

DOI: 10.19666/j.rlfed.202406140

考虑灵活运行模式的太阳能集成液化空气 储能系统性能研究

祝洪青¹, 周宇飞², 张汉飞², 段立强²

(1. 国核电力规划设计研究院有限公司, 北京 100095;
2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘要] 针对目前液化空气储能系统往返效率偏低的问题, 提出了操作更加灵活的新型耦合太阳能热的液化空气储能系统。该系统放电过程配备了串联双级空气加热器, 可在提高往返效率的同时允许系统在低太阳辐照情况下以传统方式运行。对新系统进行了主要参数敏感性分析和焓分析, 结果表明: 在允许范围内, 液化温度越低, 充电压力越低, 放电压力越高, 系统往返效率越高; 系统最优往返效率可达 72.4%, 太阳辐射不足时系统仍能以 53.6% 的往返效率运行; 系统焓效率为 38.0%, 其中太阳能集热场的焓损最大, 占总焓损的 52.4%, 其次是节流阀与热电发电机; 在换热器中, 冷箱和蒸发器焓损较大。

[关键词] 液化空气储能; 太阳能; 槽式集热器; 系统集成; 图像焓分析

[引用本文格式] 祝洪青, 周宇飞, 张汉飞, 等. 考虑灵活运行模式的太阳能集成液化空气储能系统性能研究[J]. 热力发电, 2024, 53(10): 32-40. ZHU Hongqing, ZHOU Yufei, ZHANG Hanfei, et al. Performance of an integrated solar liquid air energy storage system with flexible operation mode[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(10): 32-40.

Performance of an integrated solar liquid air energy storage system with flexible operation mode

ZHU Hongqing¹, ZHOU Yufei², ZHANG Hanfei², DUAN Liqiang²

(1. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100095, China;
2. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A new type of liquid air energy storage (LAES) system coupled with solar energy is proposed to address the issue of low round-trip efficiency (RTE) in current LAES systems. The discharging process of the new system is equipped with series-connected two-stage air heaters, which improves the RTE while allowing the system to operate in conventional ways under low solar radiation conditions. Sensitivity analysis of main parameters and exergy analysis are conducted on the new system, and the results show that, within the allowable range, the lower the liquefaction temperature, the lower the charging pressure and the higher the discharging pressure, resulting in higher RTE of the system. The optimal RTE of the system can reach 72.4%, and the system can still operate at an RTE of 53.6% when solar radiation is insufficient. The exergy efficiency of the new system is 38.0%, among which the solar collector field has the highest exergy destruction, accounting for 52.4% of the total exergy destruction, followed by the throttle valve and thermoelectric generator. In heat exchangers, there is significant exergy destruction in cold boxes and evaporators.

Key words: liquid air energy storage; solar energy; parabolic trough collector; system integration; image exergy analysis

根据国际能源署数据, 2023 年全球可再生能源装机容量比 2022 年增长了 50%, 装机容量的增长

速度比过去 30 年任何时候都快^[1]。可再生能源的主要问题是输入波动较大, 电网无法全部消纳其发电

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52076078)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52076078)

第一作者简介: 祝洪青 (1972), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向为火电厂、核电常规岛热力系统及设备, zhuHongqing@spic.com.cn。

通信作者简介: 张汉飞 (1986), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为先进能量系统集成优化, hanfei.zhang@ncepu.edu.cn。

量^[2]。而储能技术可以实现需求侧管理,平抑新能源电力波动^[3-4],促进可再生能源的应用和发展。

电网级储能技术包括抽水蓄能、压缩空气储能和液化空气储能(liquid air energy storage, LAES)。抽水蓄能电站的选址需要满足水位落差,初投资高。压缩空气储能具有储能能量大、输出功率高等优点^[5],但其需要密封性能好的地下洞穴以储存高压空气^[6]。LAES 概念于 1977 年被 Smith 提出^[7],系统中的高压空气会被冷却到低温,再经膨胀过程以常压、液态存储,摆脱地理条件限制的同时提升了能量密度^[8],具有极大发展前景。

