

# “光火储”一体化发电系统研究

李斌<sup>1</sup>, 王雨萌<sup>1</sup>, 张庆来<sup>1</sup>, 范林达<sup>1</sup>, 刘雅晴<sup>1</sup>, 张新敬<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 河北 保定 071003;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190)

**[摘要]** 为实现2060“碳中和”目标, 在传统火电机组(CFPP)基础上, 开发利用太阳能和储能, 提出了带储热的槽式太阳能光热系统、压缩空气储能(CAES)和火电机组集成的“光火储”一体化发电系统。此系统既可克服火电机组和压缩空气储能的耦合(CFPP+CAES)系统在释能阶段从火电机组抽取热量的缺点, 又能充分利用太阳能资源, 提高可再生能源的利用率、降低火电机组发电煤耗。利用EBSILON软件对该系统在火电机组100%负荷工况下的热经济性、节煤效果进行了分析, 结果表明: 与传统CFPP系统相比, 该“光火储”系统中方案2平均热耗率降低了33.5 kJ/(kW·h), 平均标准煤耗率降低了1.30 g/(kW·h); “光火储”一体化发电系统中方案2的CAES系统焓效率可以达到68.81%, 较先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)系统提升了16.49%, 且通过计算每个部件焓损失, 发现CAES系统5—8号换热器节能潜力较大; 根据2019年实行的某市峰谷分时电价标准, 该“光火储”一体化发电系统每年净售电收益最大为1 045.49万元。

**[关键词]** 太阳能; 可再生能源; 燃煤发电; 储热装置; 压缩空气储能

**[中图分类号]** TM621 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlfid.202107129

**[引用本文格式]** 李斌, 王雨萌, 张庆来, 等. “光火储”一体化发电系统研究[J]. 热力发电, 2022, 51(2): 56-64. LI Bin, WANG Yumeng, ZHANG Qinglai, et al. Research on integrated power generation system of “solar, coal-fired power and energy storage”[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(2): 56-64.

## Research on integrated power generation system of “solar, coal-fired power and energy storage”

LI Bin<sup>1</sup>, WANG Yumeng<sup>1</sup>, ZHANG Qinglai<sup>1</sup>, FAN Linda<sup>1</sup>, LIU Yaqing<sup>1</sup>, ZHANG Xinjing<sup>2</sup>

(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** An integrated power generation system combined with a parabolic trough solar system, a compressed air energy storage (CAES) system, and a thermal power plant is proposed to achieve the goal of “carbon neutralization” in 2060, and utilize solar energy and energy storage technology based on coal-fired power plant (CFPP). This system can overcome the disadvantage of extracting heat from the thermal power plant during the discharge process of CAES when coupling with CFPP and makes full use of the heat produced by the parabolic trough solar system to improve the utilization of renewable energy and reduce the coal consumption. The thermal performance and coal-saving effect of this system under 100% load operation condition of the thermal power plant are analyzed by EBSILON software. The results show that compared with the conventional CFPP system, the average heat consumption of the integrated system with scheme 2 reduces by 33.5 kJ/(kW·h), and the average standard coal consumption rate decreases by 1.30 g/(kW·h). The CAES system of the integrated power generation system with scheme 2 can achieve 68.81% productivity, 16.49% higher than that of the advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) system. The calculating results of the exergy loss of each component reveal that the No.5~8 heat exchanger in the CAES system has a higher energy-saving potential. The annual electricity sales profit of the

收稿日期: 2021-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676181)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (51676181)

第一作者简介: 李斌(1969), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电站热力系统性能分析及节能优化, libin@ncepu.edu.cn.

通信作者简介: 王雨萌(1997), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电站热力系统性能分析及节能优化, 422106929@qq.com.

integrated power generation system is up to 10.454 9 million yuan according to the peak and off-peak electricity usage times and rates of a city implemented in 2019.

**Key words:** solar energy; renewable energy; coal-fired power generation; heat storage device; compressed air energy storage

电力行业是碳中和建设的中坚力量,实现碳中和的重要途径就是大力发展风能、太阳能等新能源替代化石能源,以减少二氧化碳排放<sup>[1]</sup>。但风电和光伏发电出力具有随机性和波动性,且现有的电力系统灵活性低,所以需要提高除风电和光伏之外其他发电厂的灵活性<sup>[2-3]</sup>。因此,利用储能、太阳能来提高火电机组灵活性的“光火储”一体化发电系统,对可再生能源的高效利用、实现“双碳”目标具有重要意义。

目前,大多数电厂采用技术相对成熟、可靠性较高、价格较低的锂电池储能,以满足大型火电机组的储能需求<sup>[4-5]</sup>。由于其材料采用活跃的金属锂,具有燃烧、爆炸风险,且锂电池一旦着火,没有有效的灭火手段<sup>[6]</sup>;从环保性能来看,其生产过程及废旧电池回收处理都涉及环保问题;从系统规模来讲,锂电池目前主要为10 MW级,单体项目尚未达到百兆瓦级。

相比之下,压缩空气储能存储介质为不可燃的空气,系统运行不会发生爆炸;储、释能过程中没有任何化学反应,清洁无污染,对环境友好<sup>[7]</sup>。此外,中国科学院工程热物理研究所储能研发中心自主设计研发了10 MW级先进绝热压缩空气储能(advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES)系统<sup>[8-9]</sup>,压缩空气储能单机已达到百兆瓦级规模,国际首套100 MW示范系统正在张家口建设中<sup>[10]</sup>。

