文章编号:1001-2060(2025)03-0100-08

光煤互补热电联产电厂耦合储热系统调峰性能研究

肖卓楠,安 尧,刘英琦

(内蒙古科技大学能源与环境学院,内蒙古包头014010)

摘 要:针对太阳能辐射功率不稳定性导致光煤互补热电联产机组在不同时段调峰范围相差较大的问题,以某电 厂300 MW 热电联产机组为研究对象,利用 Ebsilon Professional 软件搭建耦合储热光煤互补热电联产系统模型,基 于典型日实际气象数据,研究在不同供热功率和太阳能辐射功率下储热系统对光煤互补热电联产机组调峰性能及 收益的影响。结果表明:耦合储热后光煤互补热电联产机组运行更稳定,同时机组调峰范围扩大,供热功率越高调 峰范围扩大越明显;在火电机组供热最小运行方式下,白天太阳能辐射功率最大时耦合储热后光煤互补热电联产 机组调峰容量提高 37.87%,夜间耦合储热后光煤互补热电联产机组调峰容量提高 140.62%;耦合储热机组调峰补 偿收益更明显,无储热机组由于集热器热损失的影响夜间调峰补偿收益略低于原始热电联产机组。

关键 词:太阳能;光热发电;热电联产;调峰;储热

中图分类号:TM611.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.03.012

[引用本文格式]肖卓楠,安 尧,刘英琦. 光煤互补热电联产电厂耦合储热系统调峰性能研究[J]. 热能动力工程,2025,40(3): 100-107. XIAO Zhuonan, AN Yao, LIU Yingqi. Study on peak shaving performance of solar-coal complementary cogeneration power plants with coupled thermal storage systems[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2025,40(3):100-107.

Study on Peak Shaving Performance of Solar-Coal Complementary Cogeneration Power Plants with Coupled Thermal Storage Systems

XIAO Zhuonan, AN Yao, LIU Yingqi

(School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, Post Code: 014010)

Abstract: To address the issue of significant differences in the peak-shaving range of solar-coal complementary cogeneration units during different time periods due to the instability of solar radiation power, taking a 300 MW cogeneration unit from a certain power plant as the research object, using the Ebsilon Professional software, a model of solar-coal complementary cogeneration unit with coupled thermal storage system was established. Based on actual meteorological data from typical days, the effects of the thermal storage system on the peak-shaving performance and benefits of the solar-coal complementary cogeneration unit under different heat supply power and solar radiation power were investigated. The results show that the operation of the solar-coal complementary cogeneration unit becomes more stable after coupling with thermal storage, and the peak-shaving range of the unit is expanded, with a more pronounced expansion as the heat supply power increases. Under the minimum operating mode for heat supply of the thermal power unit, the peak-shaving capacity of the coupled solar-coal complementary cogeneration unit increases by 37. 87% during the day when solar radiation power is at its maximum, and by 140. 62% at night after coupling with thermal storage. The peak-shaving compensation benefits of the coupled thermal storage

收稿日期:2024-09-19; 修订日期:2024-11-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51966016);内蒙古自然科学基金资助项目(2022MS05036)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51966016); Inner Mongolia Natural Science Foundation (2022MS05036) 作者简介: 肖卓楠(1980 -), 女, 内蒙古科技大学副教授.

· 101 ·

unit are more significant. Due to the heat loss of the collector, the peak-shaving compensation benefits of the unit without thermal storage at night are slightly lower than those of the original cogeneration unit. **Key words:** solar energy, solar thermal power generation, cogeneration, peak shaving, thermal storage

引 言

我国北方地区,火电机组承担供热调峰的任务。 在采暖季,为了确保供热质量,机组通常采取"以热 定电"的运行方式,即根据热负荷的需求来调节发 电功率^[1]。这种运行方式严重限制了机组本身的 调峰能力,影响电力供应的稳定性和可靠性。