LAES 技术面临的主要问题是往返效率(round trip efficiency, RTE)较低,一般在 40%~55%^[9-11]。She 等人^[12]利用有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)吸收 LAES 系统的多余压缩热,往返效率提高了 12%。Park 等人^[13]利用外部冷源液化天然气冷却多级压缩过程并提供额外膨胀功,系统往返效率达到 187.4%。Nabat 等人^[14]将外部热能引入 LAES 系统中,利用低质量电能转变为热能存储在混凝土棒阵列中,放电过程可用此热能复温空气至 1 300 K,该系统往返效率达到 61.13%,焓效率为 52.84%。可见,外部能量的引入可大幅改进 LAES 系统性能。太阳能作为一种易获取的清洁能源,也可用于辅助 LAES 系统性能提升。宋锦涛^[15]将蓄热太阳能系统和海水淡化系统集成到 LAES 系统中,往返效率高达 132.2%。Derakhshan 等人^[16]将槽式太阳能集热系统与 LAES 系统相结合,焓分析结果表明槽式集热器是焓损占比最大的部件。Nabat 等人^[17]将聚光太阳能技术与 LAES 系统相耦合,该系统往返效率和焓效率分别为 54.05%和 46.51%。可见,太阳能的引入可显著提升 LAES 系统往返效率。但是,上述研究在放电过程中均使用太阳能热作为唯一热源来加热做功空气,该配置在太阳辐射强度较低时无法复温空气,系统将面临放电过程无法启动的问题;同时,余热利用系统能量损失巨大。

基于上述问题,本文提出了一种新型耦合太阳能热的 LAES 系统(solar coupled liquid air energy storage, S-LAES)。该系统将太阳能热与 LAES 系统灵活集成,使用串联双级空气加热器(压缩热空气加热器和太阳能热空气加热器)连续提高放电过程做功空气温度,同时系统在连续低太阳辐照天气依然能够以基础 LAES 模式运行。对 S-LAES 系统进行了主要参数敏感性分析和焓分析,揭示了系统

性能和节能潜力。研究结果可为太阳能辅助 LAES 系统提供新的参考。

1 S-LAES 系统描述

S-LAES 系统包括基础 LAES 模块、余热利用模块和太阳能热收集模块,系统结构示意图如图 1 所示。S-LAES 系统运行流程如下。

1) 充电过程 空气从压气机 1 入口进入,首先经历 4 级压缩与级间冷却过程。导热油从冷油罐中流出,进入级间冷却器带走空气压缩产生的热量储存到热油罐中。随后,高压空气进入冷箱,吸收未液化空气和蓄冷流体的冷能,达到较低温度后,再经节流阀膨胀至常压。节流阀出口的气液混合态空气流入气液分离器,产生的液态空气流入液空罐,未液化空气返回冷箱释放冷能。

2) 放电过程 液态空气从液空罐中流出,被液空泵加压后进入蒸发器蒸发。蒸发器 1 的蓄冷流体为丙烷,蒸发器 2 的蓄冷流体为甲醇。吸收了冷能的蓄冷流体存储到冷储罐中,下次充电时再将冷能传递给高压空气。蒸发器 2 出口的空气依次流经低温加热器和高温加热器,分别吸收压缩热和太阳能热,逐步提高温度,最后进入空气透平做功。为了充分利用余热,系统耦合了 ORC 和热电发电机。ORC 工质加压后先在预热器中与空气透平排气换热,随后进入 ORC 换热器吸收剩余空气压缩热,再进入透平做功。ORC 换热器出口的导热油与低温加热器出口的导热油混合,进入到热电发电机中被环境水冷却,利用温差发电。在太阳能热收集模块中,当太阳辐照强度足够时,熔盐从冷罐中流出,在集热器中吸收太阳能热后再储存到热罐中。当放电进行时,高温熔盐从热罐流入高温加热器加热做功空气,最终再返回到冷罐中。

3) 灵活运行模式 系统以上述额定工况运行时,阀门 V1、V3 和 V5 全开,阀门 V2、V4 和 V6 全关。如遇到连续恶劣天气导致高温熔盐缺失时,S-LAES 系统以基础 LAES 模式运行。此时,阀门 V1、V3 和 V5 全关,阀门 V2、V4 和 V6 全开,高温加热器退出运行,仅低温加热器工作。此灵活运行模式可使系统在任何天气情况下进行放电,保证了基本输出功率。

S-LAES 系统主要设计参数见表 1。ORC 工作流体为 R32,因其对环境的破坏更小^[18],太阳能集热场工质为太阳盐(60% NaNO₃+40% KNO₃),导热油为 Dowtherm-G 型。

