

DOI: 10.19666/j.rlfed.202411235

压缩空气储能辅助太阳能电站 调峰性能分析

葛士宇¹, 史汪洋², 徐 钢¹, 薛小军²

(1. 华北电力大学热电生产过程污染物监测与控制北京市重点实验室, 北京 102206;
2. 山西大学电力与建筑学院, 山西 太原 030006)

[摘要] 为有效提高太阳能发电的能源利用率和运行灵活性, 提出了一种耦合太阳能光伏、太阳能光热、压缩空气储能的集成系统。在白天, 压缩空气储能系统将光伏弃电存储, 并将压缩热传递至光热电站; 在晚上, 压缩空气储能系统释放空气, 并采用光热电站的给水加热, 从而提高机组的发电负荷。基于系统模拟, 对耦合方案进行了热力学分析和经济性分析。分析结果表明: 耦合系统光热整体发电效率为 41.24%, 整体焓效率为 66.79%; 压缩空气储能系统往返效率为 72.14%, 压缩空气系统焓效率为 84.30%, 均有显著提高; 耦合系统白天的调峰深度为 7.02%, 晚上调峰深度为 19.69%; 此外, 耦合方案的动态回收周期为 3.10 年, 净现值为 4 135.06 万元, 与非耦合系统相比, 均表现良好。

[关键词] 太阳能发电; 压缩空气储能; 系统耦合; 性能分析

[引用本文格式] 葛士宇, 史汪洋, 徐钢, 等. 压缩空气储能辅助太阳能电站调峰性能分析[J]. 热力发电, 2025, 54(9): 35-45.
GE Shiyu, SHI Wangyang, XU Gang, et al. Performance analysis of peak load balancing for compressed air energy storage assisted solar power station[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(9): 35-45.

Performance analysis of peak load balancing for compressed air energy storage assisted solar power station

GE Shiyu¹, SHI Wangyang², XU Gang¹, XUE Xiaojun²

(1. Beijing Key Laboratory of Pollutant Monitoring and Control in Thermolectric Power Production, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. School of Electric Power and Architecture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In order to effectively improve the energy efficiency and operational flexibility of solar power generation, an integrated system coupling solar photovoltaic, solar thermal and compressed air energy storage is proposed. During the day, the compressed air energy storage system will store the photovoltaic abandoned power, and transfer the compression heat to the photothermal power station. At night, the compressed air energy storage system releases air and uses water supply of the photothermal power station to heat up, thereby increasing the power generation load of the unit. Based on the system simulation, the coupling scheme is analyzed thermodynamically and economically. The overall generation efficiency of the coupled system is 41.24%, while the overall exergy efficiency is 66.79%. The round-trip efficiency of the compressed air energy storage system is 72.14%, while the exergy efficiency of the compressed air system is 84.30%, both of which have increased significantly. The peaking depth of the coupled system is 7.02% in the daytime and 19.69% in the evening. In addition, the dynamic recovery cycle of the coupling scheme is 3.10 years, and the net present value is 41.350 6 million yuan.

Key words: solar power generation; compressed air energy storage; system coupling; performance analysis

收稿日期: 2024-11-12 网络首发日期: 2025-08-26

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (52406019)

Supported by: National Natural Science Foundation of China: Youth Science Foundation Project (52406019)

第一作者简介: 葛士宇 (2001), 男, 汉, 硕士研究生, 主要研究方向为压缩空气储能系统集成技术, GSY_Ncepu@163.com。

通信作者简介: 薛小军 (1992), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为火储调峰、压缩空气储能以及熔盐储热技术, XXJ377547176@163.com。

随着全球电能需求的不断增长以及化石能源消耗造成的负面效应,近年来新能源发电在世界各地取得了快速发展。其中,以光伏发电(photovoltaic, PV)和光热发电(concentrated solar power, CSP)为代表的太阳能发电技术成为了推动能源结构转型的关键技术之一^[1]。光伏发电以其成本低、适用范围广得到广泛应用;而光热电站则利用太阳能聚光发电的高效性,在提供稳定能源方面展现出巨大潜力。目前,太阳能光伏发电多采用太阳能光伏板直接将太阳能转化为电能;而太阳能光热发电则通过太阳能集热系统、熔盐系统、汽水发电系统将太阳能转化为热能、机械能、电能^[2]。然而,光伏电站和光热电站的电能输出会随外部环境及昼夜变化而波动,接入电网会给电网安全稳定运行带来巨大挑战,从而导致一定量的光伏弃电^[3]。此外,随着电网用电负荷的不断波动,光伏发电也存在运行灵活性较差的问题。

储能技术可以在用电需求低时段存储电能,在用电高峰时段释放电能。因此,储能系统可以很好地平抑太阳能发电的波动性和不连续性,同时有效提高发电系统的运行灵活性。在各种储能技术中,压缩空气储能(compressed air energy storage, CAES)因其储能容量大、建设成本低且寿命长等优点,近年来受到越来越多的关注^[4]。CAES系统通过压气机在储能时段压缩空气,在释能时段则利用压缩空气在透平中膨胀,带动发电机发电^[5]。由于空气压缩和膨胀都会伴随着热能的转移,导致CAES系统运行效率低。

为有效提高太阳能发电系统的运行灵活性,同时提高压缩空气储能系统的效率,许多学者针对两者之间的耦合做了大量研究。崔杨等^[6]提出一种先进绝热压缩系统,合理配置容量后,在有效解决弃光的前提下,最大程度对燃煤机组进行清洁代替。Yan等人^[7]提出了火电机组与CAES耦合的11种方案,从中确定了最优耦合方案,并通过算法对关键参数进行了优化,结果表明,耦合CAES储能阶段可以协助火电机组吸收可再生能源,能量释放阶段可以缓解其高负荷需求的压力,有效提高其灵活性。张文成^[8]针对传统压缩空气储能系统能量效率较低的问题,提出新型太阳能辅热式变压比CAES系统,有效提高系统储能效率和太阳能利用效率。为了同时产生电力、冷却能力和热水,以减少峰值