为解决这一问题,众多学者依靠多元化能源结 构,将燃煤热电联产技术与光热发电技术结合,大大 提高电力系统的灵活性,减轻火电机组的调峰压力。 侯宏娟等人^[2]采用 TRNSYS 仿真平台对 300 MW 太 阳能辅助燃煤机组热经济性进行了分析。结果显 示,互补发电系统在4至8月份所增加的功率达到 最大值:此外.太阳能的利用小时数在夏至日达到最 高,冬至日最低。ZHAI 等人^[3]评估了一种集成太 阳能的新型太阳能辅助热电联产统的热力学性能和 运行灵活性。结果表明,该系统在白天和夜间的平 均净能量效率、平均净效率均有所提高。Ding 等 人^[4]提出了一种新型太阳能辅助热电联产系统,太 阳能热可以灵活地用于发电或根据供热和用电需求 进行供热,从而实现热电解耦。结果表明,在相同的 额定供热功率下太阳能辅助供热系统可以显著提高 调峰容量。李斌等人^[5]利用 Ebsilon 软件模拟槽式 太阳能集热系统与燃煤机组耦合,并在耦合基础上 设置储热装置,大大提升了机组节煤量,提高了机组 灵活性。肖卓楠等人^[6]分析太阳能辅助双机热电 联产机组耦合方式,比较耦合前后双机调峰性能。 结果表明,太阳能辅助承担最大供热负荷的1号机 组在调峰容量及调峰补偿上效果最佳。高佳圣等 人^[7]提出了一种太阳能辅助的高背压热电联产系 统。研究结果表明,该系统在低发电功率、较高背压 和较低热网供回水温度的条件下,能够提高煤的利 用率、提升系统的//// 規文率,并显著增加经济效益。

目前针对光煤互补热电联产机组的研究已较为 深入。燃煤机组耦合光热系统后,在一定程度上提 高了机组调峰性能,但由于太阳能辐射功率存在不 稳定性使光煤互补热电联产机组太阳能场侧输出功 率产生波动,不能随燃煤机组侧需求功率灵活调节, 大大限制了光煤互补热电联产机组调峰灵活性。

本文基于 Ebsilon Professional 仿真模拟软件,在 300 MW 光煤互补热电联产机组基础上耦合储热系 统,优化上述光煤互补热电联产机组中存在的缺陷。 重点研究典型日内各时段太阳能辐射功率和机组供 热功率对耦合储热前后光煤互补热电联产机组调峰 容量、调峰收益的影响。

1 系统介绍

本文设计将耦合储热太阳能集热系统与 300 MW 热电联产机组耦合,提高机组发电与供热性 能^[8]。选取对象为某热电厂 300 MW 热电联产机 组,共设 7 级抽汽,回热系统为三高三低一除氧(3 台高压加热器 +1 台除氧器 +3 台低压加热器),原 始燃煤热电联产机组流程图如图 1 所示。





无储热光煤互补热电联产机组如图2所示。集 热系统利用集热场产生的热替代汽轮机中压缸部分 抽汽,被替代的抽汽进入低压缸继续做功;集热系统 产生的热替代部分供热抽汽为热网供热。

耦合储热光煤互补热电联产机组如图 3 所示,

储热阶段,导热油从冷罐流出,经过太阳能场吸收热 量一部分进入热罐存储,一部分经过太阳能辅助供 热换热器与太阳能辅助发电换热器作功;放热阶段, 热罐内导热油流入太阳能辅助供热换热器与太阳能 辅助发电换热器作功,回到冷罐存储。



图 2 无储热光煤互补热电联产机组流程图 Fig. 2 Flowchart of a solar-coal complementary cogeneration unit without thermal storage





cogeneration unit with coupled thermal storage system

2 模型搭建

2.1 太阳能辐射数据

选取40.6°N/109.9°E 地区2021年1月1日气 象数据为依据,环境温度数据如图4所示^[9],太阳入 射角、法向直射辐照度数据如图5所示。





3750 法向直射辐照度 90 太阳入射角 3500 m^{-2} 80 法向直射辐照度/W· 3250 70 3000 60 2750 大阳、 50 2500 40 2250 2000 408:17 408:57 14:30 b . 1,30 ⊾ **■**00:</ ^d:30 ⊢ ^{_9}.⁹ 30 13:30 0;0 +00; 10:30 时刻