近几年,许多学者开展了燃煤电厂与压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)系统耦合技术的研究<sup>[11-12]</sup>,结果表明:燃煤电厂与CAES系统耦合后可省去AA-CAES系统的储热罐、储冷罐,节省建造费用。Pan等人<sup>[13]</sup>以某超临界350 MW燃煤电厂为研究对象,对火电机组与CAES耦合系统进行了热力学评价,结果表明,新型CAES系统的往返效率和焓效率分别达到64.08%和70.01%。作者所在课题组以某350 MW火电机组(CFPP)为研究对象,提出了与10 MW级AA-CAES系统的最佳耦合方案,利用储能阶段的压缩热加热部分凝结水至接近除氧器入口温度后,将其送入除氧器,降低了凝结水对机组的影响;释能阶段由火电机组5段抽汽加热压缩空气,实现了火电机组与储能的密切耦合<sup>[14]</sup>。但该方案在释能阶段需要由火电机组抽取部分热量加热高压空气,不利于火电机组的稳定运行。

太阳能发电有光伏发电和光热发电2种形式<sup>[15]</sup>。光热发电近几年发展快速,与光伏发电相比,具有清

洁高效、稳定可靠等优点<sup>[16]</sup>,且带储热的光热发电在白天可以将多余的太阳能进行储存,在夜间或者太阳光照条件不好的情况下继续发电,这是光伏发电所不具备的。

燃煤电厂与太阳能光热系统耦合的方案也已经被提出并显示出良好的前景<sup>[17-20]</sup>。Zhao等人<sup>[21]</sup>研究了内蒙古地区首个太阳能燃煤混合电厂(燃煤电厂发电200 MW,太阳能输出10 MW),并对该电厂进行了经济可行性分析。作者所在课题组对带储热的太阳能燃煤辅助发电机组进行了分析,在燃煤电厂与太阳能光热系统耦合的前提下,引入太阳能储热装置,经过模拟选出最佳集成方案,结果显示,引入储能装置后的太阳能辅助燃煤机组日用煤量较之前至少节约7.62 t,解决了太阳能不稳定、时效性差等缺点<sup>[22]</sup>。

根据以上研究,使用太阳能储热罐中的热量代替火电机组抽汽,既能保证火电机组的稳定运行,又可以提高可再生能源利用效率。本文提出了基于CAES的“光火储”一体化发电技术,即在10 MW的AA-CAES系统与CFPP耦合的基础上,引入带有储热的槽式太阳能发电系统,实现“光火储”一体化发电。

## 1 系统描述

本文“光火储”一体化发电系统包括CFPP系统、CAES系统以及带储热的光热系统3个子系统。CFPP系统选取某350 MW的供热机组为研究对象。汽轮机采用哈尔滨汽轮机有限责任公司生产的C280/N350-16.7/537/537型抽汽凝汽式、亚临界、一次中间再热、双缸、单轴汽轮发电机组。给水加热器布置为“三高四低一除氧”。锅炉为亚临界、一次再热、单炉膛、平衡通风、自然循环汽包HG-1165/17.5-540/540-HM3型锅炉<sup>[23]</sup>。

针对该机组,设计了2套同时耦合带储热的光热系统与CAES系统的方案。

方案1如图1所示。CAES系统侧包括发电机、压缩机、膨胀机、热交换器和储气罐,与传统AA-CAES系统相比,省去了储热罐、储冷罐。在储能时,过剩电能驱动压气机,将空气压缩至高压储存于储气罐,各级压缩机出口处的高温空气经过换热器将热量传递给CFPP凝结水泵出口的部分凝结水,凝结水吸收了压缩热后被引入CFPP的除氧器入口,在此过程中回收储能过程的压缩热,被加热的凝结水温

度与除氧器入口温度相近，保证了机组安全稳定运行。释能时，高压空气从储气罐中释放出来，通过节流阀调整至一定压力后，先进入换热器，吸收来自CFPP的5号抽汽的热量，然后进入膨胀机做功；空气经4级吸热、膨胀、做功后排入大气<sup>[24]</sup>。

带储热的光热系统选用槽式太阳能光热系统，采用喷淋式石子填充床蓄热罐，传热介质选择导热

油。在有光照的条件下，阀1—阀5均开启，为光热系统储热阶段，部分导热油进入蓄热装置储热，同时另一部分导热油经过油水换热器加热从除氧器前端抽取的部分给水，被加热的给水被送入1号高压加热器（高加）前端。当阀1、阀2关闭，阀3、阀4、阀6、阀7开启时，系统为夜间释能阶段，导热油进入蓄热罐吸收热量，经油水换热器将部分给水加热。