能源需求, Kandezi MS等^[9]引入了一种基于CAES与聚光太阳能和吸收式冷水机组相结合的新型绿色有效概念,作为一种新的混合动力。张斌^[10]构建了集成恒压压缩空气储能的新型燃气轮机系统,提高了负荷的运行效率。以上研究表明,国内外学者已经对压缩空气储能与燃煤电厂的热集成进行了广泛研究。然而,将压缩空气储能与光热熔盐电厂相结合的研究却不多。

有鉴于此,本文提出了一种基于太阳能光热电站及太阳能光伏弃电驱动的CAES系统,通过将光热电站的热能、光伏发电的弃电以及CAES系统的热能耦合集成,提升了耦合系统的效率和经济性;并基于EBSILON Professional软件平台搭建系统仿真模型,通过优选最佳方案,对耦合系统进行了热力学分析与经济性分析。本研究可为提高太阳能发电系统运行灵活性提供理论支持和参考依据。

1 系统介绍

1.1 案例太阳能发电站

本文以某太阳能发电站为研究对象,包含50 MW光伏发电系统和50 MW光热发电系统。光伏发电系统由大量光伏板组成,直接将太阳能转化为电能。光热发电系统主要由定日镜场、塔式集热器、熔盐系统、蒸汽循环发电系统组成。假设运行期内每天的光照强度均可维持稳定发电^[11]。熔盐系统中,采用太阳盐作为换热介质。此外,采用4个不同功能的换热器,将高温熔盐的热能传递至蒸汽循环发电系统中实现发电。蒸汽循环发电系统主要包含高压缸、中压缸、低压缸以及由6个加热器组成的回热系统。白天光照充分时,储热罐边充边放,机组满负荷发电;晚上无光照时,机组利用熔盐在白天存储多余的热能,可以达到白天50%的发电功率^[12]。

图1给出了案例光热机组结构示意图,表1^[13]和表2^[14]给出了案例光热机组及其回热系统在白天和晚上的运行参数。太阳能发电站中接收器存在1 MPa的压降,因为熔盐经过接收塔时,有一段上升抬举的过程,故而存在压降^[13]。从表2看出,回热系统采用汽轮机抽汽将凝结水和给水从45.9 °C加热到237.8 °C,因此可以考虑采用不同温度的凝结水或给水来对压缩空气储能系统的空气进行冷却或加热,从而实现能量梯级利用。

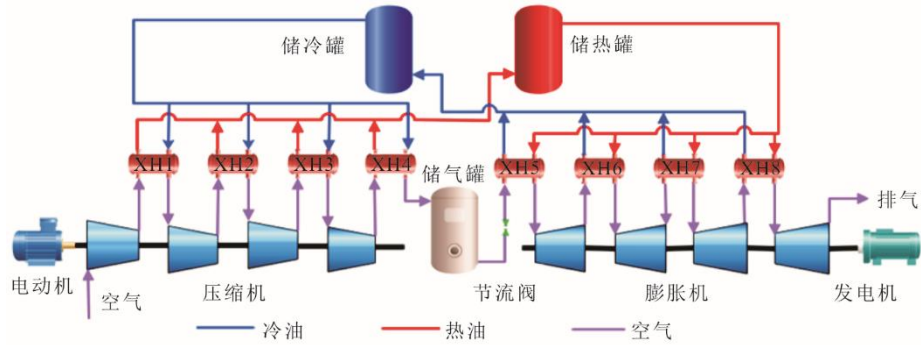


图 2 压缩空气储能系统示意

Fig.2 Schematic diagram of the compressed air energy storage system

表 3 压缩空气储能基本设计参数

Tab.3 Basic design parameters of the compressed air energy storage system

项目	1 级数	2 级数	3 级数	4 级数	项目	1 级数	2 级数	3 级数	4 级数
压缩比	4.10	3.46	3.33	2.30	膨胀比	2.92	2.89	2.85	2.82
压缩机出口压力/MPa	0.41	1.39	4.50	10.02	透平出口压力/MPa	2.34	0.82	0.29	0.10
空气质量流量/(t·h ⁻¹)	52.60	52.60	52.60	52.60	空气质量流量/(t·h ⁻¹)	105.20	105.20	105.20	105.20
压缩机等熵效率/%	90	90	90	90	透平等熵效率/%	88	88	88	88
压缩机出口温度/°C	187.0	195.0	190.0	141.0	透平进口温度/°C	120.0	120.0	120.0	120.0
储能时间/h		8			释能时间/h		4		
系统额定输入功率/MW		7.78			系统额定输出功率/MW		10.00		