图 5 太阳入射角、法向直射辐照度随时间变化 Fig. 5 Variation of solar incidence angle and normal direct radiance with time

根据文献[10]的研究可知,不能单一地从法向 直射辐照度判断太阳能辐射热功率大小。需根据不 同时间的法向直射辐照度(DNI)、环境温度、太阳入 射角计算太阳能辐射热功率。图4和图5中给出的 环境温度、法向直射角和太阳能入射角为集热场数 字模型计算提供依据。

2.2 集热场模型

太阳能集热场由一定数量集热器组成,集热器 选用 PT Eurotrough 椭型槽式太阳能集热器,集热场 中集热器数量为 343 个。太阳能集热器参数如表 1 所示^[11]。

表1 PT Eurotrough 椭型槽式太阳能集热器参数

Tab. 1 Parameters of PT Eurotrough elliptical trough solar collector

参 数	数值
总光圈宽度 W _e /m	5.7
集热器长度 L_e/m	150
最大光学效率 f_e	0.75
光圈的光学有效面积比率 η_e	0.95
镜面吸收器焦距长度/m	1.71
行间距/m	17.28
分离器内径/m	0.065 4
采集器压力损失/MPa	1.5
管道热损失 Q_{pipe} /W·m ⁻²	20
聚焦度 R _{focus}	0.98
集热器净孔径宽度 W/m	5.45

单位时间内集热场有效输入功率:

$$P_{\rm eff} = M(h_2 - h_1)$$
 (1)

$$P_{\rm eff} = P_{\rm solar} \cdot R_{\rm focus} - Q_{\rm loss} - Q_{\rm pipe}$$
(2)

式中: P_{eff} —集热场有效输入功率,MW;M—集热场内 流体质量流量,t/h; h_2 —集热场入口流体焓,kJ/kg; h_1 —集热场出口流体焓,kJ/kg; P_{solar} —太阳能辐射 功率,MW; R_{focus} —聚焦度; Q_{loss} —单位时间内集热场 热损失,MW; Q_{pipe} —管道热损失,MW。

集热器吸收的太阳能辐射功率:

 $P_{\text{solar}} = \text{DNI} \cdot n \cdot L_e \cdot W_e \cdot \eta_e \cdot f_e \cdot \text{IAC}$ (3) 式中: DNI (Direct Normal Irradiance)—法向直射辐 照度, W/m²; n—集热器数量, 个; L_e —集热器长度, m; W_e —总光圈宽度, m; η_e —光圈光学有效面积比率; f_e —最大光学效率; IAC (Incident Angle Correction)— 入射角修正系数。

入射角修正系数:

IAC = 1 + 0.000 105 96 R_{solar} - 0.000 170 91 R_{solar}^2 (4)

式中:*R*_{solar}一太阳入射角度,(°)。 单位时间内集热场热损失:

$$Q_{\rm loss} = 0.017\ 25 \times n \times L_e \times W \times (T_1 + T_2 - 4T_3 + 2\bar{T})$$
(5)

$$T = 0.5T_1 + 0.5T_2 \tag{6}$$

式中:W-集热器净孔径宽度,m;T1-集热场入口温

度,K;T₂—集热场出口温度,K; *T*—集热场进出口 温度平均值,K;T₃—环境温度,K。

2.3 储热系统模型

本文使用双罐导热油储热系统耦合光煤互补热 电联产机组,储热罐参数如表2所示。

表2 储热罐基本参数

Tab. 2 Basic parameters of thermal storage tank

参 数	热罐	冷罐
体积/m ³	7 300	7 300
初始温度/K	390	193
比热损失/kW·(kg·K) ⁻¹	2	0.5
内部压力/MPa	2	2

储热系统运行模式如下:在白天太阳能辐射功 率高时,导热油从冷罐流出,经太阳能集热场加热流 入热罐,热罐出口流量稳定在476.861 t/h,其余导 热油在热罐内存储。夜晚太阳能辐射功率为0,热 罐内导热油流出,放热后回到冷罐,Therminol VP1 型导热油具体参数如表3 所示^[12]。