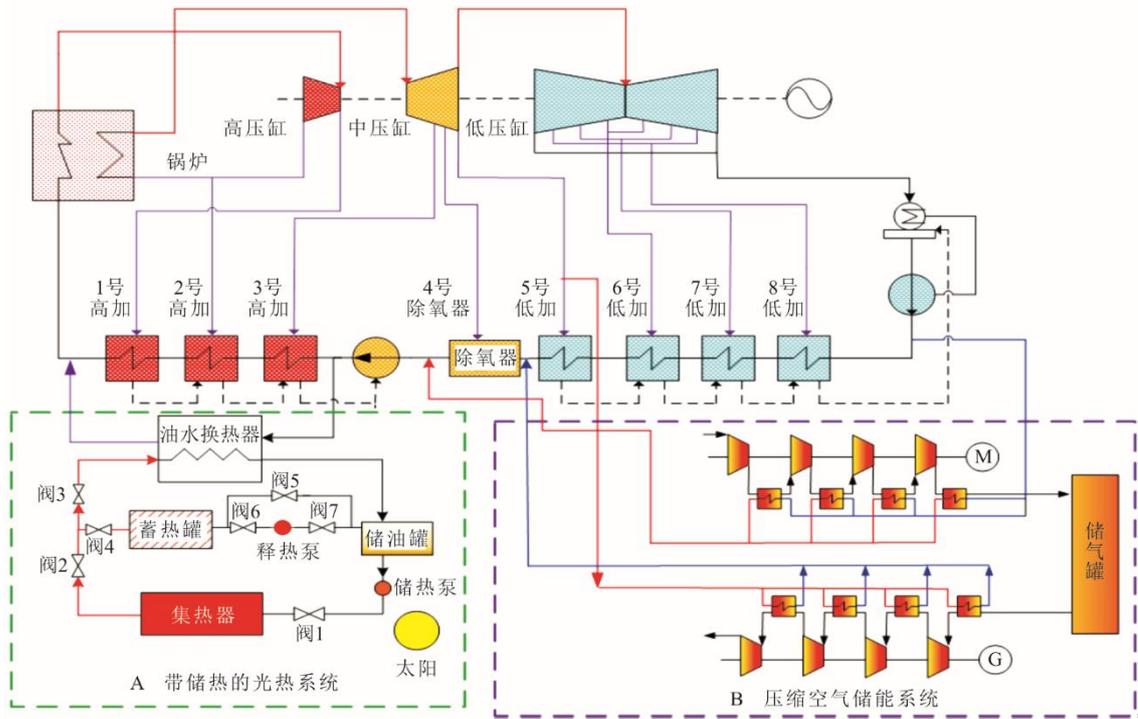


图1 使用方案1的耦合系统示意  
 Fig.1 Schematic diagram of the coupling system with scheme 1

由于方案1在CAES系统释能阶段利用部分CFPP的5号抽汽加热空气，在一定程度上影响了CFPP的运行参数，因此，改变CAES系统释能阶段热量供给方式，利用太阳能蓄热器中热量代替方

案1中释能阶段的抽汽，构成耦合太阳能储热的AA-CAES系统（方案2，见图2），这样既保证了火电机组安全运行，又能利用储热装置，克服太阳能的随机性和波动性，进一步降低火电机组煤耗。

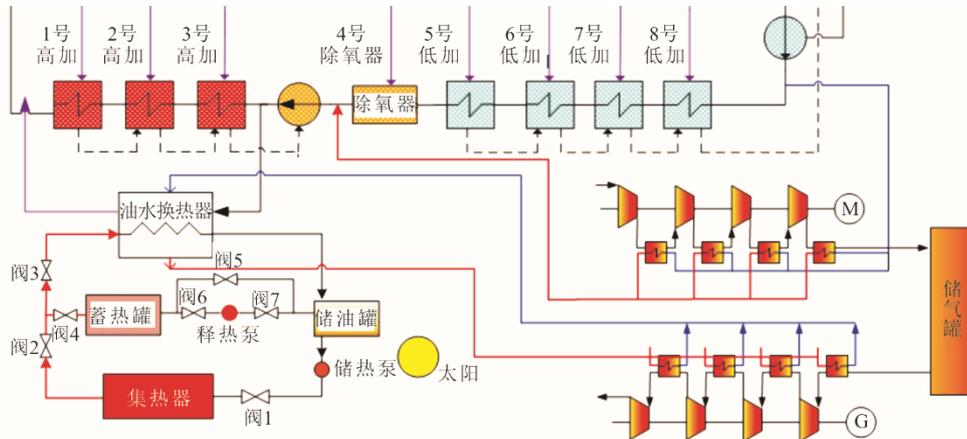


图2 使用方案2的耦合系统示意  
 Fig.2 Schematic diagram of the coupling system with scheme 2

## 2 研究方法及模型

本文“光火储”一体化发电系统采用槽式太阳能集热蓄热系统，压缩空气侧采用改进后的 10 MW 级 AA-CAES 系统。使用 EBSILON 软件模拟计算。

### 2.1 燃煤电厂参数

以非采暖季 THA 工况的运行数据为基础，在 EBSILON 平台上搭建燃煤电厂模型，不考虑汽轮机轴封漏汽。为检验所建模型的可靠性，对已有工况的热力系统性能进行模拟，模拟结果与设计值对比见表 1。

表 1 某 350 MW 燃煤机组设计参数仿真结果  
Tab.1 Simulation results of design parameters of a 350 MW coal fired unit

项目	非采暖季 THA 工况		
	设计值	模拟结果	误差/%
发电机功率/MW	350	350	0
主蒸汽压力/MPa	16.67	16.67	0
再热蒸汽压力/MPa	3.216	3.22	0
热耗率/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	7 865.10	7 822.20	0.55
主蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	1 045.29	1 037.21	0.77
再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	876.10	879.98	0.44
凝结水流量/(t·h <sup>-1</sup> )	812.91	810.11	0.34

由表 1 可知，与设计值相比，本文建立的热力系统模型计算值最大相对误差为 0.77%，小于工程允许误差，因此模型可靠性较高。

### 2.2 CAES 系统模拟

CAES 系统主要设备有压缩机、膨胀机、换热器、储气罐、阀门等。储能阶段和释能阶段不同时运行，10 MW 级 AA-CAES 系统示意如图 3 所示。

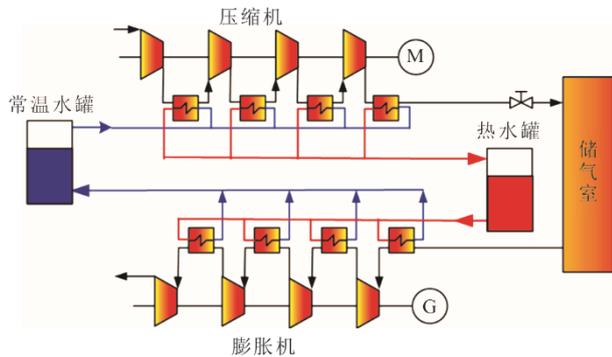


图 3 10 MW 级 AA-CAES 系统示意  
Fig.3 Schematic diagram of the AA-CAES system

利用 EBSILON 软件建立其仿真模型，通过计算模型的相关参数，对设计工况下的 AA-CAES 系统进行仿真，并做以下假设：

- 1) 空气为干空气，主要成分为 N<sub>2</sub> (体积分数 75%)