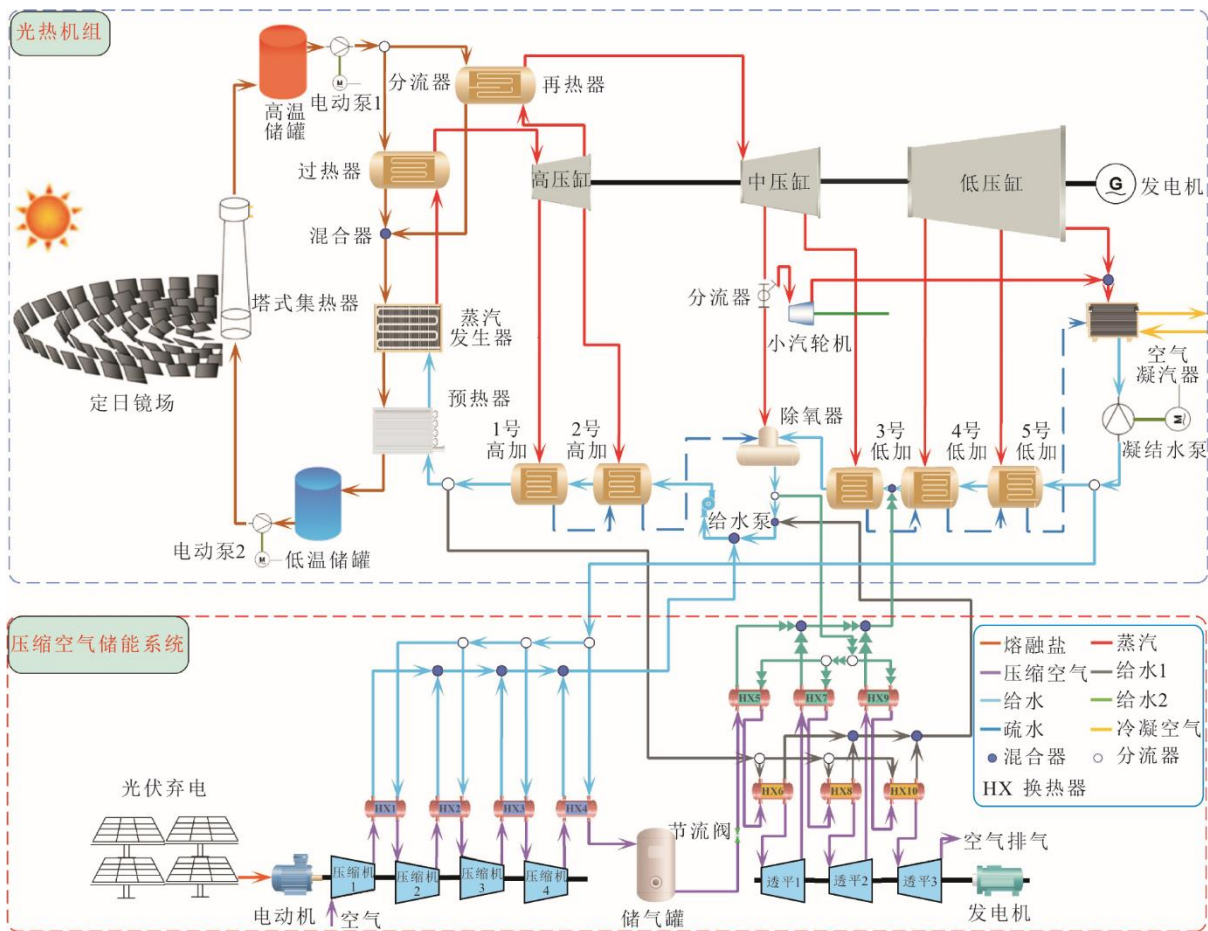


图 3 光热机组耦合压缩空气储能系统示意

Fig.3 Schematic diagram of the photothermal unit coupled with compressed air energy storage system

释能过程中,高压空气从储气罐释放,由光热机组出口给水及除氧器出口给水作为加热介质梯级加热。首先,除氧器出口给水通过5、7、9号换热器进行一次加热,冷却后的给水通入4号高温加热器出口给水;之后,整个机组出口给水通过6、8、10号换热器进行二次加热,将冷却水通入除氧器出口给水汇入机组;最后,将压缩空气储能系统发电机产生的电能输送到电网,完成整个储能和释能过程。

为保证压缩空气储能稳定运行,假设所用的光伏弃电在整个运行周期内保持稳定供应。与压缩空气储能子系统不同,根据耦合系统的质量平衡,分别选用储能时间和释能时间为8 h。通过与光热电站耦合,有效提高压缩空气储能系统的往返效率以及耦合系统的光热整体发电效率,并通过调峰提高太阳能发电系统的运行灵活性,同时省去了传统压缩空气储能系统蓄热设备,大大降低了设备投资,提高了系统的经济性和运行可靠性。

2 分析方法

2.1 系统建模

EBSILON Professional 软件在模拟热力学系统时具有较高的精准度以及普适性,因而广泛用于发电行业的各类热力系统建模。本文涉及热力机组的搭建,故选择此软件对所研究的系统进行模拟仿真。为了方便地评估耦合系统的各项性能指标,提出以下假设^[16]:

- 1) 储、释能熔盐循环量保持不变;
- 2) 锅炉效率保持不变;
- 3) 环境温度和压力分别为 25.0 °C 和 0.10 MPa;
- 4) 忽略辅助系统及周围环境对系统的影响;
- 5) 忽略流体在热交换器中流动时的传热损失和流体动能、势能的变化;
- 6) 管道压降忽略不计。

表4模型验证结果显示:光热机组熔盐循环量和系统效率等参数的设计值与模拟值误差在2%之内;压缩空气储能系统的输入、输出功率及循环效率设计值与模拟值误差在1%以内。

2.2 能量评价指标

基于热力学第一定律对耦合系统进行了能量分析。在分析过程中通过控制太阳能输入量保持不变,研究耦合系统输出功率的变化。采用耦合系统光热整体发电效率和压缩空气储能系统往返效率作为评价指标。

表4 模型验证结果
Tab.4 The model validation results

子系统	项目	设计值 ^[13,15]	模拟值	误差
光热机组	熔盐循环量/(kg·s ⁻¹)	281.51	286.09	-1.63%
	净输出功率/MW	45.30	45.30	0
	系统效率/%	39.23	38.61	1.58%
CAES系统	系统输入功率/MW	7.78	7.822	-0.54%
	系统输出功率/MW	10.00	10.07	-0.70%
	循环效率/%	64.27	63.92	0.54%

耦合系统的光热整体发电效率可用于描述系统的能量利用水平,表示为^[17]:

$$\eta = \frac{W_{\text{out}}}{W_{\text{in}}} \quad (1)$$

式中: W_{out} 为耦合系统在1个循环过程中的发电量; W_{in} 为耦合系统在1个循环过程中的能量输入量。

压缩空气储能的系统往返效率(RTE)指该系统总输出能量与总输入能量的比值,表示为^[17]:

$$\text{RTE} = E_{\text{CAES-out}} / E_{\text{CAES-in}} \times 100\% \quad (2)$$

$$E_{\text{CAES-out}} = (P_{\text{out-ch}} - P_{\text{out-ori}}) \times t_{\text{ch}} + (P_{\text{out-disch}} - P_{\text{out-ori}}) \times t_{\text{disch}} \quad (3)$$

$$E_{\text{CAES-in}} = P_{\text{in-ch}} \times t_{\text{ch}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{CAES-out}}$ 为1个循环过程中系统输出的电能, MW·h; $E_{\text{CAES-in}}$ 为1个循环过程中系统输入的光伏弃电量, MW·h; $P_{\text{out-ch}}$ 为耦合系统在充电过程中的输出功率, MW; $P_{\text{out-disch}}$ 为耦合系统在放电过程中的输出功率, MW; $P_{\text{out-ori}}$ 为原有光热机组的输出功率, MW; $P_{\text{in-ch}}$ 为系统在充电过程中的输入功率, MW; t_{ch} 为充电时间, h; t_{disch} 为放电时间, h。

