

# 燃煤发电-物理储热耦合技术研究进展与系统调峰能力分析

周 科<sup>1</sup>, 李银龙<sup>2</sup>, 李明皓<sup>1</sup>, 鲁晓宇<sup>1</sup>, 杨 冬<sup>2</sup>

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:**近年, 可再生能源的快速发展提高了对电力供应系统灵活性运行的要求。未来几年燃煤机组深度调峰将成为常态。燃煤发电机组的灵活性改造是解决火电与新能源发展之间冲突的重要举措。为提高燃煤发电机组的深度调峰能力, 提出燃煤发电-储热耦合技术。耦合技术能够实现热电解耦, 提升机组的深度调峰能力与灵活运行特性, 为新能源提供更多的上网空间。针对燃煤发电-储热耦合技术, 论述了可应用于燃煤机组的 3 种物理储热技术: 热水储热、相变填充床储热与熔盐储热技术, 并分析 3 种储热技术的特点, 提出未来 3 种物理储热技术的研究方向。总结评价储能装置热力性能的指标, 包括蓄放热功率、无量纲温度、Richardson 数、蓄放热效率。同时建立燃煤发电-储热耦合系统的调峰能力计算模型, 将燃煤发电机组的电热特性与储热系统计算模型耦合, 以此分析燃煤发电-储热耦合系统的调峰能力。提出燃煤发电-储热耦合系统合理的运行机制, 建立评价耦合系统的热力性能指标: 储热过程、放热过程与全过程的热效率、系统调峰容量与调峰裕度。构建燃煤发电-储热耦合系统的电热综合调度模型, 模型包括目标函数与调度约束。其中调度约束包括电力平衡约束、供热约束、可再生能源出力约束、电功率约束、热功率约束、爬坡速度约束、储热装置的蓄放热能力约束、储热装置容量约束。以燃煤发电-储热耦合系统的电热综合模型作为调度系统合理安排配置储热后系统运行规划的决策工具, 为电力系统提供运行规划策略。燃煤发电-储热耦合技术利用储热技术在热能利用方面的灵活性, 根据外界热负荷的波动及时调节系统供热量, 有效满足不同时段的热需求, 增加了燃煤发电机组的调峰容量, 达到提升综合系统消纳可再生能源水平、移峰填谷的目的, 构建新型电力供应系统。

**关键词:**燃煤机组; 物理储热技术; 系统调峰; 热力性能; 综合调度模型

中图分类号: TK02 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2022)03-0159-14

## Research progress on the coupling technology of coal-fired power generation-physical thermal storage and analysis for the system peaking capacity

ZHOU Ke<sup>1</sup>, LI Yinlong<sup>2</sup>, LI Minghao<sup>1</sup>, LU Xiaoyu<sup>1</sup>, YANG Dong<sup>2</sup>

(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory Institute of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In recent years, the rapid development of renewable energy has raised the demand for flexible operation of the power supply system. Deep peaking of coal-fired units will become the norm in the coming years. The flexibility modification of coal-fired generating units is an important step to resolve the conflict between thermal power and new energy development. In order to improve the deep peaking capability of coal-fired generating units, the coupling technology of coal-fired power generation and thermal storage was proposed. The coupling technology can achieve thermal-electrolytic coupling, enhance the deep peaking ability and flexible operation characteristics of the unit, and provide more space for new energy to access the grid. For the coupled coal-fired power generation-thermal storage technology, three

收稿日期: 2021-09-07; 责任编辑: 张 鑫 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CC22010501

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技资助项目(HNKJ20-H73)

作者简介: 周 科(1984—), 男, 重庆江津人, 研究员, 博士。E-mail: 412935610@qq.com

引用格式: 周科, 李银龙, 李明皓, 等. 燃煤发电-物理储热耦合技术研究进展与系统调峰能力分析[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 159-172.

ZHOU Ke, LI Yinlong, LI Minghao, et al. Research progress on the coupling technology of coal-fired power generation-physical thermal storage and analysis for the system peaking capacity[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(3): 159-172.



移动阅读

types of physical thermal storage technologies that can be applied to coal-fired units, namely hot water thermal storage, phase change filled bed thermal storage and molten salt thermal storage were presented, and the characteristics of the three types of thermal storage technologies were analyzed and the research direction of the three physical heat storage technologies in the future was put forward. The indicators for evaluating the thermal performance of energy storage devices were summarized, including thermal storage and discharge power, dimensionless temperature, richardson number and thermal storage and discharge efficiency. A model for calculating the peaking capacity of the coupled coal-fired power generation-thermal storage system was also established, and the electro-thermal characteristics of the coal-fired power generation unit were coupled with the calculation model of the thermal storage system, so as to analyze the peaking capacity of the coupled coal-fired power generation-thermal storage system. A reasonable operation mechanism for the coupled coal-fired power generation-heat storage system was proposed, and the thermal performance indicators for evaluating the coupled system were established, namely the thermal efficiency of the heat storage process, the heat release process and the whole process, and the peak regulation capacity and peak regulation margin of the system. A comprehensive electric and thermal dispatch model of the coupled coal-fired power generation-heat storage system was constructed, which included the objective function and dispatch constraints. The scheduling constraints include power balance constraint, heat supply constraint, renewable energy output constraint, electric power constraint, thermal power constraint, climbing speed constraint, heat storage capacity constraint and heat storage capacity constraint. The integrated electric and thermal model of the coupled coal-fired power generation-thermal storage system is used as a decision-making tool for the scheduling system to reasonably arrange the system operation planning after the configuration of thermal storage, which provides an operation planning strategy for the power system. The coupled coal-fired power generation-thermal storage technology utilizes the flexibility of thermal energy utilization of thermal storage technology to adjust the system heat supply in a timely manner according to fluctuations in external thermal load, effectively meeting the thermal demand at different times, increasing the peaking capacity of coal-fired generating units, achieving the purpose of enhancing the level of renewable energy consumption of the integrated system, shifting peaks and filling valleys, and building a new type of power supply system.

**Key words:** coal-fired units; physical thermal storage technology; system peak shaving; thermal performance; comprehensive dispatching model

## 0 引言

近年来,风电、光伏等可再生能源装机总量持续增长,与此同时,可再生能源与火电能源之间相互冲击逐渐显现,可再生能源的消纳成为突出问题<sup>[1]</sup>。我国“三北”地区热电联产供热机组装机容量已经超过火电总装机容量的30%<sup>[2]</sup>。为保证供热需求,在供热期,热电联产机组需采取“以热定电”运行方式,造成机组调峰能力不足、灵活运行能力较差,从而出现冬季供暖期可再生能源的弃能问题<sup>[3-6]</sup>。燃煤发电-储热耦合技术在不影响供热的前提下实现一定程度上的热电解耦,提高机组的调峰能力,从而增加可再生能源的消纳空间。储热技术在热负荷低谷时将系统多余的热量储存起来,热高峰时释放,有效满足热需求,同时可根据外界热负荷的波动及时调节系统供热量<sup>[7]</sup>。文献[8]指出储热装置在丹麦、芬兰等欧洲国家广泛应用,是提高热电联产机组调峰能力的有效手段之一。

提升电力系统灵活性是新型电力系统需解决的核心问题<sup>[9]</sup>。燃煤发电仍是我国的主力调峰电源,未来几年机组深度调峰与低负荷运行将常态化<sup>[10-11]</sup>,然而传统火电自身调峰能力差,且负荷响应迟滞,燃煤机组的灵活性改造是解决火电与新能

源发展之间冲突的重要举措。燃煤发电-储热耦合技术是实现机组灵活改造的主要途径,2016年国家能源局推进的22个火电机组灵活性改造试点项目中,储热技术占比达到65%<sup>[12]</sup>。文献[13]指出在风力发电占芬兰总发电量24%的情况下,采用经济上最优的蓄热方式可以将热电联产机组产量提高15%。BENALCAZAR等<sup>[14]</sup>提出一种混合整数线性规划方法解决燃煤机组与储热系统的运行规划问题,该方法考虑了系统运行成本、热负荷与电厂收入。闫百涛等<sup>[15]</sup>提出利用混凝土储热模块与燃煤发电系统耦合可以提高能源利用效率、增强火力发电调峰能力以及缓解电网调度压力。LI等<sup>[16]</sup>对600 MW超临界燃煤机组热力系统中相变储热装置在3种储热策略和2种放热策略下耦合系统的调峰能力进行了模拟研究。GARBRECHT等<sup>[17]</sup>提出利用高、低温两级熔盐储罐存储2种温度等级能量,适应不用工况下的电力需求,系统具有更高灵活调节能力。庞力平等<sup>[18]</sup>模拟研究了额定工况时高温熔盐储能系统储热和放热过程对二次再热机组锅炉和汽轮机负荷的响应特性及系统的热力性能变化。燃煤机组耦合储热技术在国内外关注度较高,该技术不仅可以提升燃煤机组的调峰容量,提高电网对可再生能源的消纳能力,同时在提升电厂服务水平以