和 O<sub>2</sub> (体积分数 23%)，无其他物质对系统热力过程造成的影响；

- 2) 不考虑设备、管道的压力损失及热量损失；
- 3) 整个工作周期内处于稳定状态；
- 4) 压缩机和透平等熵效率为固定值，取 88%；
- 5) 环境温度和压力分别为 25 °C、101.325 kPa。

为对 CAES 系统进行热力学特性分析，首先需要计算储气罐所需容积。

- 1) 储气罐储存的能量  $E_C$  为：

$$E_C = Nt \tag{1}$$

式中： $N$  为压缩机输入功率，kW； $t$  为储能时间，h。

- 2) 储气罐容积  $V$  为：

$$V = \frac{E_C}{p_0 \pi_z \ln \pi_z} \tag{2}$$

式中： $p_0$  为大气压力，kPa； $\pi_z$  为压缩机总压比。

AA-CAES 系统储气罐设计压强为 10 MPa，储能时间 8 h，储气罐计算容积为 5 225 m<sup>3</sup>。为防止储气罐压力波动引发末级压缩机压比突升，造成气缸温度过高，需降低末级压比设计值。通过调节换热器换热能效，将最后一级出口温度控制在 34.85 °C 左右。储能阶段各部件具体参数设计见表 2。

表 2 储能阶段各部件具体参数设计  
Tab.2 Design parameters of each component in energy storage stage

项目	换热器级数			
	1	2	3	4
压缩机压缩比	4.100	3.464	3.331	2.298
排气压力/MPa	0.414	1.365	4.480	10.250
空气流量/(t·h <sup>-1</sup> )	57.24	57.24	57.24	57.24
换热器水流量/(t·h <sup>-1</sup> )			13.75	
环境温度/°C			24.85	
储气罐设计压强/MPa			10	
储气罐容积/m <sup>3</sup>			5 225	
气体常数			0.287	

AA-CAES 系统释能阶段压强设为 7 MPa，释能时间为 4.2 h，膨胀机为 4 级透平，换热器为 4 级换热，膨胀机及储气罐具体参数设计见表 3、表 4。

表 3 释能阶段膨胀机及储气罐参数设计  
Tab.3 Design parameters of the expander and gas tank in energy release stage

项目	换热器级数			
	1	2	3	4
膨胀机膨胀比	2.92	2.89	2.85	2.82
排气压力/MPa	2.400	0.830	0.290	0.101
空气流量/(t·h <sup>-1</sup> )	105.9	105.9	105.9	105.9
膨胀机绝热效率	0.88	0.88	0.88	0.88
膨胀机入口空气温度/°C			100	
储气罐释能压强/MPa			7	

表 4 储气罐设计参数  
Tab.4 Design parameters of the of gas tank

容积/m <sup>3</sup>	入口空气 初始温度/°C	储气温度/°C	储气压强/MPa	储能时间/h
5 225	33.81	15.5	10	8

### 2.3 太阳能储热系统模拟

采用我国北方某地夏至日 12:00 的太阳能辐射数据, 传热介质列间距为 12.5 m, 采用 LS-2 典型槽式集热器, 采集器总长度 1 920 m, 收集器数量为 6, 总开口面积为 46 080 m<sup>2</sup>。采用新型喷淋式石子填充床式蓄热器, 罐体为圆柱形, 内部充满石子, 传热流体为高温导热油。蓄热开始后, 导热油经过喷淋装置分流成若干液柱喷淋至填充床表面渗流向下, 并与石子填充床的石子发生换热, 将热存储起来, 直到蓄热器的出口温度与进口温度近似相等时, 蓄热过程结束。

### 2.4 评价指标

“光火储”发电系统是一种多能源输入的复杂能量系统。本文通过热耗率、发电煤耗、焓效率等指标来进行分析评价。

#### 1) 热耗率

热耗率表示机组每发出 1 kW·h 电量时消耗的热量, 计算式为:

$$q_0 = \frac{D_{gs} \times H_{gs} + D_{zr} \times H_{zr} - D_{gr} \times H_{gr}}{P_{grid}} \quad (3)$$

式中:  $q_0$  为热耗率, kJ/(kW·h);  $D_{gs}$ 、 $D_{zr}$ 、 $D_{gr}$  为给水流量、再热蒸汽流量、供热抽汽流量, kg/s;  $H_{gs}$ 、 $H_{zr}$ 、 $H_{gr}$  为给水焓增、再热蒸汽焓增、供热焓增, kJ/kg。

#### 2) 标准发电煤耗率

标准发电煤耗率的计算公式为:

$$b_s = \frac{B_0}{W} \quad (4)$$

式中:  $b_s$  为标准发电煤耗率, g/(kW·h);  $B_0$  为标准煤耗量, g;  $W$  为机组实际发电量, kW·h。

#### 3) 焓效率

焓效率表示系统中可用能的利用程度, 反应不可逆因素引起的焓损失大小。计算公式为:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{X,out}}{E_{X,in}} \quad (5)$$

式中:  $\eta_{ex}$  为焓效率;  $E_{X,out}$  为收益焓, 即离开系统的各项焓值之和, MW;  $E_{X,in}$  为投入焓, 即进入系统的各项焓值之和, MW。

对系统各基本点进行焓损失分布分析时, 主要部件焓效率计算公式见表 5。

表 5 系统主要部件焓效率计算公式  
Tab.5 Calculation formula of exergy efficiency for major devices of the system