2.3 调峰性能评价指标

采用调峰容量和调峰深度对耦合系统的调峰能力进行评估。系统调峰容量指耦合系统的电能输出功率与案例太阳能发电厂的电能输出功率的差值。具体而言,储能过程和释能过程中耦合系统的调峰容量计算公式分别如下^[18]:

$$P_{\text{tf,cha}} = P_0 - P_{\text{ch}} \quad (5)$$

$$P_{\text{tf,disch}} = P_{\text{disch}} - P_0 \quad (6)$$

式中: $P_{\text{tf,cha}}$ 和 $P_{\text{tf,disch}}$ 分别为储、释能过程中耦合系统调峰容量, MW; P_0 为案例光热发电机组系统电负荷, MW; P_{ch} 和 P_{disch} 分别为储能、释能过程中耦合系统总电负荷, MW。

此外,耦合系统的调峰深度指各阶段调峰容量与案例光热发电机组电能输出功率的比值。储能过程和释能过程计算公式为^[18]:

$$\xi_{\text{ch}} = \frac{P_{\text{tf, ch}}}{P_0} \times 100\% \quad (7)$$

$$\xi_{\text{disch}} = \frac{P_{\text{tf, disch}}}{P_0} \times 100\% \quad (8)$$

式中： ξ_{ch} 和 ξ_{disch} 分别为储、释能过程中耦合系统调峰深度。

2.4 焓评价指标

基于热力学第二定律，对压缩空气储能子系统进行焓分析。在压缩空气储能系统的储、释能过程中，系统输出焓与输入焓之比定义为其焓效率，表示为^[19]：

$$\eta_{\text{ex, CAES}} = \frac{e_{\text{out, CAES}}}{e_{\text{in, CAES}}} \quad (9)$$

压缩空气储能系统中各工质（水、空气、蒸汽）的焓 e_m 可表示为^[19]：

$$e_m = q_m [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)] \quad (10)$$

式中： q_m 为工质的质量流量，kg/s； h 为工质当前的焓，kJ/kg； h_0 为工质在环境状态下的焓，kJ/kg； T_0 为工质在环境状态下的温度，K； s 为工质在当前状态下的熵，kJ/(kg·K)； s_0 为工质在环境状态下的熵，kJ/(kg·K)。

对于系统整体焓效率而言，我们需要考虑熔盐的焓计算^[20]：

$$\text{Ex}_{\text{ms}} = -m_{\text{ms}} c_{p, \text{ms}} \left(T_{\text{ms}} - T_0 - T_0 \ln \frac{T_{\text{ms}}}{T_0} \right) \quad (11)$$

式中： m_{ms} 为熔盐的质量流量，kg/s； $c_{p, \text{ms}}$ 为熔盐的定压比热容，kJ/(kg·K)； T_{ms} 为熔盐的温度，K。

对此，本文提出一种整体焓效率的计算公式^[20]。储能阶段为：

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{e_d + e_{\text{out, air}} - e_{\text{in, air}}}{e_{\text{in, ms}} - e_{\text{out, ms}}} \quad (12)$$

释能阶段为：

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{e_d}{e_{\text{in, ms}} - e_{\text{out, ms}} + e_{\text{in, air}} - e_{\text{out, air}}} \quad (13)$$

式中： $e_{\text{in, ms}}$ 和 $e_{\text{out, ms}}$ 分别为熔盐的入口及出口焓，MW； $e_{\text{in, air}}$ 和 $e_{\text{out, air}}$ 分别为空气的入口焓和出口焓，MW； e_d 为系统的发电量，MW。

2.5 经济性评价指标

本文在已有光热和光伏发电机组的基础上新增了压缩空气储能系统。白天利用一部分光伏弃电将常温、常压空气压缩以存储电能；夜晚释放压缩空气，并与光热机组集成，共同发电。通过储能阶段汽轮机组多余发电，以及释能过程用电高峰时的售电，达到项目的盈利。本文采用动态投资回收期 H 和净现值 N 2个指标，分析耦合系统的经济性能。