及电厂经济效益方面成效显著。

燃煤发电-储热耦合技术是提升燃煤机组调峰能力的重要技术之一。针对燃煤发电-储热耦合技术,论述了可应用于燃煤机组的3种物理储热技术:热水储热、相变填充床储热与熔盐储热技术,分析3种物理储热技术的特点,总结了近10 a三种储热技术的研究现状与常用于评价储热装置的热力性能指标。在此基础上,分析燃煤发电-物理储热耦合系统调峰能力及其影响因素,建立耦合系统的调峰能力计算模型,提出耦合系统合理运行机制。建立评价耦合系统的热力性能指标,为燃煤发电-物理储热耦合系统的研究提供参考;构建含耦合系统的电热综合调度模型,为电力系统运行规划提供决策工具。

## 1 储热技术

借助储热技术实现热电解耦,是提升燃煤机组调峰能力最经济可行的技术路线<sup>[19-20]</sup>。储热装置内部的热量可以在不同温度、地点、容量需求时放出,解决能源分配与使用的不匹配问题。对于纯凝机组,当电量需求较少时,更多抽汽的热量存储于储热装置中;当电量需求较大时,利用存储的热量满足发电热需求,提高电能产量。对于抽汽式机组,当用电需求低而热需求高时,可以排出储能装置内的热量,减小机组发电量;当用电需求高而热需求低时,可通过向储能装置存储热量,增加机组发电量。储热技术的类型较多,按物理技术可分为显热储热、潜热储热<sup>[21-22]</sup>;按内部压力可分为定压、变压储热<sup>[23]</sup>;按负荷可分为部分负荷和全负荷蓄热<sup>[24]</sup>。在实际应用中,常采用多种储热方式相互耦合达到高效节能的目的。

### 1.1 热水储热技术

热水储热技术是利用储热介质显热的一种储热技术。利用工质显热的储热技术具有稳定、响应较快、投资较低等优点。固体储热也是利用显热的储热技术,目前鹅卵石、沙子、混凝土、砾石等介质被广泛应用于太阳能、工业余热、风电供热、建筑节能等领域。固体储热克服了化学储热的不稳定性与工作温度限制,运行压力接近常压。OLIVKAR等<sup>[25]</sup>研究了不同固体储热介质对太阳能加热器热力性能的影响,结果表明利用沙子与颗粒碳混合物为储热介质的系统热效率最高,而水泥最低。FARZAN等<sup>[26]</sup>研究了沥青作为储热介质的太阳能空气加热器的热力性能,结果表明热力性能的提升较明显。固体储热目前在光电产业应用较多且容量较小,而在燃煤

发电的大容量机组上应用较少。固体储热系统与热水储热系统相比运行方式较为复杂,同时对装置的结构稳定性要求较高,另外考虑到经济性、运行维护等方面,热水储热系统更受欢迎。显热储热技术的灵活性与技术参数见表1。SALMAN等<sup>[27]</sup>给出了显热储热技术的灵活性与技术参数。储热罐最初采用双罐形式,后被单罐形式取代。单罐形式利用温差自然分层即斜温层,同时存储冷热介质,显著降低工质用量,占地面积小且设备造价低,受到广泛关注。国内外学者对储热罐的基本原理、结构优化、工程应用以及运行策略等方面进行了大量研究,同时在燃煤机组-热水储热耦合技术方面做了大量工作。

表1 显热储热技术的灵活性与技术参数

Table 1 Flexibility and technical parameters of sensible heat storage technology

项目	显热储热技术参数
储存工质	水
储存时间尺度	分钟~天
响应时间尺度	秒~分钟
装机容量/MW	0~5
操作范围(负荷)/%	0~100
放热时间/h	1~8
自身散热损失/(%·d <sup>-1</sup> )	0.5
能量密度/(Wh·kg <sup>-1</sup> )	80~120
寿命/a	10~20

在储热罐的基本原理和结构优化方面,刘璇等<sup>[28]</sup>研究了罐体容积相等时不同高径比下斜温层厚度的变化,结果表明最佳高径比在1.58~1.88。戈志华等<sup>[29]</sup>分析了储水罐中布水器的开孔数、开孔直径、罐体高径比等结构参数对斜温层厚度的影响,研究表明,斜温层厚度与孔口流速有一定的耦合关系。RAHMAN等<sup>[30]</sup>提出可用于分布式发电模拟的分层储水罐模型,模型可确定分布式发电系统的储热罐尺寸和配置,并准确预测耦合系统中储热罐的吸热量和放热量。DOGAN等<sup>[31]</sup>研究了罐内布置的障碍物类型与位置对斜温层的影响,结果表明障碍物具有热屏障的作用同时促进流动,有效促进了罐内的热分层。ABDELHAK等<sup>[32]</sup>研究了水平与垂直布置的储热罐结构对斜温层的影响,结果表明水平结构的储热罐易发生环形流或涡流现象。YANG等<sup>[33]</sup>研究了静态运行方式时不同水箱形状对热能力和热分层的影响,研究表明球罐和桶形水箱最适合储热,圆筒形水箱最不适合储热。不同形状的热分层是由水箱底部的流量和由流体到环境的热传递

决定。

在储热罐运行策略优化方面,王小惠等<sup>[34]</sup>对储热罐放热、散热及连续储、放热工况下斜温层的储热性能开展数值模拟研究,结果表明斜温层的相对增长率受斜温层初始厚度和位置影响,斜温层的厚度随循环次数的增加不断增长,储热罐的有效利用率不断降低。苏雪刚等<sup>[35]</sup>通过 Fluent 软件模拟储热罐蓄放热过程中斜温层的变化规律,研究了热水蓄热罐系统布置方式。于浩<sup>[36]</sup>利用数值模拟对储热罐内温度场和速度场进行了研究,计算了在不同入口流速下罐内温度场和速度场的分布,同时比较了不同工况下罐内斜温层的特性。

综上可知,国内外学者对储热罐结构进行了大量研究,研究重点多集中于储热罐中的斜温层分布情况、蓄放热过程中斜温层的变化规律。实际上在不同因素的影响下,罐内的流动均匀性对斜温层的分布影响较大,因此可以从储热罐蓄放热过程中罐内温度场、速度场等方面综合观察斜温层的变化,提高储热装置的储放热效率。同时储热装置在循环过程中的储放热效率是系统运行中需关注的问题,研究表明随着循环次数增加,储放热效率不断降低,因此如何提升储热装置循环过程中的效率是关键。

## 1.2 相变填充床储热技术

填充床储热技术是利用储热介质潜热的一种储热技术。对于热电厂的中低温储热装置,由于水的灵活性更适合直接用于供热。尽管单罐蓄热技术已经发展成熟,并已在一些太阳能电厂和热电联产电厂中大规模应用,但与潜热蓄热相比,其储能密度仍有限。因此,相变储热技术受到较多关注<sup>[37-38]</sup>。为避免相变材料(Phase Change Materials, PCM)泄漏并克服大多数相变材料导热系数低的缺点,PCM 必须包含在其他导热系数高的材料中,如不锈钢和铝。在储热装置中常使用的方法可分为 2 类:使用 PCM 模块<sup>[39-40]</sup>和封装 PCM 填充床<sup>[41-42]</sup>。SUN 等<sup>[41]</sup>在水箱中使用有机 PCM PK6 填充床,研究发现 PCM 填充床在储热过程中没有增强斜温层,但能促进放热过程中斜温层保持稳定。YANG 等<sup>[43]</sup>对多层型填充床蓄热器和单型填充床的热力性能进行比较,发现多层型填充床的相变材料融化较早,出水温度

相对较高。

目前,在储热罐中添加相变材料的研究比较有限,多采取数值模拟的形式,涉及的 2 个主要问题至今仍未解决;① PCM 填充床是否改善斜温层仍然存在异议。这种差异可能源于试验或计算条件的差异,如 PCM 胶囊的直径(导致填充床孔隙率和传热表面的差异),储热罐的几何结构与传热流体流速(导致传热流体雷诺数和填充床区域传热时间的差异)之间的关系,PCM 胶囊(包括 PCM 和外壳材料)的热物理性质。上述因素可能影响传热流体与 PCM 之间的传热,从而导致斜温层性能变化。② 先前研究多为储热罐小部分空间设置 PCM 填充床,可能考虑大规模 PCM 填充床增设是否会影响斜温层性能或使投资急剧增长。然而,为了提高热电厂储热罐的调节能力,需尽可能提高储热罐的储能密度。