表 3 Therminol VP1 型导热油参数

Tab. 3 Therminol VP1 heat transfer oil parameters

参数	数值
运行温度/℃	0 ~400
密度/kg·m ⁻³	900
热导率/W·(m·K) ⁻¹	0.11
比热容/kJ·(kg·K) ⁻¹	2.3

质量平衡关系式:

 $m_t = m_{t-1} + (M_{t,in} - M_{t,out}) \cdot \Delta t$ (7)

式中: m_{t}, m_{t-1} —t 时和 t-1 时储热罐内工质质量, t; $M_{t,in}, M_{t,out}$ —t 时储热罐入口和出口质量流量, t/h; Δt —时间间隔, h。

能量平衡关系式:

$$h_{t} = \frac{h_{t-1} \cdot m_{t-1} + M_{t,\text{in}} \cdot h_{t,\text{in}} \cdot \Delta t}{m_{t-1} + M_{t,\text{in}} \cdot \Delta t} - Q_{\text{L}} \qquad (8)$$

式中: h_t —t时储热罐比焓,kJ/kg; h_{t-1} —t-1时储热 罐内比焓,kJ/kg; $h_{t,in}$ —流入储热罐流体比焓,kJ/kg; Q_L —储存时间间隔内单位质量热损失,kJ/kg。

2.4 原始热电联产机组模型验证

本文选取北方某电厂 300 MW 热电联产机组, 机组设计参数如表 4 所示^[13]。

表 4 机组设计参数

Tab. 4 Unit design parameters

参数	额定供热工况	最大供热工况
发电功率/MPa	240.9	227.062
主蒸汽压力/MPa	16.67	16.67
再热蒸汽压力/MPa	3.30	3.30
主蒸汽温度/℃	538	538
再热蒸汽温度/℃	538	538
主蒸汽质量流量/t·h ⁻¹	946.35	1 006.85
再热蒸汽质量流/t·h ⁻¹	794.001	845.06
供热蒸汽流量/t·h ⁻¹	400	600
供热负荷/MW	307.524	461.287

基于某电厂300 MW 机组热平衡图,利用 Ebsilon Professional 仿真模拟软件搭建太阳能辅助热电联产 系统,进行仿真研究。为验证模型准确性,模拟该电 厂额定供热工况,计算机组1~7号抽汽管道设计值 与模拟值相对误差,表5为计算结果。由图5可知, 相对误差在3%以内,符合工程规定。

表 5 额定供热工况燃煤热电联产机组验证结果 Tab. 5 Verification results of coal-fired cogeneration units under rated heating conditions

管道	抽汽温度/℃		抽汽流量 t/h			
	设计值	模拟值	误差/%	设计值	模拟值	误差/%
1号	390.23	390.98	0.19	70.43	69.59	1.19
2 号	322.75	323.20	0.14	75.74	74.43	1.73
3号	435.64	435.58	0.01	28.56	28.32	0.84
4 号	353.21	353.39	0.05	37.40	37.84	1.18
5号	255.85	255.77	0.03	400.00	400.67	0.17
6号	186.61	186.53	0.04	9.91	9.69	2.22
7 号	117.93	117.87	0.05	20.36	20.60	1.18

2.5 调峰评价模型

在供热季,当热电联产机组进行外部供热时,部 分中压缸的排汽会被抽走,导致低压缸的进汽量减 少。为了确保低压缸的冷却,进汽流量存在一个最 小限制。因此,在供热功率保持恒定的情况下,主蒸 汽流量也有最小限制,这就形成了最低电负荷。在 相同的供热负荷条件下,机组的最高电负荷与最低 电负荷之间的范围便是热电联产机组的调峰 区间^[14]。

本文基于文献[15]中规定的火电机组供热最 小运行方式,对耦合储热系统前后光煤互补热电联 产机组的调峰能力进行了分析。在满足供热需求的 条件下,机组最小出力为设计容量的 70%,即 210 MW,供热功率为 421.01 MW,设其为低谷时段机组 运行状态,与之对应的最大电出力为 235.86 MW, 设其为高峰时段机组运行状态。