动态投资回收期指初始资本投资与财务回报相平衡的时间点，动态投资回收期缩短，反映了项目盈利能力增强，表示为^[21]：

$$\sum_{y=1}^H \frac{I-O}{(1+i_{\text{dis}})^y} = 0 \quad (14)$$

$$H = t^+ - 1 + \frac{|(I-O)_{t^+-1}|}{(I-O)_{t^+}} \quad (15)$$

式中： I 和 O 分别为第 y 年的现金流入和现金流出，元； t^+ 为假设系统各年度累计净现金流量第一次为正或为零的年份； i_{dis} 为贴现率，%。

净现值指耦合系统在整个寿命期间（ n 年）累积的净现金流量。净现值增多，反映了项目盈利能力增强。 N 可表示为^[22]：

$$N = \sum_{y=1}^n \frac{I-O}{(1+i_{\text{dis}})^y} \quad (16)$$

表5给出了压缩空气储能系统主要设备的投资成本估算方法^[23-24]。

表5 CAES 系统主要设备投资成本估算

Tab.5 Investment cost estimation for main equipment of the CAES system

设备名称	投资成本估算（方程）	公式名词解释
压缩机	$C_{\text{com}} = \frac{N_{51} m_{\text{air}}}{N_{52} - \eta_{\text{s, Com}}} r_p \ln(r_p)$	$N_{51}=504.1$ 美元/(kg/s)； $N_{52}=0.9$ ； m_{air} 为空气的质量流量，kg/s； r_p 为压气机的压比
透平	$C_{\text{EXP}} = \left(\frac{266.3 \times m_{\text{air}}}{0.92 - \eta_{\text{EXP}}} \right) \times \ln(\Pi_{\text{EXP}}) \times (1 + e^{0.036 T_{\text{in}} - 54.4})$	T_{in} 为膨胀机入口温度，℃； η_{EXP} 为膨胀机的绝热效率； Π_{EXP} 为膨胀机的膨胀比
换热器	$Z_{\text{intc}} = Z_R \left(\frac{A}{A_R} \right)^{0.6}$	A_R 为换热器的面积，大小为100 m ² ； $Z_R=85$ 080 美元
发电机	$\text{PEC} = 60(1000W)^{0.95}$	W 为发电机的发电功率，MW
节流阀	$C_{\text{TV}} = 114.5m$	m 为质量流量，kg/s
储气室	$Z_{\text{CAS}} = 1.218 \exp \left[2.631 + 1.367 \cdot 3(\ln V_{\text{CAS}}) - 0.063 \cdot 09(\ln V_{\text{CAS}})^2 \right]$	V_{CAS} 为储气罐的体积，m ³

3 结果与讨论

3.1 能量分析

表 6 给出了耦合系统和案例太阳能发电站以及案例压缩空气储能系统（统称为原系统）的能量分析结果。保证系统耦合前后，熔盐储热系统的熔盐循环量不变，因此随着 CAES 系统的加入，耦合系统的电能输出会发生变化。对于原系统，白天净发电功率为 45.30 MW，晚上机组净发电功率为 22.65 MW；对于耦合系统，白天净发电功率为 46.61 MW，晚上净发电功率为光热机组净发电功率与 CAES 输出功率之和。

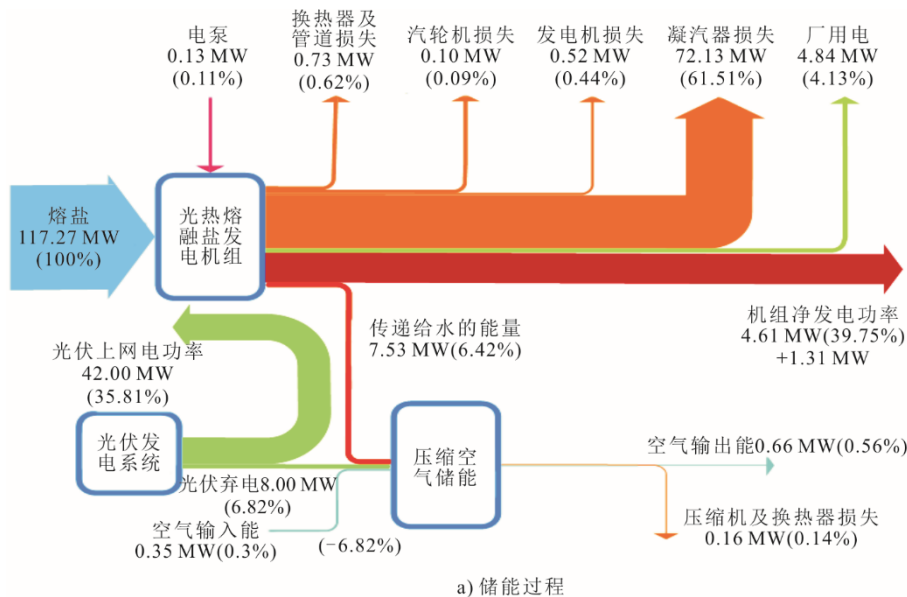
表 6 原系统与耦合系统能量分析结果
Tab.6 Energy analysis results of the primary system and the coupling system

项目	原系统	耦合系统
光伏发电功率/MW	50.00	42.00
光热机组净发电功率/MW	45.30	46.61
白天 CAES 输入功率/MW	7.78	8.00
储能时间/h	8.00	8.00
CAES 输入能量/(MW·h)	64.24	64.00
光热机组净发电功率/MW	22.65	21.04
CAES 输出功率/MW	10.00	6.07
夜晚 释能时间/h	4.00	8.00
CAES 输出能量/(MW·h)	40.00	48.56
性能指标 光热整体净发电效率/%	38.60	41.24
CAES 系统往返效率/%	64.35	72.14

为了进一步分析各系统间能量转移的情况，图 4 给出了耦合系统的能流图。由图 4 可以看出，在耦合系统储能和释能过程中，保持机组在白天和晚上时段熔盐的输入能量恒定。光热整体净发电效率为 41.24%，相比单一光热发电机组提高 2.64 百分点；压缩空气储能系统的往返效率为 72.14%，比案例 CAES 机组效率提高 7.79 百分点。储能过程中，压缩空气为光热机组的给水系统提供了 7.532 MW 的热量，从而使机组净发电量提高了 1.31 MW。释能过程中，给水系统向压缩空气储能系统输送 6.12 MW 的热量，使得压缩空气储能系统输出 6.07 MW 的电量，系统总输出电量提高了 4.46 MW。在 1 个循环过程内，压缩空气储能系统在储能过程中可存储 8 MW 的光伏弃电，耦合系统在储能及释能过程中共释放 5.77 MW（1.31 MW+4.46 MW）的电能。

3.2 调峰性能分析

表 7 给出了耦合系统的调峰性能分析结果。耦合系统在储能过程中的调峰容量主要包括消纳的光伏弃电以及输入到光热系统的压缩热所引起光热发电机组的发电功率变化值，即白天调峰容量为 6.69 MW。耦合系统释能过程的调峰容量主要包括光热机组给水系统输入压缩空气储能的能量所转化的 3 个透平的发电量以及因机组给外部能量所引起的机组发电功率变化量，即晚上调峰容量 4.46 MW。储能过程和释能过程的调峰深度分别为 7.02% 和 19.69%。由此可见，通过耦合储能系统光热机组可以有效提高其调峰性能。