国内外学者在相变填充床储热技术方面进行了大量研究,KUMAR 等<sup>[42]</sup>研究了是否添加 PCM 时,储热罐内的温度分布情况,结果表明,不添加 PCM 时系统的蓄热时间缩短,但随着传热流体温度与 PCM 熔融温度之间温差的增大,蓄热时间差异减小。YANG 等<sup>[43]</sup>提出了一种填充 3 种相变材料的球形胶囊填充床蓄热系统,结果表明,这种新型蓄热填充床比传统填充床具有更高的能量和焓传递效率。RAMANA 等<sup>[44]</sup>对相变储热系统进行了试验研究,发现增强相变储热系统的分层性能可显著提高储热效率。KOIDE 等<sup>[45]</sup>研究了高温空气加热系统中含有 Al-Si 基微胶囊相变材料的水平填充床的蓄放热性能,计算了蓄放热过程中的换热效率。鲜见采用 PCM 填充床的斜温层储热罐的循环性能研究,尤其在试验方面。NITHYANADAM 等<sup>[46-47]</sup>提出了一种基于光电厂运行条件下重复储放热循环的封装 PCM 储热系统的设计和优化方法。HE 等<sup>[48-49]</sup>在装有石蜡填充床的储热罐性能方面进行了多项试验,其中包括有无石蜡填充床时储热罐的性能对比及带有石蜡填充床的蓄放热循环过程的性能变化,热水储热罐与 PCM 储热罐的性能对比见表 2,PCM 储热罐的斜温层性能虽不及热水储热罐,但在小流量运行时,PCM 储热罐优势明显,释放出更多热量。

表 2 热水储热罐与 PCM 储热罐的性能比较<sup>[48]</sup>

Table 2 Qualitative comparison of the thermal performance between water tank and PCM-water tank<sup>[48]</sup>

项目	热水罐	PCM 罐
能量储存密度	小	大
传热流体流量对斜温层厚度的影响	小	大
储热时间	短	长

续表

项目		热水罐	PCM 罐
储热时间/功率-运行温度范围相关性		×	√
放热出口温度-运行温度范围相关性		×	√
稳定的热出口温度时间尺度	小流量	×	明显
	大流量	×	不明显
稳定的放热功率时间尺度	小流量	×	明显
	大流量	×	不明显
能效		高	低
能效-传热流体流量相关性		小	大

注:√和×分别表示有关和无关。

研究表明,相变填充床储热技术研究广泛,近10 a,研究多集中于相变填充床储热技术的相变材料选用、相变材料的布置形式、相变材料与传热流体之间的传热、填充床布置位置、填充床储热设备的蓄放热性能等方面。与热水储热技术相同的是,储热罐内的斜温层是评价装置热力性能的一项重要指标。相变填充床储热技术虽储存储能密度较大,但由于填充床的存在,其斜温层性能不及热水储热罐。装置内的斜温层性能与储能密度改变时,储热装置的热力性能存在最优值。目前研究均集中于单一参数的变化,应关注最优值。同时,由于填充床的存在,传热流体的速率影响传热性能,因此初始阶段储热和循环过程中,传热流体与相变填充床之间的热量交换效率是关键,影响相变填充床储热装置的设计与高效运行。

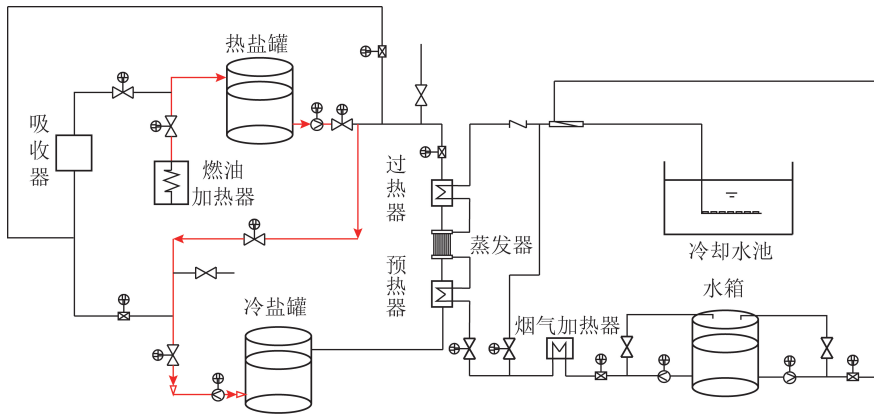
### 1.3 熔盐储热技术

熔盐储热技术是一种利用显热与潜热的储热技术。与前2种储热技术区别在于,熔盐储热技术被广泛应用于高温储能领域。大型燃煤机组用于推动汽轮机做功的蒸气温度在540~600℃,高温熔盐储热技术能较好地匹配这一温度参数<sup>[50]</sup>,熔盐作为传热和储热介质,具有高比热容、高能量密度、高热稳定温度等优点<sup>[51]</sup>,目前常见的熔盐储热介质有碳酸盐、氯化物、氟化物、硝酸盐等。硝酸盐由于热稳定性高、腐蚀性低最适合作为熔盐储能介质。多元混合硝酸盐已成功应用于太阳能光热发电技术中,如二元共晶硝酸盐(60% NaNO<sub>3</sub>-40% KNO<sub>3</sub>),熔点约221℃,高温热稳定性可达565℃。三元共晶硝酸熔盐(53% KNO<sub>3</sub>-7% NaNO<sub>3</sub>-40% NaNO<sub>2</sub>),熔点约142℃,在454℃时具有较好的热稳定性。近年来以三元氯化盐为代表的高温熔盐成为新趋势,同时开发低熔点、稳定性好、腐蚀性低、温度区间大、投资低的熔盐体系也是重要途径。该技术能实现大规模储热和放热,非常适合应用于燃煤机组储热。同时

考虑到非采暖期时的热电联产机组与纯凝机组的深度调峰需求,熔盐储热技术逐渐受到关注。光热电站熔盐储热系统的商业示范运行验证了该技术的可靠性、安全性和经济性<sup>[52]</sup>。

关于熔盐系统结构优化设计、熔盐系统传热机理以及高温熔盐系统运行过程中面临的热损失问题研究较多。时华等<sup>[53]</sup>考虑到熔盐罐在初次投入使用或长时间停机后投运时可能出现的熔盐凝固和冻堵事故<sup>[54]</sup>,搭建了1 MW<sub>th</sub>中试太阳能热发电系统(图1),对熔盐储热罐预热过程温度场的变化进行了试验和数值模拟研究。目前在预热方面的研究还较少,高效的预热方式能缩短熔盐储热罐的投运时间,提升储热系统的效率。ELSIHY等<sup>[55]</sup>对熔盐填充床系统与纯熔盐系统的斜温层特性进行比较,结果表明熔盐填充床储热罐的斜温层厚度高于纯熔盐储热罐,而纯熔盐储热罐的热分层效果更好。TORRAS等<sup>[56]</sup>采用并行模块化面向对象的方法对熔盐储热罐的性能进行了数值模拟研究,主要包括罐壁、保温材料、罐基、熔盐介质等因素。ZHANG等<sup>[57]</sup>提出了单罐熔盐系统入口速度与放热时间、熔盐平均温度之间的关系式,为单罐熔盐系统的设计提供指导。YIN等<sup>[58]</sup>发现多孔填充床的蓄热效率略低于纯熔盐温跃层蓄热。文献[59-61]在罐体几何尺寸、保温层厚度、罐内温度对熔盐储热罐热损失的影响进行了数值模拟研究。WAN等<sup>[62]</sup>建立了一种耦合热性能评估模型,用于评估熔盐储热罐的热损失和温度分布,同时研究了熔盐储热罐在不同工况下的力学性能,除应用于太阳能发电领域外,在中高温领域也有广泛应用。与其他方式相比,熔盐储热供热具有安全可靠、节能环保、控温精确等优势<sup>[63]</sup>。

目前,熔盐储热技术在燃煤机组深度调峰方面少有应用,2021年10月,江苏国信子公司靖江发电厂首次将熔盐储能技术用于电厂侧的调频调峰。目前学者们针对燃煤机组-熔盐储热耦合系统方案进

图1 1 MW<sub>th</sub>中试太阳能热发电系统Fig.1 1 MW<sub>th</sub> pilot solar thermal power system

行了大量研究,旨在寻找高效、灵活的燃煤-熔盐储热耦合方案。李峻等<sup>[64]</sup>提出在传统“锅炉-汽机”热力系统中嵌入大容量高温熔盐储热系统的灵活性改造方案,如图2所示。研究表明该方案不仅能极大提高深度调峰能力,还能促进火电厂转型升级。王辉等<sup>[65]</sup>提出了应用于火电机组深度调峰的百兆瓦级熔盐储能技术,并对耦合系统的各模块进行了理论计算,结果表明,系统综合效率达77.8%,在大规模储能领域应用前景广阔。时正海等<sup>[66]</sup>公开一种锅炉高温烟气熔盐储热装置及其工作方法,利用