部件	投入焓	收益焓	焓效率
汽轮机	进出口工质焓差 $E_{x2} - E_{x1}$	对外输出的有用功 $W$	$\frac{W}{E_{x2} - E_{x1}}$
压气机、泵	外界耗功 $W$	进出口工质焓差 $E_{x2} - E_{x1}$	$\frac{E_{x2} - E_{x1}}{W}$
换热器	热流体进出口焓差 $E_{x1} - E_{x2}$	冷流体进出口焓差 $E'_{x1} - E'_{x2}$	$\frac{E'_{x1} - E'_{x2}}{E_{x1} - E_{x2}}$
节流阀	工质进口焓 $E_{x1}$	工质出口焓 $E_{x2}$	$\frac{E_{x2}}{E_{x1}}$

#### 4) 售电收益

售电收益表示通过在谷段电价时买电储能, 在释能阶段释能卖电, 从而获得的收益。

$$S = K_2 \times W_{out} \times T_2 - K_1 \times W_{in} \times T_1 \quad (6)$$

式中:  $S$  为通过峰谷电价一体化系统的售电收益, 元;  $K_1$  为购电费用, 元/(kW·h);  $W_{in}$  为压缩机耗功, MW;  $T_1$  为储电时间, h;  $K_2$  为售电费用, 元/(kW·h);  $W_{out}$  为输出电功率, MW;  $T_2$  为售电时间, h。

## 3 结果与讨论

### 3.1 热力特性

对 350 MW 燃煤机组非采暖季 THA 工况的性能进行评估, 做以下假设。

1) CAES 储能阶段为储气罐从空罐加入气体直至储满, 释能阶段为由满罐释空。

2) 以 1 天为 1 个周期, 时间分配如下: 取晚间无光照条件下释热储能 8 h、释热释能 2.1 h; 白天光照条件下, 开启光热系统的储热模式, 同时储热释能 2.1 h, CAES 系统不储能不释能 (不储不释), 太阳能系统储热 11.8 h。

系统热力性能数据见表 6。

在储能过程中, CAES 系统消耗 9.62 MW 电力, 储能时间为 8 h。CAES 系统储能过程释放的热量用来加热凝结水, 将带储热的光热系统中的热量传递给燃煤机组的给水。此过程中, 保持火电机组总发电功率恒定, 即会引起煤耗率降低: CFPP+CAES 系统的煤耗率降低 1.44 g/(kW·h), 方案 1、方案 2 的煤耗率均降低 2.65 g/(kW·h)。

释能过程中, 可产生 10.03 MW 的功率, CFPP 煤耗率为 322.54 g/(kW·h)。由于燃煤电厂的汽轮机抽汽作为热源加热空气, CFPP+CAES、方案 1 煤耗率提高, 分别为 324.69、323.73 g/(kW·h); 方案 2 采用太阳能的热量, 煤耗率降低到 321.62 g/(kW·h)。

表 6 系统热力性能  
Tab.6 Thermal performance of the system

项目	CFPP	CFPP+CAES	方案 1	方案 2
火电厂负荷	100% 负荷			
一体化系统发电功率/MW	340.38			
标准发电煤耗率/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )	322.54	321.09	319.89	319.89
CAES 系统储能	7 838.86	7 804.98	7 775.66	7 775.66
机组热耗率/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	—	3 761.14	6 895.43	6 895.43
CAES 系统节约的标煤量/kg	—	—	9.62	9.62
CAES 电机功耗/MW	—	76.98	76.98	76.98
充电时 CAES 输入功率/(MW·h)	—	—	—	—
火电厂负荷	100% 负荷			
一体化系统发电功率/MW	360.03			
标准发电煤耗率/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )	322.54	324.69	323.72	321.62
CAES 系统释能	7 838.86	7 892.38	7 868.84	7 817.68
机组热耗率/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	—	2 928.99	1 612.59	—1 308.17
CAES 系统消耗的标煤量/kg	—	—	10.03	10.03
CAES 电机功耗/MW	—	42.11	42.11	42.11
放电时 CAES 输出功率/(MW·h)	—	—	—	—
火电厂负荷	100% 负荷			
一体化系统发电功率/MW	350			
标准发电煤耗率/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )	322.54	322.54	321.81	321.81
CAES 系统不储不释, 太阳能系统储热	7 838.86	7 838.86	7821.11	7 821.11
机组热耗率/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.00	0.00	2 866.30	2 866.30
节省的煤电/kg	—	34.88	34.88	34.88
CAES 系统消耗的电量/(MW·h)	—	832.15	8 149.14	11 069.91
1 天节煤量/kg	—	7 836.93	7 814.31	7 805.36
周期内平均值	7 838.86	7 836.93	7 814.31	7 805.36
平均热耗率/(kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	322.54	322.44	321.51	321.14
平均发电煤耗率/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> )	—	—	—	—

图 4 为各阶段节煤量对比。由图 4 可以看出：在储能阶段，CFPP+CAES 系统节煤 3.76 t，方案 1、方案 2 在加入太阳能的热量后节煤 6.90 t；在释能阶段，CFPP+CAES 系统多消耗 2.93 t 煤，方案 1 多消耗 1.61 t 煤，方案 2 节煤 1.31 t，这是由于方案 2 的 CAES 系统释能并没有对火电机组产生影响；在不储不释阶段，方案 1、方案 2 相当于太阳能辅助燃煤机组，均节煤 2.87 t，CFPP+CAES 系统相当于 CFPP 系统正常运行。