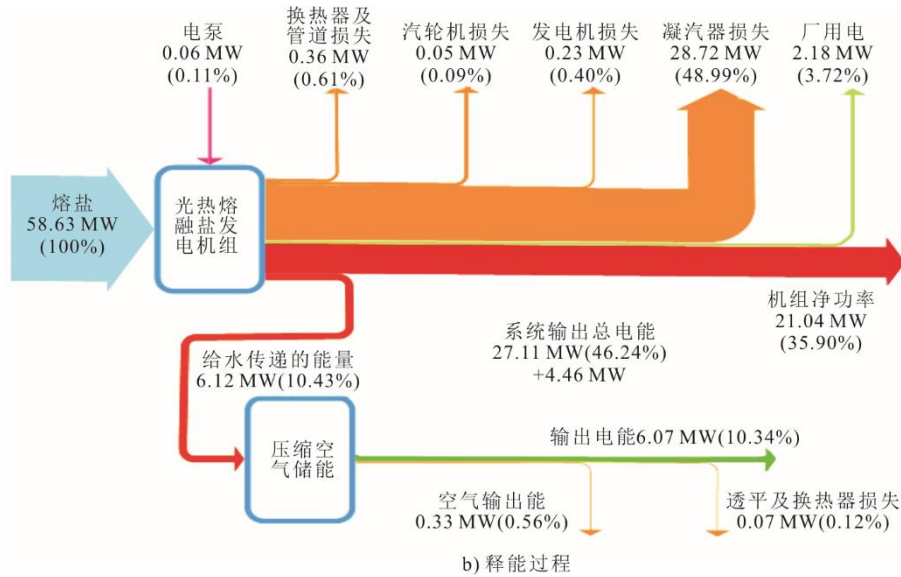


图 4 耦合系统储、释能过程能流图

Fig.4 Energy flow diagram of energy storage and release process of the coupled system

表 7 耦合系统调峰性能分析结果

Tab.7 Analysis results of peak regulation performance of the coupling system

项目	数值
原系统光伏发电输出功率/MW	50.00
原系统光热净发电输出功率/MW	45.30
压缩空气储能系统输入功率(弃电)/MW	8.00
耦合系统储能过程光热净输出功率/MW	46.61
压缩空气储能系统输出功率/MW	6.07
耦合系统释能过程光热净输出功率/MW	21.04
白天调峰容量/MW	6.69
晚上调峰容量/MW	4.46
白天调峰深度/%	7.02
晚上调峰深度/%	19.69

3.3 焓分析

表 8 为耦合系统整体焓效率分析。原系统整体焓效率为 63.69%，耦合系统整体焓效率为 66.79%，耦合系统整体焓效率比原光热机组提升了 3.10 百分点。

表 8 耦合系统整体焓效率分析

Tab.8 Exergy efficiency analysis for the coupled system

项目	数值	
原系统光热机组	熔盐焓输入/(MW·h)	35.56
	总焓输出/(MW·h)	22.65
	总焓输入/(MW·h)	35.56
	焓效率/%	63.69
耦合系统	熔盐焓输入/(MW·h)	35.56
	空气焓输入/(MW·h)	5.02
	压缩空气储能焓输出/(MW·h)	6.07
	光热机组焓输出/(MW·h)	21.04
	总焓输出/(MW·h)	27.11
总焓输入/(MW·h)	40.59	
焓效率/%	66.79	
整体焓效率提升值	3.10 百分点	

为了揭示压缩空气储能系统的性能提升方向，系统焓分析结果如表 9 所示。图 5 给出了系统内各部件焓损失结果。从表 9 可以看出，系统的焓效率为 84.30%，同时系统内存在 15.70%的焓损失。由图 5 可知，在压缩空气储能系统各部件中，节流阀的焓损失最大，达到了 3.12 MW·h，约占系统总焓损失的 19.80%，这是由于节流阀的压力损失较大。此外，1 号压缩机和 3 号透平的焓损失也较大。这是由于 1 号压缩机进口是常温空气，因此在设备效率以及系统设计不变的情况下，相较于其他压缩机而言，换热温差较大，因此焓损失也较大；而 3 号透平焓损失大则是因为其膨胀比相较于其他透平来说大了 1 倍左右，相当于压力损失增大。

表 9 压缩空气储能系统焓分析

Tab.9 Exergy analysis for the compressed air energy storage system

项目	焓或焓损失/(MW·h)	占比/%
焓输入(电力)	64.00	63.76
焓输入(空气)	0.12	0.12
焓输入(给水)	36.26	36.12
总焓输入	100.38	100.00
焓输出(空气)		0.11
焓输出(电力)	48.56	48.38
焓输出(给水)	35.95	35.82
总焓输出	84.62	84.30
压缩空气储能子系统焓效率/%		67.67
焓效率/%	84.30	
焓损率/%	15.70	