锅炉高温烟气加热熔盐储热,实现火电机组灵活调峰。总体来看,国内学者近3 a中提出了多种燃煤-熔盐储能耦合方案,由于熔盐储能系统对换热工质温度的要求较高,因此储能系统在燃煤机组内热量提取位置对耦合系统的运行效率非常重要。目前常见的储热策略中,热量提取位置多在主蒸气与再热蒸气管路,而在放热策略中,热量的放出位置多在除氧器与给水泵出口。在耦合系统中,熔盐储能系统的运行策略与蓄热容量也是影响耦合系统运行效率的重要指标。

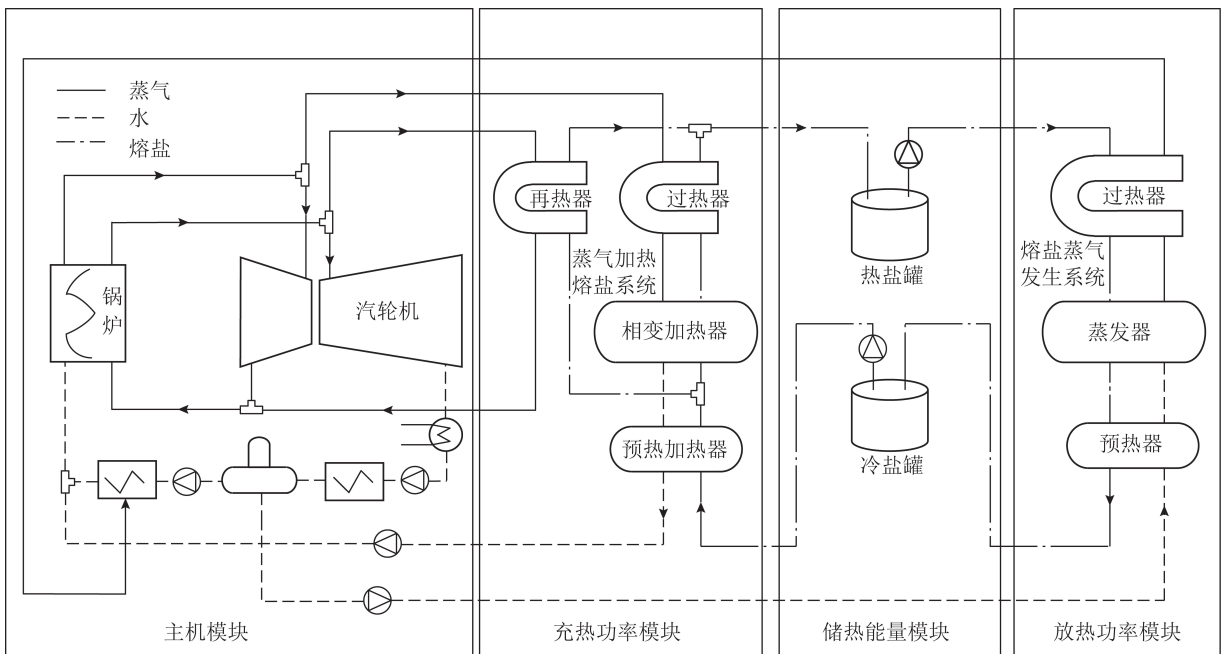


图2 嵌入高温熔盐储热系统的火电机组工艺

Fig.2 Process of the thermal power unit embedded in high temperature molten salt heat storage system

熔盐储热技术广泛应用于高温储热领域,对熔盐储热装置而言,装置预热研究较少,高效的预热方式可提升储热装置的效率,并减小热冲击。熔盐储能装置的斜温层性能是判断热力性能的重要指标,

因此在提升斜温层性能方面,3种储热技术类似。熔盐储热还面临高温装置的热损失问题,因此目前在减小热损失或热损失利用方面研究较少。近2 a,熔盐储热技术在我国燃煤机组的应用研究越来越

多,但研究多停留于模拟阶段,技术尚未成熟。该储热系统在燃煤机组的取热位置、取热方式、放热方式等问题还需进一步探索。

## 2 储热装置的性能评价指标

储热技术是提高能源利用效率、提升燃煤机组深度调峰能力与能源系统稳定供应的重要技术。针对储热装置的性能评价相关参数研究较多<sup>[67-74]</sup>。一些无量纲参数(无量纲温度、分层数和理查森数)能够表示储热罐中的分层情况。本节总结了评价储热装置性能的一些参数,并对储热装置的热力性能进行评价,从而选择高效的蓄能方式与运行方式。

### 2.1 蓄放热功率

储热装置的蓄放热功率指单位时间内储热装置能够蓄积的热量与放出的热量,计算公式为

$$P_c = (t_{in} - t_{out})c_{p,w}q_v\rho_w, \quad (1)$$

$$P_d = (t_{out} - t_{in})c_{p,w}q_v\rho_w, \quad (2)$$

式中, $P_c$ 、 $P_d$ 分别为储热装置的蓄热、放热功率,kW; $t_{in}$ 、 $t_{out}$ 分别为传热流体进口、出口温度,℃; $c_{p,w}$ 为传热流体的比热容,kJ/(kg·K); $q_v$ 为流体体积流量,m<sup>3</sup>/s; $\rho_w$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>。

### 2.2 无量纲温度

无量纲温度包括无量纲储热截止温度与无量纲放热截止温度。这2个参数在0~1,较大的值代表更高的储、放热程度,计算公式为

$$T_{s,c}^* = \frac{T_{s,c} - T_{d,in}}{T_{c,in} - T_{d,in}}, \quad (3)$$

$$T_{s,d}^* = \frac{T_{c,in} - T_{s,d}}{T_{c,in} - T_{d,in}}, \quad (4)$$

其中, $T_{s,c}^*$ 、 $T_{s,d}^*$ 为无量纲储热截止温度与无量纲放热截止温度; $T_{s,c}$ 、 $T_{s,d}$ 为储热和放热停止或进入下一次储放热过程时的标准温度,℃; $T_{c,in}$ 、 $T_{d,in}$ 分别为储热、放热时的进口温度,℃。当 $T_{s,c}^*$ 接近1时代表储热罐处于完全储热状态。

### 2.3 Richardson 数

Richardson 数 $R_i$ 为浮升力与混合力之比,用于评价储热罐内的分层情况,计算公式为

$$R_i = \frac{g\beta H(T_t - T_b)}{v_s^2}, \quad (5)$$

$$v_s = \frac{Q}{\pi r_s^2}, \quad (6)$$

其中, $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $\beta$ 为热膨胀系数; $H$ 为储热罐的高度,m; $T_t$ 、 $T_b$ 为储热罐内的顶部与底部温度,℃; $v_s$ 为斜温层处工质平均速度,m/s; $Q$ 为放

热流量,m<sup>3</sup>/s; $r_s$ 为斜温层半径,m。Richardson 数较小时代表储热罐内混合程度较高,较大时代表分层程度较高。

### 2.4 蓄放热效率

蓄放热效率用来描述不同工况时蓄放热的利用率,根据热力学第一定律, $\eta$ 为每次蓄放热过程中储存/释放的实际热量与储热罐理论蓄热容量的比值(式(7))。 $E_{total}$ 的计算公式为式(8)~(11),涉及相变材料与包括相变材料的外壳时,由公式(10)、(11)可计算得到对应储存的热能。

$$\eta = \frac{\int_0^{\tau_{end}} |T_{in}(\tau) - T_{out}(\tau)| c_{p,w} q_v \rho_w d\tau}{E_{total}}, \quad (7)$$

其中, $\tau_{end}$ 为蓄放热截止时间,s; $\tau$ 为时间,s; $T_{in}$ 、 $T_{out}$ 为储热罐进出口温度,℃; $E_{total}$ 为储热罐理论蓄热容量,kW。当循环过程中进出口温度与初始时刻的值相差3℃时认为蓄放热截止。

$$E_{total} = E_w + E_{PCM} + E_{ss}, \quad (8)$$

$$E_w = M_w c_{p,w} (T_{c,in} - T_{d,in}), \quad (9)$$

$$E_{PCM} = M_{PCM} [c_{p,s} (T_{p,s} - T_{d,in}) + \Delta h + c_{p,L} (T_{c,in} - T_{p,L})], \quad (10)$$

$$E_{ss} = M_{ss} c_{p,ss} (T_{c,in} - T_{d,in}), \quad (11)$$

式中, $E_w$ 为传热流体储存的热量,kW; $E_{PCM}$ 为相变材料储存的热量,kW; $E_{ss}$ 为包裹相变材料的外壳储存的热量,kW; $M_w$ 为储热罐内传热流体质量,kg/s; $M_{PCM}$ 为储热罐内相变材料质量,kg/s; $c_{p,s}$ 为相变材料固相比热容,kJ/kg; $T_{p,s}$ 为固体相变温度,℃; $c_{p,L}$ 为相变材料液相比热容,kJ/kg; $T_{p,L}$ 为液体相变温度,℃; $\Delta h$ 为相变材料熔融热,kJ/kg; $M_{ss}$ 为储热罐内包裹相变材料的外壳质量,kg; $c_{p,ss}$ 为包裹相变材料外壳比热容,kJ/kg。