机组供热可行域如图 6 所示,其中 AB 为最大 主蒸汽限制线、BC 为低压缸进汽流量限制线、CD 为最小电出力限制线,ABCD 组成的区域为机组供 热可行域,点 E、F 为额定供热功率 307.524 MW,点 C、H 为机组在最小供热运行方式供热功率。



图 6 机组供热可行域 Fig. 6 Feasible region for unit heating

$$AB$$
 线的发电、供热功率由式(10)、(11)计算:

 $P_{t,h} = M_{t,h} \cdot (h_{t,h,in} - h_{t,h,out})$

 (10)

$$P_{t,e} = M_{t,0} \cdot (h_{t,0} + q_{t,rh} - h_{t,e}) - \sum_{j=1}^{2} M_{t,j} \cdot (h_{t,j} + q_{t,rh})$$
$$h_{t,e} - \sum_{j=3}^{6} M_{t,j} \cdot (h_{t,j} - h_{t,e}) - M_{t,h} \cdot (h_{t,h,in} - h_{t,e})$$
(11)

式中: $P_{t,b}$ —t时刻的供热功率, MW; $P_{t,e}$ —t时刻电

功率, MW; $M_{t,h}$ —t 时刻供热抽汽流量, kg/s; $h_{t,h,in}$ t 时刻供热抽汽比焓, kJ/kg; $h_{t,h,out}$ —t 时刻供热抽汽 回水比焓, kJ/kg; $M_{t,0}$ —t 时刻主蒸汽流量 kg/s; $h_{t,0}$ —t 时刻主蒸汽比焓, kJ/kg; $q_{t,rh}$ —t 时刻再热蒸 汽吸收热量, kJ/kg; $h_{t,e}$ —t 时刻低压缸排汽比焓, kJ/kg; $M_{t,j}$ —t 时刻第 j 级回热抽汽流量, kg/h; $h_{t,j}$ t 时刻第 j 级回热抽汽比焓, kJ/kg。

BC线的发电、供热功率由式(12)、(13)计算:

$$P_{\iota,h} = M_{\iota,h} \cdot (h_{\iota,h,in} - h_{\iota,h,out})$$
(12)

$$P_{t,e} = M_{t,c} \cdot (h_{t,0} + q_{t,th} - h_{t,c}) + \sum_{j=3}^{7} M_{t,j} \cdot (h_{t,0} + q_{t,th} - h_{t,j}) + \sum_{j=1}^{2} M_{t,j} \cdot (h_{t,0} - h_{t,j}) + M_{t,h} \cdot (h_{t,0} + q_{t,th} - h_{t,h,in})$$
(13)

式中: $M_{t,c}$ — t 时刻低压缸排汽量,kg/h。

3 计算结果及分析

3.1 机组调峰性能随时间变化情况

图 7 为火电机组供热最小运行方式光煤互补热 电联产机组调峰容量随时间变化情况,无储热光煤 互补热电联产机组最大出力限制线与最小出力限制 线随太阳能辐射功率波动明显,耦合储热光煤互补 热电联产机组发电功率相对稳定。





Fig. 7 Variation of peak shaving capacity of solar-coal complementary cogeneration units in the minimum operating mode for heat supply of thermal power units with time

机组最大出力限制线与机组最小出力限制线中 间区域为机组调峰容量。机组供热最小运行方式, 日间 15:30 太阳能辐射功率最大,无储热机组调峰 容量 42.37 MW,耦合储热机组调峰容量 58.42 MW,耦合储热后机组调峰容量提升 37.87%;夜间 太阳辐射功率为 0,无储热机组太阳能场不做功调 峰容量稳定在 23.83 MW,耦合储热机组的储热系 统释放热量,调峰容量 57.34 MW,耦合储热后机组 调峰容量提升 140.62%。

3.2 机组调峰容量随供热功率变化情况

典型日中太阳能辐射功率从0 MW 增大到 405.88 MW,选取00:00 0 MW,16:50 133.72 MW, 13:50 269.40 MW 和15:30 405.88 MW 4 个典型 时间点分析耦合储热前后光煤互补热电联产机组调 峰容量随供热功率变化情况,如图 8 所示。