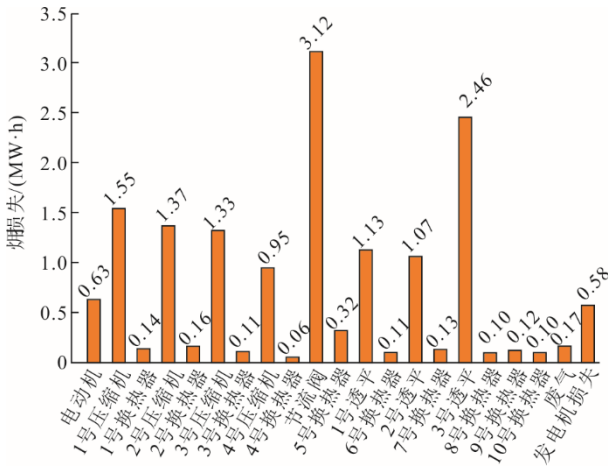


图 5 耦合系统中压缩空气储能各部件焓损失

Fig.5 Exergy loss of compressed air storage components in the coupling system

3.4 经济性分析

图 6 为耦合系统改造的设备投资成本。表 10^[23-25] 给出了耦合系统经济性分析的基本数据。储能和释能过程的电价选择甘肃省的分时电价^[25]。

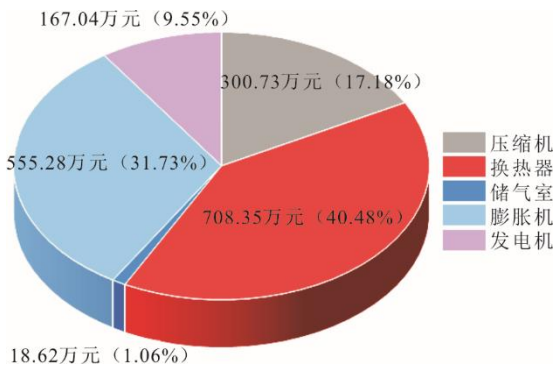


图 6 耦合系统改造投资成本

Fig.6 Retrofit investment costs of the coupling system

表 10 经济性分析基本数据
Tab.10 Basic data of economic analysis

项目	数值
压缩空气储能系统生命周期	建设周期/a 2 运行年限/a 25
年运行时间/d	300
贴现率/%	12
年度设备运行维护费用占比/%	6
储能过程电价 (09:00—17:00) / (元·(kW·h) ⁻¹)	0.314
释能过程电价 (07:00—09:00, 18:00—24:00) / (元·(kW·h) ⁻¹)	0.895

耦合系统经济性分析结果如表 11 所示。可以看出，耦合系统的设备总投资为 1 751.16 万元，新增系统年度设备运行维护费用为 105.07 万元，年度消耗电能成本作为年度燃料成本忽略不计，因此年总成本为 105.07 万元。通过发电带来的年收益为

1 029.91 万元，所以，该系统每年可获得 924.84 万元的总利润。非耦合系统的动态投资回收期 and 净现值分别为 8.69 年和 1 450.63 万元。计算得出，耦合系统动态投资回收期 and 净现值分别为 3.10 年和 4 134.06 万元。这表明，耦合系统具有较好的经济效益。

表 11 压缩空气储能系统经济性分析结果
Tab.11 Economical analysis results of the compressed air energy storage system

项目	数值	
	耦合系统	非耦合系统
总投资成本/万元	1 751.16	1 718.95
年运行维护成本/万元	105.07	103.13
年度燃料成本/万元	0	589.47
年总成本/万元	105.07	692.60
年总收入/万元	1 029.91	1 081.30
年总利润/万元	924.84	388.70
动态回收期/a	3.10	8.69
净现值/万元	4 134.06	1 450.63

4 结 论

本文提出了压缩空气储能系统与光热、光伏发电机组耦合的方案，以消纳光伏弃电，并提高系统的调峰能力和发电效率。采用能量分析、调峰性能分析、焓分析和经济性分析方法对所提出的系统性能进行了评估，具体研究结论如下。

1) 能量分析结果表明，耦合系统的光热整体发电效率为 41.24%，相比单一光热发电机组提高 2.64 个百分点；压缩空气储能系统的往返效率为 72.14%，比案例 CAES 机组效率提高 7.79%。

2) 焓分析结果表明，压缩空气储能系统的焓效率为 84.30%，其中节流阀为焓损失最大的部件，是提高该系统焓效率的关键。此外，分析了耦合系统整体焓效率，以晚上释能过程为例，从 63.69% 提升到 66.79%，提升了 3.10 百分点。

3) 调峰性能分析表明，在白天光照时段，系统的调峰容量为 6.69 MW，调峰深度为 7.02%；夜晚无光照时段，系统的调峰容量为 4.46 MW，调峰深度为 19.69%。

4) 对耦合方案进行了经济性分析，得出该系统的设备总投资为 1 751.16 万元，动态投资回收期 and 净现值分别为 3.10 年和 4 134.06 万元，表明该系统具有较好的经济性能。本文模拟光热电站时未充分考虑到 1 年中各时间段的太阳辐照强度、季节性变化和天气变化对系统产生的影响，只是假设光热电

站出力 50 MW 稳定发电, 并未做实时出力预测及调度。并且, 本文的容量配置着重点在于各效率的提升, 并未以经济性为目标优化配置。后期这 2 点均可通过 MATLAB 软件编程模拟进行实时的热集成分析, 以及在此基础上获得更好的容量配置。

[参考文献]