总体而言,利用蓄放热功率、无量纲温度、Richardson 数、蓄放热效率4个参数能够对储热装置的性能进行评价。涉及相变材料时,蓄放热效率的计算包括材料相变过程中的能量变化。这些参数不仅评价了储热装置的性能,更为储热装置的运行条件与运行方式提供指导。在工程应用中,应结合实际运行情况规划储能系统的优化运行方案。

## 3 耦合系统调峰能力与评价指标

燃煤发电-储热耦合技术在燃煤机组中设置储热装置实现热电解耦,深度挖掘燃煤机组的调峰能力,为太阳能、风能等可再生能源提供消纳空间,实现新能源与燃煤发电机组的协调运行。基于常用燃煤机组的储热技术特点,需对燃煤发电-储热耦合

系统的调峰容量、调峰裕度以及影响调峰能力的因素进行研究<sup>[4]</sup>。建立评价耦合系统的热力性能指标<sup>[12]</sup>。

### 3.1 配置储热后机组调峰能力分析

由于我国抽汽式机组装机容量较大,本节以抽汽式机组为例进行阐述。储热前的机组配置采取“以热定电”的运行方式,图3为抽汽式热电机组的电热特性,即机组发电功率与供热功率间的关联耦合关系。储热前机组运行区间为 $ABCD$ 所围区间,电热特性为式(12)。储热后机组的运行区间为 $AGIJLA$ 所围区间,电热特性为式(13)。可知储热后机组最大供热功率由 $h_{T,max}$ 增加至 $h_{T,max}+h_{fmax}$ 。对于某个供热水平 $h$ ,机组由储热前 $P_F \sim P_E$ 的调峰区间增加至 $P_M \sim P_H$ 的调峰区间,储热装置补偿了供热不足或供热剩余的部分,从而提升了机组的调峰能力。

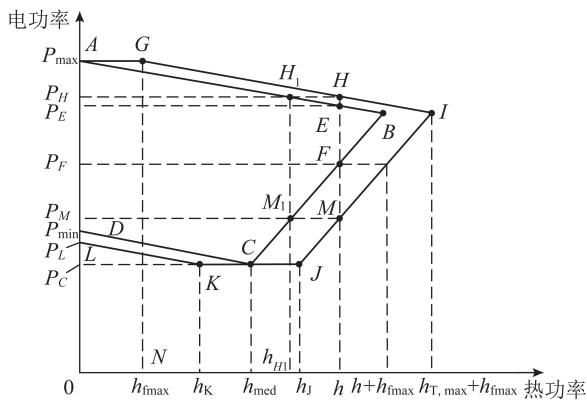


图3 配置储热前后机组电热特性

Fig.3 Electricity-heat relationship for extraction unit with heat accumulator

配置储热前机组的电热特性:

$$\max \{ P_{\min} - c_{v2}h, c_m(h - K) \} \leq P \leq P_{\max} - c_{v1}h, 0 \leq h \leq h_{T,max} \quad (12)$$

配置储热后机组的电热特性:

$$\max \{ P_L - c_{v2}h, P_{\min} - c_{v2}h_{med}, c_m(h - h_{fmax} - K) \} \leq \min \{ P \leq P_{\max} - c_{v1}(h - h_{fmax}), P_{\max} \}, 0 \leq h \leq h_{T,max} + h_{fmax}, \quad (13)$$

式中, $c_m$ 为背压曲线的斜率,可认为是常数; $c_{v1}$ 、 $c_{v2}$ 分别为最大、最小电出力时进汽量不变时抽取单位供热热量下发电功率的减小量; $K$ 为常数; $h_{med}$ 为机组发电功率最小时的汽轮机供热功率; $h_{T,max}$ 为机组的最大供热出力; $h_{fmax}$ 为配置储热装置后供热功率的提升值; $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 分别为储热前抽汽式机组在纯凝工况下最小、最大电功率; $P_L$ 为储热后抽汽式机组在纯凝工况下最小电功率; $P$ 为电功率; $h$ 为供热出力。

根据机组的电热特性,制定合理的灵活运行机

制。由于电热特性,储存热量在低谷时段获得的可再生能源接纳空间大于尖峰时段,因此储热量有限时,优先补偿低谷时段。同理,机组在尖峰段蓄热、低谷段放热,此时获得的可再生能源接纳空间量大于因尖峰蓄热最大出力减小而导致的接纳空间减少量。因此平时段蓄热不足时,可采用在尖峰段蓄热。依据这一理论,在不同蓄热情况时可采用图4的运行策略。

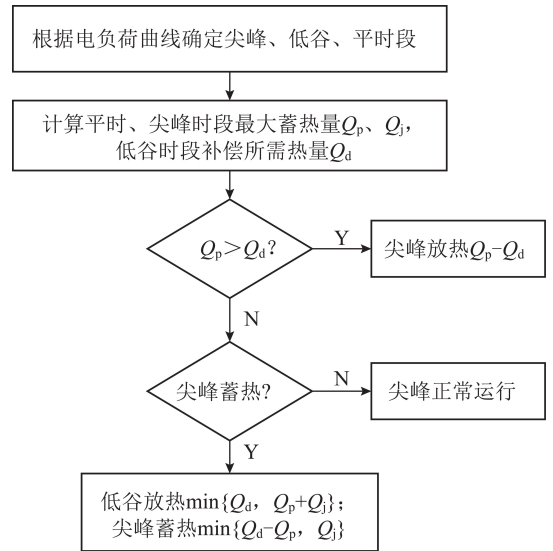


图4 配置储热后抽汽式机组运行机制

Fig.4 Operating mechanism of extraction unit with heat accumulator

张倩男<sup>[75]</sup>依据这一策略计算我国不同容量供热机组的调峰能力,结果表明储热后调峰容量明显高于储热前。

在适用于燃煤发电机组的3种储热技术中,热水储热技术以稳定、响应快、投资低的优势在热电联产机组中得到广泛应用,但热水储热能量密度低,斜温层稳定性较差限制其在大容量燃煤机组上的应用。相变填充床储热技术虽然相对热水储热技术增大了能量密度,但斜温层性能下降且在小流量时更能体现热力性能的优点,因此相变填充床更适用于小型供热机组。熔盐储热技术能量密度和热稳定性更高,特别适用于燃煤机组的高温领域,不仅可应用于热电联产机组,也可在纯凝机组调峰领域发挥优势,因此将熔盐储热技术应用于燃煤发电机组深度调峰正成为新的研究趋势。

燃煤发电-储热耦合技术利用储热装置补偿供热不足或储存多余热量,实现热电解耦,提升燃煤机组的调峰能力。通过储热前后的燃煤机组电热特性计算模型,定量计算出储热后燃煤机组的调峰容量。根据燃煤机组的电热特性与储能装置的储热能力,结合机组承担负荷变化的特点,制定燃煤机组的运行机制。依据这一理论,开发出一套包含燃煤机组



调峰模块、储能装置优化运行模块与耦合系统的优化运行机制决策模块的软件,对燃煤发电-耦合系统在实际的工程应用中具有重要意义。

### 3.2 燃煤发电-储热耦合系统评价指标

耦合系统的评价指标主要包括储热过程、放热过程与全过程的热效率、系统调峰容量与调峰裕度<sup>[10]</sup>。

1) 系统热效率:

$$\eta_c = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (P_{c,t} + Q_{c,t}) dt}{\int_{t_1}^{t_2} (Q_{b1,t}/\eta_{b,t}) dt} \times 100\%, \quad (14)$$

$$\eta_f = \frac{\int_{t_3}^{t_4} P_{f,t} dt}{\int_{t_3}^{t_4} (Q_{b2,t}/\eta_{b,t} + Q_{f,t}) dt} \times 100\%, \quad (15)$$

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{c,t} dt + \int_{t_3}^{t_4} P_{f,t} dt}{\int_{t_1}^{t_2} (Q_{b1,t}/\eta_{b,t}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (Q_{b2,t}/\eta_{b,t}) dt} \times 100\%, \quad (16)$$

式中, $\eta_c$ 、 $\eta_f$ 、 $\eta$ 分别为储热、放热和全过程系统热效率,%; $t_1$ 、 $t_2$ 分别为储能过程起止时刻,s; $t_3$ 、 $t_4$ 分别为放热过程起止时刻,s; $P_{c,t}$ 、 $P_{f,t}$ 分别为 $t$ 时刻储热、放热过程系统电功率,kW; $Q_{c,t}$ 、 $Q_{f,t}$ 分别为 $t$ 时刻储热负荷和放热负荷,kW; $Q_{b1,t}$ 、 $Q_{b2,t}$ 分别为 $t$ 时刻储热、放热过程火电厂锅炉输出热负荷,kW; $\eta_{b,t}$ 为 $t$ 时刻锅炉效率,%。

