, 提高新能源利用率, 促进以新能源为主体的新型电力系统的发展^[4]。

2.2 低碳减排效益

在“双碳”背景下, 耦合系统低碳减排效益具有重要价值, 主要是指新能源消纳所带来的碳排放降低以及能源利用率提高导致的排放降低。

耦合系统提高新能源消纳水平, 降低化石能源发电比例和碳排放。在一般情况下, 由于火电机组调峰能力有限, 在新能源大发时会出现弃风弃光的现象, 导致化石能源发电比例上升以及碳排放增多。但是耦合系统可以进行深度调峰, 从而多消纳新能源, 每消耗 1 千瓦时新能源电量就可以少用 1 千瓦时煤电, 大约可减少 0.8 千克二氧化碳排放量。耦合系统通过能量梯级利用提高能源利用率, 节约能源以及降低污染排放。传统的火电机组进行大范围深度调峰需要投油稳燃, 造成额外的成本支出以及污染物排放。而耦合系统可以利用储热进行大范围深度调峰, 不需要投油稳燃, 在锅炉处于高效率的工作状态下运行, 避免了低负荷情况下锅炉效率下降的问题。熔盐储热系统的储放热效率达到 83.4%, 能够很好地回收利用热量, 降低能量损耗^[5]。

2.3 经济性效益评估

在最初投入方面, 熔盐储热系统的投资相对较小。模块化的熔盐储热系统成本约为 1 350 元/千瓦, 而传统的双罐系统为 1 600 元/千瓦, 大规模的应用项目的单位能量存储成本在 340 元/千瓦时以下, 远远低于电化学储能。此外, 熔盐储热系统的使用寿命长达 30 年并且没有次数要求, 在其整个寿命周期内都能正常工作, 因此降低了整个寿命周期内的总投资。

在运营费用上, 熔盐储热系统结构简单、自动化水平较高, 可以实现无人值守, 只需要定期巡检维护, 成本很低。而电化学储能需要定期更换电池, 运维成本很高。熔盐储热系统一年的运行维护费用只占其最初投资的 1%~2%, 远远小于电化学储能的 3%~5%。

从收益来看, 耦合系统可以获取多种收益来源。

第一种为深度调峰辅助服务所带来的收益, 深度调峰会给予一定的补贴, 补偿价格约为 0.3 元/千瓦时~0.5 元/千瓦时, 每年都有较大数额的补贴收入; 第二种为电力现货市场峰谷价差收益, 在低谷期蓄热并在高期内释放进行发电所获得的差额收益, 是主要收益之一; 第三种为供热收益, 提高供热能力的同时也增加了供热及工业供汽量。另外, 还可参与调频辅助服务获取相应的调频收益等^[6]。

3 结束语

火电机组与熔盐储热联合运行是实现“双碳”背景下火电机组灵活性提升的一种可行方法。通过建立二者之间的耦合运行方式, 实现热电负荷分离, 增大机组可调范围, 在不同工况下采取不同的运行模式以及协调控制策略, 使整个耦合系统安全可靠运行。从整体上分析, 该耦合方式可以使机组最小可调负荷降低到 20%~30%, 大幅提高其灵活性的同时也带来显著的低碳环保效果及经济效益, 有利于大规模新能源接入和新型电力系统的发展。

参考文献:

- [1] 洪烽, 李鹏飞, 梁璐, 等. 强安全约束下的火电-熔盐耦合系统灵活运行控制策略 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-13[2026-03-16][2026-04-20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=5qKCSu-RHigiqjTlhviNv1nzHBBdjTTIoaM77BDLEWYzr6sEcG-LgGaVuKIk-o-pAhxFlUOL_PLSdxEhqbJQbhU3wqkUQIWaE8Wjx83Df56iiH7YTsrUyq4hvy-2giEua-c11PuNVnp7PdbVlh7grG_Gevw1yGerliHz9BW833lfmN2_6PdNA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 陈珍, 李超, 杨壮, 等. 电力现货市场下火电机组耦合熔盐储热系统技术经济性对比 [J]. 油气与新能源, 2026, 38(01): 149-158.
- [3] 祁艳超, 洪文鹏. 集成熔盐储能的亚临界火电机组热力性能及经济性研究 [J]. 工程热物理学报, 2026, 47(02): 412-425.
- [4] 黄张驰, 周月桂, 王玉亭. 熔盐储热系统集成方式对燃煤火电机组深度调峰和灵活性运行的影响研究 [J]. 动力工程学报, 2026, 46(01): 112-120.
- [5] 魏乐, 周家俊, 张怡, 等. 耦合熔盐储热火电机组技术经济分析与运行优化 [J]. 工程热物理学报, 2026, 47(01): 46-58.
- [6] 张文彬, 赵瑜滢, 李骏, 等. 火电机组耦合熔盐储热集成系统调峰特性研究 [J]. 仪器仪表用户, 2026, 33(01): 90-93, 97.