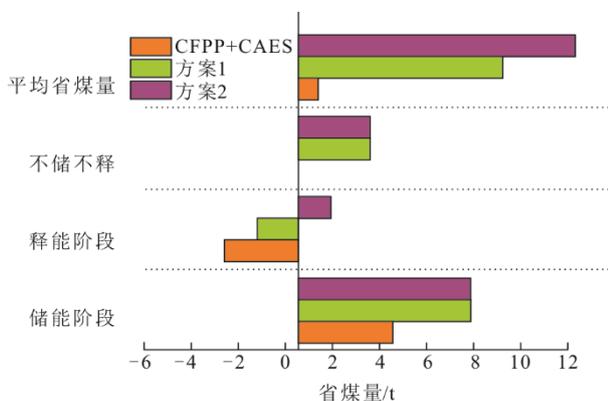


图 4 各阶段节煤量对比  
Fig.4 Comparison of coal saving in each stage

取 1 天 24 h 作为 1 个周期，可计算出在整个周期内：CFPP+CAES 系统节省标煤约 0.83 t，方案 1 节省标煤约 8.15 t，方案 2 节省标煤约 11.07 t。由此可见，在加入太阳能系统后，节煤量明显增加，且方案 2 节煤量是方案 1 的 1.36 倍。

实际运行过程中，相比于 CFPP，CFPP+CAES 系统的平均热耗率下降了 1.93 kJ/(kW·h) (图 5)。

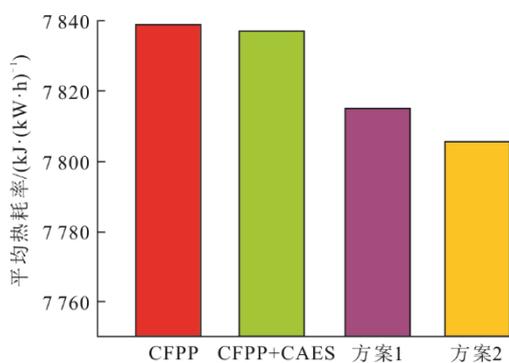


图 5 不同系统平均热耗率  
Fig.5 The average heat rates of different systems

由于储能时压缩机消耗电能转化为凝结水的热能，耦合后方案热耗率降低；而释能时消耗了汽轮机抽汽的热量，CFPP+CAES 系统热耗率有所提

高。方案 1、方案 2 平均热耗率分别降低了 24.55、33.5 kJ/(kW·h)，主要原因是白天太阳能集热装置加热给水，提升了机组热效率，方案 2 热耗率降低最多。

同理，CFPP+CAES 系统、方案 1、方案 2 的平均标准煤耗率均有所降低，其中方案 2 降低幅度最大，较 CFPP+CAES 系统下降了 1.30 g/(kW·h)，低于原始 CFPP（图 6）。

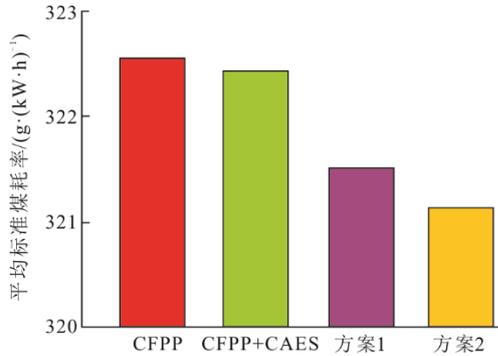


图 6 不同系统平均标准煤耗率

Fig.6 The average standard coal consumption rates for power generation in different systems

### 3.2 CAES 系统焓分析

取方案 1 为例，图 7 给出了 CFPP+CAES 系统 CAES 侧主要设备的焓输入、输出和损失。图中 A 代表压缩机，B 代表膨胀机，C 代表换热器。对于整个 CAES，主要输入输出为电能，储能阶段输入 76.96 MW·h 的电能，释能阶段输出 42.13 MW·h 的电能。在与火电机组耦合后，增加了与火电机组的焓传递，储能时火电厂从压缩机的压缩空气中吸收 18.58 MW·h 焓值，释能时从汽轮机进行抽汽，输送 17.14 MW·h 焓值到空气中。

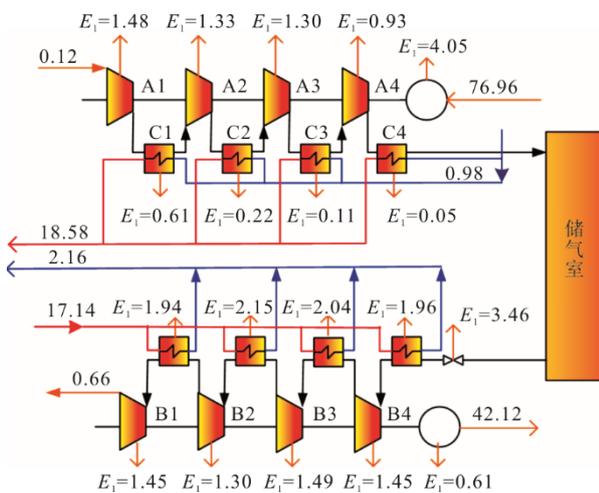


图 7 CFPP+CAES 耦合系统储能释能过程 CAES 侧焓损失 (MW·h)

Fig.7 Diagram of exergy loss in the process of energy storage and release of CAES in the CFPP+CAES (MW·h)

由图 7 可见，发电机和节流阀的总焓损失为 10.18 MW·h，在 CAES 系统中最大。为了更直观地反映 CAES 系统各部件热力学完善程度，将焓损失用柱形图表示，如图 8 所示。由图 8 可以看出：3 个系统的压缩机、膨胀机焓损失差别较小；方案 1 和方案 2 的焓损失相同，略小于 AA-CAES 系统；耦合系统压缩机组、膨胀机组焓损失分别为 5.032、5.683 MW·h；方案 1、方案 2 中 1—4 号换热器焓损失均为 1.51 MW·h，较 AA-CAES 系统 1—4 号换热器焓损失（2.99 MW·h）降低了 49.39%；AA-CAES 系统中的 5—8 换热器焓损失为 20.25 MW·h，方案 1、方案 2 中的 5—8 换热器焓损失分别为 23.49、12.66 MW·h。