2) 调峰容量和调峰裕度:

$$\Delta P_{c,t} = P_0 - P_{c,t}; \xi_{c,t} = \frac{\Delta P_{c,t}}{P_e} \times 100\%, \quad (17)$$

$$\Delta P_{f,t} = P_{f,t} - P_e; \xi_{f,t} = \frac{\Delta P_{f,t}}{P_e} \times 100\%, \quad (18)$$

$$\Delta P_t = \Delta P_{c,t} + \Delta P_{f,t}; \xi_t = \xi_{c,t} + \xi_{f,t}, \quad (19)$$

式中, $\Delta P_{c,t}$ 、 $\Delta P_{f,t}$ 、 $\Delta P_t$ 分别为 $t$ 时刻储热、放热与全过程系统增加的调峰容量,kW; $P_{c,t}$ 、 $P_{f,t}$ 分别为储热、放热过程系统输出电功率,kW, $P_0$ 、 $P_e$ 分别为中间负荷、额定工况输出电功率,kW; $\xi_{c,t}$ 、 $\xi_{f,t}$ 、 $\xi_t$ 分别为 $t$ 时刻储热、放热与全过程耦合系统增加的调峰裕度,%。

依据热效率、调峰容量与调峰裕度指标对燃煤发电-耦合系统性能进行评价。系统运行过程中,储放热过程交替进行,也存在不储热、不放热的过程。因此对于系统运行过程中评价指标的计算方法应尽可能准确。

### 3.3 含耦合系统的电热综合调度模型

燃煤发电-储热耦合系统旨在提升燃煤机组的调峰能力,使得电网为风电、光电等可再生能源提供更多的消纳空间。但由于我国电力市场处于集中调度环境下,没有实时电价的引导<sup>[76]</sup>,要充分利用燃煤发电-储热耦合系统消纳可再生能源的收益,需要建立含耦合系统的电热综合调度模型,从系统层面实现最优经济运行。综合系统调度模型包括目标函数与调度约束。

学者们从多个角度建立了综合系统的目标函数。崔杨等<sup>[77]</sup>构建了以降低硫磺排放为目标的含储热热电联产机组与风电联合调度的目标函数,同时在目标函数中考虑了系统的运行与维护成本。李守东等<sup>[78]</sup>建立了以风电消纳量最大和系统运行成本最低为目标的热电联合系统调度的目标函数。戴远航等<sup>[79]</sup>提出了以不同风电场景下联合系统的收益期望为目标函数的风电-热电联产联合运行调度模型。文献<sup>[80]</sup>引入分时电价机制同时考虑了弃风惩罚费用,建立了以热电厂和风电场总收益为目标函数的系统调度模型。

综合系统调度模型中的调度约束包括系统约束、机组约束,储热方式的调度约束<sup>[81-82]</sup>。其中系统约束包括电力平衡约束、供热约束、可再生能源出力约束(这里以风电为例)(式(20)~(22))。机组约束包括机组的电功率约束、热功率约束、爬坡速度约束(式(23)~(25))。储热方式的约束包括储热装置的蓄、放热能力约束、容量约束(式(26)~(27))。

1) 电力平衡约束:

$$\sum_{i \in N} P_i^t + P_{\text{wind}}^t - P_{\text{out}}^t = P^t, \quad (20)$$

式中, $N$ 为燃煤机组集合; $P_i^t$ 为机组的发电功率; $P_{\text{wind}}^t$ 为 $t$ 时刻并网的风电功率; $P_{\text{out}}^t$ 为 $t$ 时刻向外输出电量; $P^t$ 为系统 $t$ 时刻电负荷。

2) 供热约束:

$$\sum_{i \in M} h_i^t \geq h^t, \quad (21)$$

式中, $M$ 为供热机组的集合; $h_i^t$ 为机组的热功率; $h^t$ 为 $t$ 时刻热电厂承担的热负荷。

3) 风电出力约束:

$$P_{\text{wind}}^t \leq P_{\text{wind,fore}}^t, \quad (22)$$

其中, $P_{\text{wind,fore}}^t$ 为 $t$ 时刻预测的风电功率。由于风电、光电的反调峰特性,目前有多种对风电、光电功率的预测方法<sup>[83-84]</sup>。

4) 机组电功率约束:

$$P_i^t \geq \min\{c_{m,i}h_i^t + K_i, P_{\min,i} - c_{v2,i}h_i^t\}, \quad (23)$$

$$P_i^t \leq P_{\max,i} - c_{v2,i}h_i^t$$

式中,  $P_{\min,i}$ 、 $P_{\max,i}$ 分别为机组  $i$  最小、最大电功率;  $K_i$  为常数。

5) 机组热功率约束:

$$0 \leq h_i^t \leq h_{\max,i}, \quad (24)$$

式中,  $h_{\max,i}$ 为机组热功率最大值。

6) 机组爬坡速率约束:

$$\begin{aligned} \overline{P_i^t} - \overline{P_i^{t-1}} &\leq P_{\text{up},i} \\ \overline{P_i^{t-1}} - \overline{P_i^t} &\leq P_{\text{down},i} \end{aligned}, \quad (25)$$

式中,  $P_{\text{up},i}$ 、 $P_{\text{down},i}$ 为机组向上、向下爬坡速度约束。

7) 储热装置的蓄放热能力约束:

$$\begin{aligned} H_h^t - H_h^{t-1} &\leq P_{h,\text{cmax}} \\ H_h^{t-1} - H_h^t &\leq P_{h,\text{dmax}} \end{aligned}, \quad (26)$$

式中,  $H_h^t$ 为储热装置  $t$  时刻的储热量;  $P_{h,\text{cmax}}$ 、 $P_{h,\text{dmax}}$ 分别为储热装置最大蓄热、放热功率。

8) 储热装置的容量约束:

$$H_h^t \leq P_{h,\text{max}}, \quad (27)$$

式中,  $P_{h,\text{max}}$ 为储热装置的容量。

在系统约束条件上,加入系统某一指标为目标函数,共同构成系统综合调度模型。在电热综合调度模型中,燃煤机组与储热装置的计算模型较准确,但风电等可再生能源的预测功率不准确,这归因于可再生能源的不确定性。预测误差与储热系统的利用效率密切相关,针对特性地域的风电预测模型应经过多场景验证,逐步优化,尽可能减小预测误差。以综合模型作为调度系统合理安排配置储热后系统运行规划的决策工具,达到提升综合系统、消纳可再生能源水平及移峰填谷的目标,对构建新型电力系统具有重要意义。

## 4 结语与展望

可再生能源的发展为占据我国主要电力供应的燃煤机组调节能力带来了挑战。燃煤机组深度调峰是解决新能源与传统能源之间矛盾的主要措施。储能技术利用其对热能的灵活性存储,最大化提高能源利用率。燃煤-储能耦合技术通过热电解耦,提升燃煤机组的调峰能力与灵活运行特性,为新能源上网提供空间。燃煤发电机组仍是我国电力供应的主要来源,燃煤发电-储能耦合技术在可再生能源快速发展的背景下有广阔的发展潜力,未来耦合技术发展可从以下4方面进行:

1) 提升热水储热装置循环运行过程中的热力

性能。研究表明,随循环次数的增加,热水储热装置的储放热效率不断降低,斜温层性能逐渐下降,因此可以进行热水储热装置的结构优化,加强循环运行过程中的斜温层研究。

2) 提升相变填充床储热装置运行过程中的斜温层性能。由于填充床的存在,虽提升了储能密度,但斜温层性能弱于热水储热,因此需在二者之间平衡,既保证较高的储能密度,同时兼顾较好的斜温层性能。

3) 熔盐储热技术在我国燃煤发电机组中目前还未实际应用,研究多停留于数值模拟阶段。熔盐储热系统在燃煤发电机组中的取热位置、取热方式、放热位置还需进一步研究,旨在得到耦合系统高效的运行方式。

4) 电热综合调度模型中风电等可再生能源的预测模型需进一步完善。可再生能源存在不确定性,预测误差对储热系统的运行方式影响较大。因此不同地域的可再生能源电功率预测模型应经过多场景验证,减小预测误差,从而提升耦合系统运行效率。