供热功率变化情况



由图 8 可知,光煤互补热电联产机组耦合储热 后太阳能辐射功率为 0 MW 时,额定供热功率调峰 容量增大 27.44 MW,最小运行方式调峰容量增大 34.07 MW;太阳能辐射功率为 133.72 MW 时,额定 供热功率调峰容量增大 23.4 MW,最小运行方式调 峰容量增大 30.11 MW;太阳能辐射功率为 269.4 MW 时,额定供热功率调峰容量增大 18.35 MW,最 小运行方式调峰容量增大 25.07 MW;太阳能辐射 功率为 405.88 MW 时,额定供热功率调峰容量增大 13.25 MW,最小运行方式调峰容量增大 19.96 MW。

综上所述,供热功率越大,耦合储热后光煤互补 热电联产机组调峰容量增大越明显。太阳能辐射功 率越小,耦合储热后光煤互补热电联产机组调峰容 量增大越明显。

3.3 调峰补偿

该电厂日间供暖高峰时段 13:00~15:00,夜间 供暖高峰时段 00:00~4:00。选 13:00 和 00:00 两 个时间点,分析耦合储热后光煤互补热电联产机组 调峰经济性。根据华北地区调峰补偿收益政策,实 际出力为机组设计容量的 50% 以下出现调峰补偿 收益,每 10% 为一档^[16]。本文机组为 300 MW 机 组,150 MW 以下出现调峰补偿收益。

图9为不同时刻机组调峰补偿收益。如图9(a) 可知,13:00时刻耦合储热光煤互补热电联产机组供 热功率在227.73~308.25 MW 范围为第一档调峰补 偿,供热功率227.73 MW 以下为第二档调峰补偿;无 储热光煤互补热电联产机组供热功率在216.61~ 288.15 MW 范围内为第一档调峰补偿,供热功率 216.61 MW 以下时为第二档调峰补偿;原始燃煤热电 联产机组供热功率在 203.51 ~ 275.81 MW 范围内为 第一档调峰补偿,在 203.51 MW 以下时为第二档调 峰补偿。13:00 耦合储热光煤互补热电联产机组调 峰收益高于无储热光煤互补热电联产机组与原始燃 煤热电联产机组。



for units at different times

由图 9(b)可知,00:00 时刻耦合储热光煤互补 热电联产机组在供热功率在 227.65 ~ 308.12 MW 范围内为第一档调峰补偿,供热功率 227.65 MW 以 下为第二档调峰补偿;无储热光煤互补热电联产机组 供热功率在 201.78 ~ 273.61 MW 范围内为第一档调 峰补偿,供热功率 201.78 MW 以下时为第二档调峰 补偿;原始燃煤热电联产机组供热功率在 203.51 ~ 275.81 MW 范围为第一档调峰补偿,在 203.51 MW 以下时为第二档调峰补偿。00:00 时刻耦合储热光 煤互补热电联产机组调峰补偿收益最大。由于 00:00 时刻太阳辐射功率为零无储热光煤互补热电联产机 组调峰收益明显降低,同时集热器存在热损失,夜晚 无储热机组发电功率略低于原始燃煤机组,因此 00:00 时刻无储热光煤互补热电联产机组调峰收益 略低于原始燃煤机组。

4 结 论

本文基于北方城市实际气象数据和 300 MW 热 电联产机组实际运行情况,分析光煤互补热电联产 机组耦合储热系统前后,太阳能辐射功率性对光煤 互补热电联产机组调峰性能的影响。

(1) 耦合储热系统后减小了太阳能辐射功率不 稳定性对光煤互补热电联产机组的影响,同时增强 了光煤互补热电联产机组的调峰性能。机组供热最 小运行方式下,日间15:30 太阳能辐射功率最大,耦 合储热机组调峰容量提升37.87%,夜间太阳能辐 射功率为零,储热系统释放热量,机组调峰容量提升 140.62%,在夜晚或太阳能辐射功率较低时,储热系 统对光煤互补热电联产机组调峰性能的影响较大。

(2)储热系统调节光煤互补热电联产机组太阳 能场输出功率随燃煤机组需求功率变化,增强光煤 互补热电联产机组灵活性。当夜晚或太阳能辐射功 率较低时,耦合储热后光煤互补热电联产机组供热 功率越大,调峰容量增大越明显。