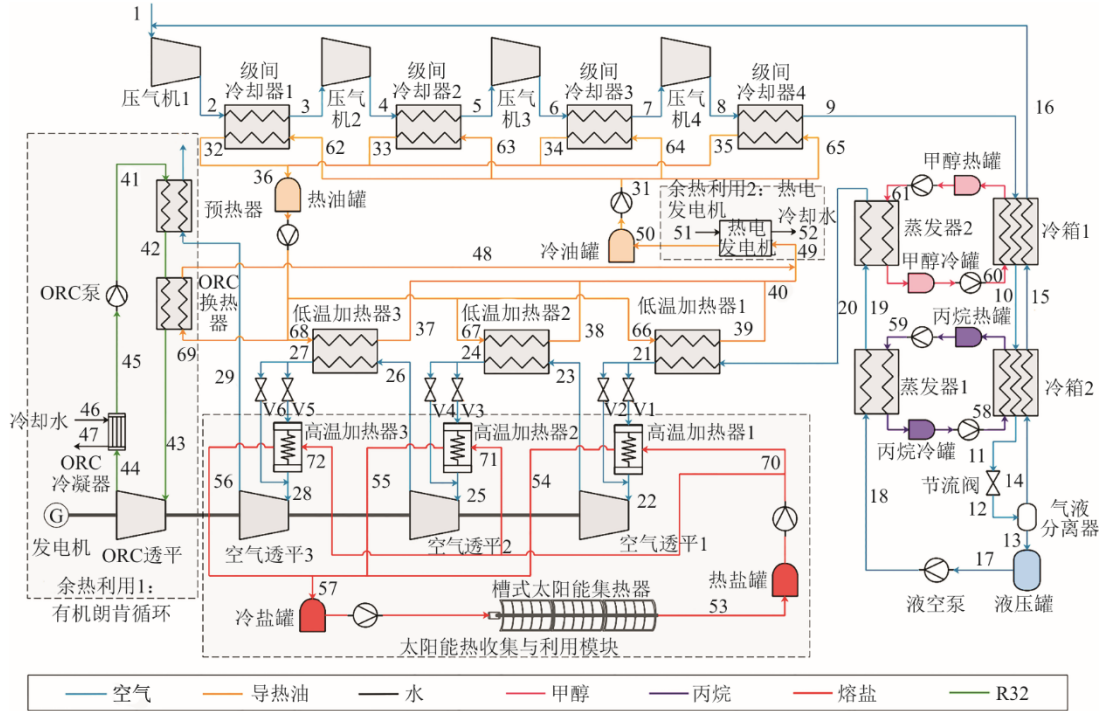


图 1 新型 S-LAES 系统流程
Fig.1 Flowchart of the novel S-LAES system

表 1 S-LAES 系统主要设计参数
Tab.1 Main design parameters of the S-LAES system

项目	数值	项目	数值
级间冷却器最小温差/℃	10 ^[14]	压气机效率/%	85 ^[19]
冷箱最小温差/℃	4 ^[20]	空气透平效率/%	85 ^[19]
蒸发器最小温差/℃	4 ^[20]	ORC 透平效率/%	80 ^[14]
低温加热器最小温差/℃	7 ^[20]	液空泵效率/%	70 ^[19]
ORC 各换热器最小温差/℃	5 ^[20]	ORC 泵效率/%	75 ^[21]
高温加热器出口空气温度/℃	320	充放电时长/h	8
法向辐射强度/(W·m ⁻²)	800	集热器出口熔盐温度/℃	400
单个集热器长度/m	150.00 ^[22]	集热器开口宽度/m	5.76 ^[23]
集热器数量	31	最大光学效率/%	74 ^[22]
环境温度/℃	25 ^[20]	环境压力/MPa	0.1 ^[12]

2 模型与评价指标

使用 Aspen Hysys 软件搭建了 S-LAES 的系统模型。模拟基本假设和边界条件如下：

- 1) 空气被视为由氧气与氮气组成的理想气体；
- 2) 忽略换热器压降以及流体流动时动能和势能变化；
- 3) 忽略换热器、管道和储罐中各工质热损失；
- 4) 环境温度为 25 ℃，大气压力为 0.1 MPa。

2.1 数学模型

压气机和泵都消耗电能以实现对流体的增压与输送，其等熵效率表达式为^[20]：

$$\eta_c = \frac{h_{out,is} - h_{in}}{h_{out} - h_{in}} \quad (1)$$

式中： η_c 为压缩设备的等熵效率； h 为流体比焓，kJ/kg；下标 in 和 out 分别代表进口和出口状态；下标 is 代表等熵绝热状态。

压气机与泵的耗功可用下式计算^[20]：

$$W_c = m_{in}(h_{out} - h_{in}) \quad (2)$$

式中： W_c 为压缩设备耗功，kW； m 为流体质量流量，kg/s。

透平等熵效率的表达式为^[20]：

$$\eta_t = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{out,is}} \quad (3)$$