## 参考文献 (References):

- [1] 范庆伟,兰凤春,李文杰,等. 热电联产机组增设储热水罐容量配置研究[J]. 热力发电,2021,50(3):98-105.  
FAN Qingwei, LAN Fengchun, LI Wenjie, et al. Capacity designing for a combined heat and power plant assisted by water storage tank [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 98-105.
- [2] 戈志华,陈玉勇,李沛峰,等. 基于当量抽汽压力的大型热电联产供热模式研究[J]. 动力工程学报,2014,34(7):569-575.  
GE Zhihua, CHEN Yuyong, LI Peifeng, et al. Study on heating mode of a large heat and power cogeneration unit based on equivalent extraction pressure [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(7): 569-575.
- [3] 杨利,刘永林,房伟,等. 配置储热罐后热电联产机组运行优化[J]. 热力发电,2020,49(4):70-76.  
YANG Li, LIU Yonglin, FANG Wei, et al. Operation optimization of cogeneration unit equipped with heat accumulator [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(4): 70-76.
- [4] 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.
- [5] 柳文洁. 热水蓄热罐在热电联产供热系统中的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [6] LEPIKSAAR K, MASATIN V, LATOESOV, et al. Improving CHP flexibility by integrating thermal energy storage and power-to-heat technologies into the energy system [J]. Smart Energy, 2021, 2:100022.
- [7] 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]. *China Science Bull*, 2017, 62: 1602-1610.
- [8] 苏雪刚, 卢丽坤, 唐卉. 大型蓄热水罐在热电解耦中的应用[J]. *锅炉制造*, 2018(1): 46-48.  
SU Xuegang, LU Likun, TANG Hui. Application of a large thermal storage in thermoelectric decoupling [J]. *Boiler Manufacturing*, 2018(1): 46-48.
- [9] BAO Z, YE Y, LIU R, et al. Scheduling coordination of back pressure CHP coupled electricity-heat energy system with adaptive constraint strategy to accommodate uncertain wind power [J]. *Energy*, 2022, 240: 122791.
- [10] 朱超, 吴鹏举, 王永庆, 等. 超超临界锅炉流动不稳定性的形成机理及研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(1): 32-40.  
ZHU Chao, WU Pengju, WANG Yongqing, et al. Formation mechanism and research progress of flow instability in ultra-supercritical boiler [J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(1): 32-40.
- [11] 张旭辉, 杨兴森, 辛刚, 等. 燃煤火电机组深度调峰运行试验研究[J/OL], *洁净煤技术*: 1-8 [2021-10-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211027.1552.002.html>.  
ZHANG Xuhui, YANG Xingsen, XIN Gang, et al. Experimental study on deep peak regulation operation of coal-fired thermal power unit [J]. *Clean Coal Technology*: 1-8 [2021-10-21]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20211027.1552.002.html>.
- [12] 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.
- [13] RINNE S, SYRI S. The possibilities of combined heat and power production balancing large amounts of wind power in Finland [J]. *Energy*, 2015, 82: 1034-1046.
- [14] BENALCAZAR P, KAMINNSKI J. Optimizing CHP operational planning for participating in day-ahead power markets: The case of a coal-fired CHP system with thermal energy storage [J/OL]. *Mathematical Modelling of Contemporary Electricity Markets*: 237-258 [2021-01-01]. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821838-9.00014-1>.
- [15] 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.
- [16] LI D, WANG J. Study of supercritical power plant integration with high temperature thermal energy storage for flexible operation [J]. *Journal of Energy Storage*, 2018, 20: 140-152.
- [17] GARBRECHT O, BIEBER M, KNEER R. Increasing fossil power plant flexibility by integrating molten-salt thermal storage [J]. *Energy*, 2017, 118: 876-883.
- [18] 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): 2682-2691.  
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): 2682-2691.
- [19] 钱怡洁. 单罐斜温层蓄热性能实验研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [20] 张婷. 分布式蓄热在集中供热系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [21] 姜竹, 邹博杨, 丛琳, 等. 储热技术研究进展与展望[J/OL]. *储能科学与技术*: 1-26 [2022-04-02]. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0538.  
JIANG Zhu, ZOU Boyang, CONG Lin, et al. Recent progress and outlook of thermal energy storage technologies [J/OL]. *Energy Storage Science and Technology*: 1-26 [2022-04-02]. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0538.
- [22] TAFONE A, BORRI E, CABEZA L F, et al. Innovative cryogenic Phase Change Material (PCM) based cold thermal energy storage for Liquid Air Energy Storage (LAES)-numerical dynamic modeling and experimental study of a packed bed unit [J]. *Applied Energy*, 2021, 301: 117417.
- [23] 李刚, 侯庆州, 李钊. 长输热力管网中蓄热罐的稳压作用研究[J]. *区域供热*, 2021(5): 34-43.  
LI Gang, HOU Qingzhou, LI Zhao. Research on pressure stabilization of heat storage tank in long-distance heat pipe network [J]. *District Heating*, 2021(5): 34-43.
- [24] MAHON H, O'CONNOR D, FRIEDRIC D, et al. A review of thermal energy storage technologies for seasonal loops [J]. *Energy*, 2022, 239: 122207.
- [25] OLIVKAR P R, KATEKAR V P, DESHMUKH S S, et al. Effect of sensible heat storage materials on the thermal performance of solar air heaters: State-of-the-art review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 157: 112085.
- [26] FARZAN H, ZAIM E H. Feasibility study on using asphalt pavements as heat absorbers and sensible heat storage materials in solar air heaters: An experimental study [J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 44: 103383.
- [27] SALMAN C A, LI H L, LI P, et al. Improve the flexibility provided by combined heat and power plants (CHPs): A review of potential technologies [J]. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering Electronics and Energy*, 2021, 1: 00023.
- [28] 刘璇, 郝学军, 宋孝春. 基于CFD模拟蓄冷水罐分层效果的影响因素分析[J]. *区域供热*, 2016(2): 11-16.  
LIU Xuan, HAO Xuejun, SONG Xiaochun. Analysis of factors influencing the stratification effect of water storage tanks based on CFD simulation [J]. *District Heating*, 2016(2): 11-16.
- [29] 戈志华, 张飞宇, 张允俊. 斜温层单体蓄热罐性能改进的模拟研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(3): 773-781.  
GE Zhihua, ZHANG Feiyu, ZHANG Youjun. Simulation on performance improvement of single thermocline energy storage tank [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(3): 773-781.
- [30] RAHMAN A, SMITH A D, FUMO N. Performance modeling and

- parametric study of a stratified water thermal storage tank[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 668-679.
- [31] DOGAN E, NECDET A. Improved thermal stratification with obstacles placed inside the vertical mantled hot water tanks[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 354-360.
- [32] ABDELHAK O, MHIRI H, BOURNOT P. CFD analysis of thermal stratification in domestic hot water storage tank during dynamic mode[J]. Building Simulation, 2015, 8(4): 421-429.
- [33] YANG Z, CHEN H, WANG L. Comparative study of the influences of different water tank shapes on thermal energy storage capacity and thermal stratification[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 31-44.
- [34] 王小惠, 何兆禹, 徐超, 等. 斜温层单罐储热同时蓄放热过程特性模拟[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 5989-5998.  
WANG Xiaohui, HE Zhaoyu, XU Chao, et al. Dynamic simulations on simultaneous charging/discharging process of water thermocline storage tank[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 5989-5998.
- [35] 苏雪刚, 卢丽坤, 唐卉. 大型蓄热水罐在热电耦中的应用[J]. 锅炉制造, 2018(1): 46-48.  
SU Xuegang, LU Likun, TANG Hui. Application of a large thermal storage in thermoelectric decoupling[J]. Boiler Manufacturing, 2018(1): 46-48.
- [36] 于浩. 温度分层储能水箱散热器设计及分层特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [37] 陈颖, 姜庆辉, 辛集武, 等. 相变储能材料及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2019, 47(7): 1-10.  
CHEN Ying, JIANG Qinghui, XIN Jiwu, et al. Research status and application of phase change materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(7): 1-10.
- [38] 林文珠, 凌子夜, 方晓明, 等. 相变储热的传热强化技术研究进展[J]. 化工进展, 2021, 40(9): 5166-5178.  
LIN Wenzhu, LING Ziye, FANG Xiaoming, et al. Research progress on heat transfer of phase change material heat storage technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9): 5166-5178.
- [39] ZHAO B, LI C, JIN Y, et al. Heat transfer performance of thermal energy storage components containing composite phase change materials[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(10): 1515-1522.
- [40] JOHNSON M, VOGEL J, HEMPEL M, et al. Design of high temperature thermal energy storage for high power levels[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 35: 758-763.
- [41] SUN B, LIU Z, JI X, et al. Thermal energy storage characteristics of packed bed encapsulating spherical capsules with composite phase change materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 201: 117659.
- [42] KUMAR G S, NAGARJAN D, CHIDAMBARAM L A, et al. Role of PCM addition on stratification behavior in a thermal storage tank: An experimental study[J]. Energy, 2015, 115: 1179-1187.
- [43] YANG L, ZHANG X, XU G. Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points[J]. Energy and Buildings, 2014, 68: 639-646.
- [44] RAMANA A S, VENKATESH R, RAJ V A, et al. Experimental investigation of the LHS system and comparison of the stratification performance with the SHS system using CFD simulation[J]. Solar Energy, 2014, 103: 378-389.
- [45] KOIDE H, KURNIAWAN A, TAKAHASHI T, et al. Performance analysis of packed bed latent heat storage system for high-temperature thermal energy storage using pellets composed of micro-encapsulated phase change material[J]. Energy, 2022, 238: 121746.
- [46] NITHYANANDAM K, PITCHUMANI R, MATHUR A. Analysis of a latent thermocline storage system with encapsulated phase change materials for concentrating solar power[J]. Applied Energy, 2014, 113: 1446-1460.
- [47] NITHYANANDAM K, PITCHUMANI R. Optimization of an encapsulated phase change material thermal energy storage system[J]. Solar Energy, 2014, 107: 770-788.
- [48] HE Z, WANG X, DU X, et al. Experiments on comparative performance of water thermocline storage tank with and without encapsulated paraffin wax packed bed[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 188-197.
- [49] HE Z, WANG X, DU X, et al. Cyclic characteristics of water thermocline storage tank with encapsulated PCM packed bed[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 139: 1077-1086.
- [50] 张开军. 太阳能光热电站有关消防设计问题的探讨[J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 75-80.  
ZHANG Kaijun. Design discussion on the fire fighting for solar power plant[J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(2): 75-80.
- [51] YUAN F, LI M, MA Z, et al. Experimental study on thermal performance of high-temperature molten salt cascaded latent heat thermal energy storage system[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 997-1011.
- [52] 王志峰, 杜凤丽. 2015—2022年中国太阳能热发电发展情景分析及预测[J]. 太阳能, 2019, 307(11): 7-12, 71.  
WANG Zhifeng, DU Fengli. China solar thermal power development scenario analysis and forecast 2015-2022[J]. Solar Energy, 2019, 307(11): 7-12, 71.
- [53] 时华, 方文峰, 朱义凡, 等. 熔盐储罐预热过程的实验和模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5972-5978.  
SHI Hua, FANG Wenfeng, ZHU Yifan, et al. Experimental and numerical investigation on preheating process of molten salt storage tank[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5972-5978.
- [54] PRIETO C, OSUNA R, FEMÁNDEZ A I, et al. Thermal storage in a MW scale. Molten salt solar thermal pilot facility: Plant description and commissioning experiences[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 852-866.
- [55] ELSIHY E S, LIAO Z R, XU C, et al. Dynamic characteristics of solid packed-bed thermocline tank using molten-salt as a heat transfer fluid[J]. International Journal of Heat and Mass