(3)由于集热器存在热损失,导致夜晚无储热 光煤互补热电联产机组调峰收益略低于原始燃煤热 电联产机组。耦合储热系统后,增加了光煤互补热 电联产机组调峰收益,避免了夜晚光煤互补热电联 产机组调峰收益较差的情况。

参考文献:

[1] 徐 形,周 云,王新雷.300 MW 级热电联产机组调峰能力研究[J].中国电力,2014,47(9):35-41.
 XU Tong,ZHOU Yun,WANG Xinlei. Research on peak regulation

capability of 300 MW combined heat and power plan[J]. Electric Power, 2014, 47(9):35 - 41.

 [2] 侯宏娟,王学伟,宋 红,等.太阳能辅助 330 MW 燃煤机组互
 补发电系统动态特性及年性能分析[J].太阳能学报,2018, 39(12):3331-3338.

HOU Hongjuan, WANG Xuewei, SONG Hong, et al. Dynamic characteristic and annual performance analysis of solar assisted 330 MW coal-fired unit hybrid power generation system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(12);3331-3338.

[3] ZHAI R, ZHAO M, LI C, et al. Operation strategy of solar-aided coal-fired power plant with heat storage system[J]. Energy Procedia,2015,75:479-484.

- [4] DING Zeyu, HOU Hongjuan, DUAN Liqiang, et al. Simulation study on a novel solar aided combined heat and power system for heatpower decoupling[J]. Energy, 2021, 220:119 – 689.
- [5] 李 斌,徐文韬,杨建蒙.带储热装置的太阳能辅助燃煤发电系统研究[J].太阳能学报,2021,42(8):223-230.
 LI Bin,XU Wentao,YANG Jianmeng. Research on solar energy-assisted coal-fired power generation system with heat storagy device
 [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2021,42(8):223-230.
- [6] 肖卓楠,张 荣,刘英琦,等.太阳能辅助热电联产机组供热、发电及调峰性能分析[J].热力发电,2024,53(5):67-74.
 XIAO Zhuonan,ZHANG Rong,LIU Yingqi, et al. Analysis of heating, power generation and peak shaving performance of solar assisted cogeneration units [J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(5):67-74.
- [7] 高佳圣,徐浩东,王万权,等.集成太阳能辅助供热的 600 MW
 高背压热电联产机组的运行及优化[J].热能动力工程,2023, 38(9):158-165.

GAO Jiasheng, XU Haodong, WANG Wanquan, et al. Operation and optimization of 600 MW high back pressure cogeneration unit with integrated solar assisted heating [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9); 158 – 165.

- [8] 丁泽宇,侯宏娟,段立强.基于线性规划的太阳能辅助热电联 供机组运行优化研究[J].热力发电,2021,50(6):33-39.
 DING Zeyu, HOU Hongjuan, DUAN Liqiang. Study on operation optimization of solar-aided combined heat and power unit based on linear programming[J]. Thermal Power Generation,2021,50(6): 33-39.
- [9] 中国气象局气象信息中心气象资料室.中国建筑热环境分析 专用气象数据集[M].北京:中国建筑工业出版社,2005. Meteorological Data Room of the Meteorological Information Center of the China Meteorological Administration. Special meteorological dataset for thermal environment analysis of Chinese buildings[M]. Beijing; China Architecture & Building Press,2005.
- [10] 张 夏. 中低温熔盐储热系统的容量配置与热力性能分析
 [D]. 北京:华北电力大学,2019.
 ZHANG Xia. Capacity configuration and thermal performance analysis of medium and low temperature molten salt heat storage system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019
- [11] 郑天帅.太阳能辅助供热机组性能分析[D].北京:华北电力 大学,2017.
 ZHENG Tianshuai. Performance analysis of a solar aided CHP unit[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.
- [12] ZHANG S, LI Z, WANG H, et al. Component-dependent thermal properties of molten salt eutectics for solar thermal energy storage: Experiments, molecular simulation and applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 209:118333.

(下转第132页)