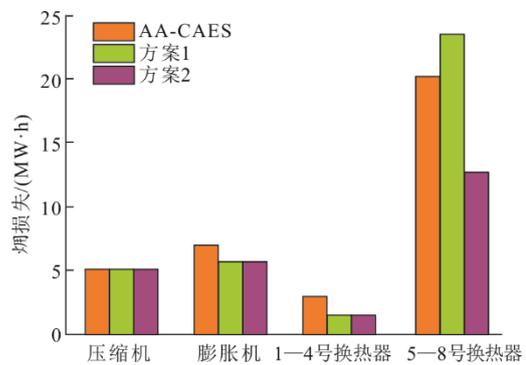


图 8 3 个系统中 CAES 系统具体部件焓损失对比  
Fig.8 Comparison of exergy loss of specific component in CAES between three systems

图 9 为 3 个系统中 CAES 系统具体部件焓效率对比。

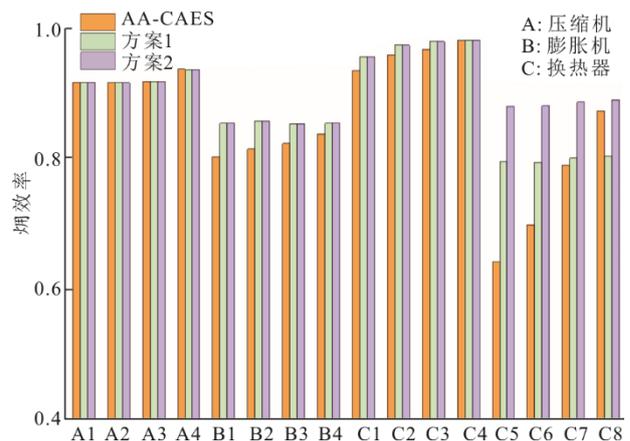


图 9 3 个系统中 CAES 具体部件焓效率对比  
Fig.9 Comparison of exergy efficiency of each component in CAES system of three systems

由图 9 可以看出：压缩机焓效率在 0.93 左右，膨胀机焓效率在 0.88 左右；5—8 号换热器方案 1、方案 2 焓效率分别为 80.46%、80.38%、81.00%、81.37% 和 89.21%、89.23%、89.85%、90.22%，

5—8号换热器方案2焓效率较方案1提高了近10%。换热器焓效率呈一定趋势下降,主要是由于换热温差水平不同以及加热器存在端差,这也说明CAES系统中节能潜力较大的是5—8号换热器,可以采取降低换热器焓损失的方法来提高系统效率。

AA-CAES系统焓效率为52.32%,焓损失较大;方案1中从压缩空气侧传递到火电机组的焓值小于火电机组传递到压缩空气侧的部分,从而提高了煤炭消耗量,CAES系统的焓效率达到66.02%;方案2中太阳能代替了火电机组抽汽,焓效率提升到68.81%。

### 3.3 经济性分析

以某市2019年运行的峰谷电价制度(表7)为参考,假设“光火储”一体化系统年运行时间按

332天计算,即储能2656h,释能1394h。每季度运行83天,每天储电8h,在谷段电价时储能,电站购电费用为826.81万元。系统每天售电4.2h,输出功率按10MW计算。

CAES系统释能所处时间在尖峰电价、峰段电价或峰平段电价时间段。经计算,得到“光火储”一体化系统每年的售电收益:

峰段售电收益(在夏季以尖峰电价出售,其余时间段以峰段电价出售)为1872.30万元。

峰平段售电收益为1094.19万元。

即售电收益最高为峰段售电时的收益,除去购电费用,“光火储”一体化发电系统年净售电收益最大为1045.49万元。

表7 某市2019年峰谷分时电价标准  
Tab.7 The time of use electricity price standard of peak valley in a city in 2019

项目	尖峰电价(夏季)		峰段电价		峰平段电价			谷段电价
	11:00—13:00	16:00—17:00	10:00—15:00	18:00—21:00	07:00—10:00	15:00—18:00	21:00—23:00	23:00—次日07:00
金额/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	1.4397		1.3104		0.7847			0.3113

## 4 结 论

1) 以某350MW火电机组为研究对象,提出了与10MW级AA-CAES系统及太阳能储热系统耦合的2种“光火储”一体化方案:方案1采用带储热的光热系统直接与燃煤机组耦合,加热给水,CAES系统释能阶段利用部分汽轮机抽汽与高压空气进行换热;方案2用蓄热器中部分热量加热CAES释能阶段的高压空气,以保证火电机组安全运行。通过EBSILON软件模拟验证了方案的可行性。

2) 模拟结果表明,方案2的热力性能最优,煤耗率全周期内均降低,且节煤量是方案1的1.36倍,1天节约标煤11.07t。方案1的焓效率为66.02%,方案2的焓效率为68.81%,方案2较纯AA-CAES系统(52.32%)提升了16.49%。5—8号换热器焓效率较低,可以采取降低换热器焓损失的方法来提高系统效率。

3) 根据2019年某市峰谷分时电价标准,CAES系统售电电价为峰段电价或峰平段电价,计算得到“光火储”一体化系统每年的峰段售电收益为1872.30万元,峰平段售电收益为1460.70万元,电站购电费用为983.52万元,即该系统每年净售电收益最大为888.78万元。

### [参 考 文 献]

[1] 朱彤.“十四五”时期可再生能源发展的关键是体制改

革与机制重构[J]. 中国发展观察, 2020(22): 50-54.