- Transfer, 2021, 165: 120677.
- [56] TORRAS S, PÉREZ-SEGARRA C D, RODRÍGUEZ I, et al. Parametric study of two-tank TES systems for CSP plants [J]. Energy Procedia, 2015, 69: 1049-1058.
- [57] ZHANG C, LU Y, SHI S, et al. Comparative research of heat discharging characteristic of single tank molten salt thermal energy storage system [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 161: 106704.
- [58] YIN H, DING J, JIANG R. Thermocline characteristics of molten-salt thermal energy storage in porous packed-bed tank [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 855-863.
- [59] 李亚楠, 杜中玲, 陈九法. 基于 ANSYS 的小型双罐储热系统模拟研究 [J]. 发电设备, 2017, 31(1): 18-22, 29.  
LI Yanan, DU Zhongling, CHEN Jiufa. Simulation of a small-scale double tank thermal storage system based on ANSYS [J]. Power Equipment, 2017, 31(1): 18-22, 29.
- [60] SUÁREZ C, PINO F J, ROSA F, et al. Heat loss from thermal energy storage ventilated tank foundations [J]. Solar Energy, 2015, 122: 783-794.
- [61] SUÁREZ C, IRANZO A, PINO F J, et al. Transient analysis of the cooling process of molten salt thermal storage tanks due to standby heat loss [J]. Applied Energy, 2015, 142: 56-65.
- [62] WAN Z, WEI J, MUMTAZ A, et al. Evaluation on thermal and mechanical performance of the hot tank in the two-tank molten salt heat storage system [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 167: 114775.
- [63] 林俊光, 仇秋玲, 罗海华, 等. 熔盐储热技术的应用现状 [J]. 上海电气技术, 2021, 14(2): 70-73.  
LIN Junguang, CHOU Qiuling, LUO Haihua, et al. Current status of application of molten salt thermal storage technology [J]. Shanghai Electric Technology, 2021, 14(2): 70-73.
- [64] 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.
- [65] 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.
- [66] 时正海, 茹宇, 高烘培, 等. 一种锅炉高温烟气熔盐储热装置及其工作方法: CN111365710A [P]. 2020-07-03.
- [67] MOHAMED F, DANIEL M, PHILIP C E. Thermal performance analysis of compact thermal energy storage unit: An experimental study [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 173: 121262.
- [68] KUMAR A, AGRAWAL R. An experimental investigation of cylindrical shaped thermal storage unit consisting of phase change material based helical coil heat exchanger [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 45: 103795.
- [69] WANG Z, ZHANG H, DOU B, et al. The thermal stratification characteristics affected by a novel equalizer in a dynamic hot water storage tank [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 126: 1006-1016.
- [70] MAO Q, LI Y, CHEN M. Design and investigation of single tank phase change thermal storage domestic hot water system [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 25: 100903.
- [71] BOUHAL T, FERTAH S, AGROUAZ Y, et al. Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study [J]. Solar Energy, 2017, 147: 441-455.
- [72] RAHMAN A, SMITH A D, FUMO N. Performance modeling and parametric study of a stratified water thermal storage tank [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 668-679.
- [73] WANG Z, ZHANG H, DOU B, et al. Experimental and numerical research of thermal stratification with a novel inlet in a dynamic hot water storage tank [J]. Renewable Energy, 2017, 111: 353-371.
- [74] BRUCH A, MOLINA S, ESENCE T, et al. Experimental investigation of cycling behavior of pilot-scale thermal oil packed-bed thermal storage system [J]. Renewable Energy, 2017, 103: 277-285.
- [75] 张倩男. 热水蓄热罐蓄热特性及容量与热电联产机组调峰能力的匹配研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019: 23-69.
- [76] 张鸿宇, 王宇. 国外电网侧储能电站参与调频辅助服务市场的机制经验及对我国的启示 [J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 766-773.  
ZHANG Hongyu, WANG Yu. Mechanism experience of foreign grid-side storage participating in frequency regulation auxiliary service market and its enlightenment to China [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 766-773.
- [77] 崔杨, 杨志文, 仲悟之, 等. 降低硫硝排放的含储热热电联产机组与风电联合调度策略 [J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1063-1070.  
CUI Yang, YANG Zhiwen, ZHONG Wuzhi, et al. A joint scheduling strategy of CHP with thermal energy storage and wind power to reduce sulfur and nitrate emission [J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1063-1070.
- [78] 李守东, 董海鹰, 张蕊萍, 等. 考虑风电消纳的电热联合系统多源协调优化运行 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2217-2225.  
LI Shoudong, DONG Haiying, ZHANG Ruiping, et al. Multi-source coordination and optimization operation of combined heat and power system considering wind power consumption [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2018, 39(8): 2217-2225.
- [79] 戴远航, 陈磊, 闵勇, 等. 风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3470-3479.  
DAI Yuanhang, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Optimal dispatch for joint operation of wind farm and combined heat and power plant with thermal energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2017,

- 37(12):3470-3479.
- [80] 崔杨,纪银锁,仲悟之,等. 基于电-热联合储能的弃风消纳调度方法[J]. 太阳能学报,2021,42(12):192-199.  
CUI Yang,JI Yinsuo,ZHONG Wuzhi, et al. Dispatching method of wind power curtailment based on electric-thermal combined energy storage[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2021,42(12):192-199.
- [81] 张文韬,王秀丽,李言,等. 大规模风电并网下多区域互联系统热电综合调度模型[J]. 电网技术,2018,42(1):154-161.  
ZHANG Wentao,WANG Xiuli,LI Yan, et al. An analysis model of multi-area interconnected power systems with large-scale wind power involved in comprehensive heating and power system scheduling[J]. Power system technology, 2018, 42(1):154-161.
- [82] 杨晓萍,刘浩杰,黄强. 考虑分时电价的风光储联合“削峰”优化调度模型[J]. 太阳能学报,2018,39(6):1752-1760.  
YANG Xiaoping,LIU Haojie,HUANG Qiang, et al. Optimal dispatching model of wind-sunlight-storage combining with "peak shaving" considering time-of-use electricity price[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2018,39(6):1752-1760.
- [83] 李大中,李颖宇. 基于深度学习与误差修正的超短期风电功率预测[J]. 太阳能学报,2021,42(12):200-205.  
LI Dazhong,LI Yingyu. Ultra-short term wind power prediction based on deep learning and error correction[J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2021,42(12):200-205.
- [84] 靳瑞强,马广昭,耿立卓. 基于PSO-BP神经网络的光伏发电功率预测方法[J]. 信息技术,2021,12:147-152.  
JIN Ruiqiang,MA Guangzhao,GENG Lizhuo. Prediction method of photovoltaic power based on PSO-BP neural network[J], Information Technology,2021,12:147-152.