- [1] 张海军, 周林, 陈良奇, 等. 太阳能光热发电系统研究现状[J]. 动力工程学报, 2024, 43(3): 118-122.
ZHANG Haijun, ZHOU Lin, CHEN Liangqi, et al. Research status of solar thermal power generation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 43(3): 118-122.
- [2] 张学镭, 梁建雄, 王普, 等. 基于 S-CO₂ 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-CO₂ Brayton cycle[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(8): 1205-1215.
- [3] 刘佳佳, 巨星. 弃电热储能光伏-光热复合发电系统技术经济性分析[J]. 发电技术, 2025, 46(4): 807-817.
LIU Jiajia, JU Xing. Technical and economic analysis of abandoned thermal storage photovoltaic-photothermal composite power generation system[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(4): 807-817.
- [4] 陈昊, 张宇飞, 李瑞雄, 等. 耦合缓冲过程的绝热-等温压缩空气储能系统热力性能研究[J]. 热力发电, 2025, 54(2): 68-78.
CHEN Hao, ZHANG Yufei, LI Ruixiong, et al. Thermal performance study of adiabatic-isothermal compressed air energy storage system with coupled buffer process[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(2): 68-78.
- [5] 尹航, 王强, 朱佳华, 等. 耦合光热发电储热-有机朗肯循环的先进绝热压缩空气储能系统热力学分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(12): 3749-3760.
YIN Hang, WANG Qiang, ZHU Jiahua, et al. Thermodynamic analysis of an advanced adiabatic compressed-air energy storage system coupled with molten salt heat and storage-organic Rankine cycle[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(12): 3749-3760.
- [6] 崔杨, 于一凡, 付小标, 等. 考虑多热源协同互补的含先进绝热压缩空气储能系统容量配置方法[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4195-4208.
CUI Yang, YU Yifan, FU Xiaobiao, et al. Capacity allocation method for energy storage systems containing advanced adiabatic compressed air considering multiple heat sources with synergistic complementarity[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4195-4208.
- [7] YAN X, WANG X, HAN X, et al. Study on the thermodynamic performance of a coupled compressed air energy storage system in a coal-fired power plant[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107727.
- [8] 张文成. 新型太阳能辅助式 CAES 系统热力特性分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(29): 13-16.
ZHANG Wencheng. Thermal characteristic analysis of a new solar auxiliary heating CAES system[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(29): 13-16.
- [9] KANDEZI M S, NAEENIAN S M M. Thermodynamic and economic analysis of a novel combination of the heliostat solar field with compressed air energy storage (CAES): a case study at San Francisco, USA[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 49: 104111.
- [10] 张斌, 王光磊, 徐震, 等. 集成恒压压缩空气储能的燃气轮机 CCHP 系统特性研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(3): 369-375.
ZHANG Bin, WANG Guanglei, XU Zhen, et al. Study on system characteristics of gas turbine CCHP integrated with constant-pressure compressed air energy storage[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 369-375.
- [11] 李舒仪, 戴洪军, 陈琳. 西北地区“光热+光伏”项目投资收益优化研究[J]. 电力勘测设计, 2024(11): 12-15.
LI Shuyi, DAI Hongjun, CHEN Lin. Research on the optimization of investment income of “Photothermal + Photovoltaic” project in Northwest China[J]. Electric Power Survey & Design, 2024(11): 12-15.
- [12] 张尧翔. 多能互补分区协调消纳新能源优化调度方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2023: 1.
ZHANG Yaoliang. Multi-energy complementary partition coordination optimal scheduling method for new energy consumption[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023: 1.
- [13] ZHANG Q, JIANG K. Heat transport and load response characteristics of a molten salt solar tower power station engaged in peak regulation[J]. Applied Energy, 2024, 371: 123734.
- [14] 吴灵, 王小亮, 左萧. 光热蒸汽储能技术在煤化工中的应用研究[J]. 能源科技, 2024, 22(5): 77-80.
WU Ling, WANG Xiaoliang, ZUO Xiao. Application of photothermal steam energy storage technology in coal chemical industry[J]. Energy Science and Technology, 2024, 22(5): 77-80.
- [15] WANG C, SONG J, ZHENG W, et al. Integration of compressed air energy storage into combined heat and power plants: a solution to flexibility and economy[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 290: 117215.
- [16] 庞苏苏. 玉门“光热储能+光伏+风电”示范项目——玉门 10 万千瓦光热储能工程介绍[J]. 电力勘测设计, 2024(9): 2.
PANG Susu. “Solar thermal energy storage + photovoltaic + wind power” demonstration project in Yumen-Introduction of 100 000 kW solar thermal energy storage project in Yumen[J]. Electric Power Survey & Design, 2024(9): 2.
- [17] HOU K, WANG Y, HAN N, et al. Performance analysis of a liquid carbon dioxide energy storage system integrated with a coal-fired power plant[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 77: 109869.
- [18] 魏乐, 樊冰芬, 张怡, 等. 耦合熔盐储热的火电机组灵活调峰控制策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-13 [2025-05-27]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241471>.
WEI Le, FAN Bingfen, ZHANG Yi, et al. Research on flexible peaking control strategy of thermal power units coupled with molten salt thermal storage[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-13[2025-05-27]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241471>.
- [19] 黄兆云, 张德怀, 罗向龙, 等. 基于压缩空气储能的新型冷热电联供系统性能研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(4): 86-95.
HUANG Zhaoyun, ZHANG Dehuai, LUO Xianglong, et al. Research on the performance of a novel combined

- cooling, heating and power system based on compressed air energy storage system[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2024, 39(4): 86-95.
- [20] XU J, LIU W, WANG Z, et al. Comparative investigation on the thermodynamic performance of coal-fired power plant integrating with the molten salt thermal storage system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 89: 111738.
- [21] 赵瀚辰, 韩伟, 姚明宇, 等. 熔盐储热耦合压缩空气储能系统经济性分析[J]. *热力发电*, 2024, 53(8): 1-8.
ZHAO Hanchen, HAN Wei, YAO Mingyu, et al. Molten salt coupling of compressed air energy storage system for storing heat economy analysis[J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(8): 1-8.
- [22] 薛小军, 李云飞, 田煜昆, 等. 与燃煤电站耦合的压缩空气储能系统性能分析[J]. *动力工程学报*, 2022, 42(9): 835-842.
XUE Xiaojun, LI Yunfei, TIAN Yukun, et al. Performance analysis of compressed air energy storage system coupled with coal-fired power plant[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(9): 835-842.
- [23] XUE X, LI S, SHI T, et al. Performance analysis of a compressed air energy storage incorporated with a biomass power generation system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248: 123281.
- [24] OLABI A G, WILBERFORCE T, RAMADAN M, et al. Compressed air energy storage systems: components and operating parameters: a review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2021, 34: 102000.
- [25] 甘肃省发展和改革委员会. 甘肃省发展和改革委员会关于调整销售电价及优化峰谷分时电价政策有关事项的通知: 甘发改价格(2024)424号[EB/OL]. (2020-11-30) [2025-05-27]. <https://fzgg.gansu.gov.cn/fzgg/c106108/202106/18022c0ea91e4a9ab215bc3d28b79c06.shtml>. Gansu Provincial Development and Reform Commission. Notice of Gansu Provincial Development and Reform Commission on matters related to adjustment of sales electricity price and optimization of peak-valley time-sharing electricity price policy: GFGJG (2024) No.424[EB/OL]. (2020-11-30) [2025-05-27]. <https://fzgg.gansu.gov.cn/fzgg/c106108/202106/18022c0ea91e4a9ab215bc3d28b79c06.shtml>.

(责任编辑 杨嘉蕾)