ZHU Tong. The key to renewable energy development during the 14th Five-Year Plan period is system reform and mechanism reconstruction[J]. China development Observation, 2020(22): 50-54.

[2] 郭伟, 唐人虎. 2060 碳中和目标下的电力行业[J]. 能源, 2020(11): 19-26.

GUO Wei, TANG Renhu. 2060 carbon neutral power sector[J]. Energy, 2020(11): 19-26.

[3] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 8-13.

HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexible modification situation and technical application of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 8-13.

[4] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗歧, 等. 辅助单台火电机组AGC的电池储能系统双层优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 69-76.

SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Optimal bi-level configuration method for battery energy storage system assisting AGC of single thermal power unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 69-76.

[5] RAUGEI M, LECCISI E, FTHENAKIS V M. What are the energy and environmental impacts of adding battery storage to photovoltaics? A generalized life cycle assessment[J]. Energy Technology, 2020, 8(11): 1901146.

[6] ZALOSH R, GANDHI P, BAROWY A. Lithium-ion energy storage battery explosion incidents[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 72(3): 104560.

[7] 郭欢, 徐玉杰, 刘畅, 等. 一种压缩空气储能系统性能分析新方法[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(12): 2567-2572.

GUO Huan, XU Yujie, LIU Chang, et al. A new method for performance analysis of compressed air energy storage system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(12): 2567-2572.

- [8] 郭欢. 新型压缩空气储能系统性能研究[D]. 北京: 中国科学院, 2013: 1.  
GUO Huan. Study on the performance of a new compressed air energy storage system[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2013: 1.
- [9] 李盼, 杨晨, 陈雯, 等. 压缩空气储能系统动态特性及其调节系统[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2295-2305.  
LI Pan, YANG Chen, CHEN Wen, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system and the regulation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2295-2305.
- [10] 100 MW 先进压缩空气储能示范项目储热子系统启动安装工作[J]. 高科技与产业化, 2021, 27(04): 70.  
Start up and installation of heat storage subsystem of 100 MW advanced compressed air energy storage demonstration project[J]. High-Technology & Commercialization, 2021, 27(4): 70.
- [11] ZHANG L, CUI J, ZHANG Y, et al. Performance analysis of a compressed air energy storage system integrated into a coal-fired power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 225: 113446.
- [12] 王晓露, 郭欢, 张华良, 等. 火电厂热电联产机组与压缩空气储能集成系统能量耦合特性分析[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 598-610.  
WANG Xiaolu, GUO Huan, ZHANG Hualiang, et al. Analysis of energy coupling characteristics between cogeneration units and compressed air in thermal power plants[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 598-610.
- [12] PAN P, ZHANG M, PENG W, et al. Thermodynamic evaluation and sensitivity analysis of a novel compressed air energy storage system incorporated with a coal-fired power plant[J]. Entropy, 2020, 22(11): 1316.
- [14] 李斌, 陈吉玲, 李晨昕, 等. 压缩空气储能系统与火电机组的耦合方案研究[J]. 动力工程学报, 2021, 41(3): 244-250.  
LI Bin, CHEN Jiling, LI Chenxin, et al. Research on coupling schemes of a compressed air energy storage system and thermal power unit[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(3): 244-250.
- [15] 李美成, 高中亮, 王龙泽, 等. “双碳”目标下我国太阳能利用技术的发展现状与展望[J]. 太阳能, 2021(11): 13-18.  
LI Meicheng, GAO Zhongliang, WANG Longze, et al. Development status and prospect of solar energy utilization technology in china under goal of emission peak and carbon neutrality[J]. Solar Energy, 2021(11): 13-18.
- [16] 滕飞, 钟福春, 崔贤基, 等. 槽式光热发电与光伏发电对比分析[J]. 科技尚品, 2017(7): 209.  
TENG Fei, ZHONG Fuchun, CUI Xianji, et al. A comparative analysis of slot-type photothermal and photovoltaic power generation[J]. Premiere, 2017(7): 209.
- [17] LI J, YU X, WANG J, et al. Coupling performance analysis of a solar aided coal-fired power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 613-624.
- [18] 付立, 樊雪, 侯宏娟, 等. 槽式太阳能辅助燃煤发电系统热性能研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(8): 645-650.  
FU Li, FAN Xue, HOU Hongjuan, et al. Thermal performance analysis of a coal-fired power system aided by parabolic trough solar collectors[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(8): 645-650.
- [19] YAN H, LI X, LIU M, et al. Performance analysis of a solar-aided coal-fired power plant in off-design working conditions and dynamic process[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 220: 113059.
- [20] ESAB C, YONG S, BGLA B, et al. New integration mechanism of solar energy into 300 MW coal-fired power plant: performance and techno-economic analysis[J]. Energy, 2022, 238: 122005.
- [21] ZHAO Y, HONG H, JIN H. Appropriate feed-in tariff of solar-coal hybrid power plant for China's Inner Mongolia Region[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 378-387.
- [22] 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): 8.  
LI Bin, XU Wentao, YANG Jianmeng. Research on solar-assisted coal-fired power generation system with heat storage device[J]. Journal of Solar Energy, 2021, 42(8): 8.
- [23] 李岩, 石普, 贾亚晴, 等. 塔式太阳能光热配套系统性能研究[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(1): 6-11.  
LI Yan, SHI Pu, JIA Yaqing, et al. Performance research on a solar tower power system integration into a coal-fired power plant[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(1): 6-11.
- [24] 贾祥. 先进绝热压缩空气储能电站热力系统动态特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1.  
JIA Xiang. Study on dynamic characteristics of thermal system of advanced adiabatic compressed air energy storage power station[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1.

(责任编辑 李园)