式中: η_t 为透平的等熵效率。

透平做功可用下式计算^[20]:

$$W_t = m_{in}(h_{in} - h_{out}) \quad (4)$$

式中: W_t 为透平做功, kW。

系统中换热器能量平衡方程为^[17]:

$$m_{cs,in}(h_{cs,out} - h_{cs,in}) = m_{hs,in}(h_{hs,in} - h_{hs,out}) \quad (5)$$

式中: 下标 cs 和 hs 分别代表冷流体和热流体。

槽式集热器的能量平衡方程为:

$$Q_{solar} = m_{ms,in}(h_{ms,out} - h_{ms,in}) \quad (6)$$

式中: Q_{solar} 为集热器吸收的太阳能热, kW; 下标 solar 代表熔盐。

忽略太阳能集热系统的管道热损失, Q_{solar} 可由下式计算^[17]:

$$Q_{solar} = \eta_{op} \text{DNI} \cdot \text{WID} \cdot L \cdot N \quad (7)$$

式中: η_{op} 为集热器光学效率; DNI 为法向辐射强度, W/m^2 ; WID 和 L 分别为集热器宽度和长度, m; N 为集热器数量。

热电发电机的输出功率为^[14]:

$$W_{TEG} = Q_h \eta_{TEG} \quad (8)$$

式中: W_{TEG} 为热电发电机输出功率, kW; Q_h 为冷却水吸热量, kW; η_{TEG} 为热电发电机效率。

η_{TEG} 可用下式计算^[14]:

$$\eta_{TEG} = \eta_{carnot} \frac{\sqrt{1 + ZT_{average}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{average}} + T_{cs} / T_{hs}} \quad (9)$$

式中: T_{cs} 和 T_{hs} 分别为冷、热流体工作温度, K; η_{carnot} 为冷、热源温度分别为 T_{cs} 和 T_{hs} 的卡诺循环效率; $ZT_{average}$ 为半导体性能参数, 取值可参考文献[14]。

2.2 评价指标

液化率反映了系统蓄释冷部分的性能, 可用下式计算^[20]:

$$R_l = \frac{m_{l3}}{m_{l2}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: R_l 为液化率, %。

S-LAES 系统对外输出的总净功率被定义为:

$$W_{net} = W_{AT} + W_{OT} + W_{TEG} - W_{LAP} - W_{ORCP} \quad (11)$$

式中: W_{AT} 为空气透平总功, kW; W_{OT} 为 ORC 透平做功, kW; W_{LAP} 为液空泵耗电, kW; W_{ORCP} 为 ORC 泵耗电, kW。

往返效率 RTE 为净输出功率与充电过程压气机消耗功率的比值, 是系统层面的重要评价指标, 可用下式计算:

$$\text{RTE} = \frac{W_{net} t_{dis}}{W_{AC} t_{cha}} \quad (12)$$

式中: W_{AC} 为压气机总耗电, kW; t_{cha} 和 t_{dis} 分别为充、放电过程时长, h。

利用热力学第二定律全面评价系统性能, 流股的焓为^[24]:

$$E_x = m[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (13)$$

式中: E_x 为流股焓, kW; s 为流股比熵, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 下标 0 代表环境状态。

太阳能输入焓的计算公式为^[16]:

$$E_{x,solar} = \text{DNI} \cdot \text{WID} \cdot L \cdot N \left[1 - \frac{4}{3} \frac{T_a}{T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (14)$$

式中: $E_{x,solar}$ 为太阳能输入焓, kW; T_a 为环境温度, K; T_s 为太阳表面温度, K。

S-LAES 系统总焓效率的计算公式为^[24]:

$$\eta_{ex} = \frac{(W_{AT} + W_{OT} + W_{TEG} - W_{LAP} - W_{ORCP}) t_{dis}}{(W_{AC} + E_{x,solar}) t_{cha}} \quad (15)$$

图像焓 (energy utilization diagram, EUD) 分析方法是 Ishida 于 1982 年提出的先进焓分析方法^[25], 与传统黑箱模型不同, 图像焓分析揭示了能量转化过程中能量品位和数量的变化。EUD 图的横坐标为能量转化数量, 纵坐标为能级。每个能量转化过程有能量释放侧 A_{ed} 和能量接受侧 A_{ea} , 两者间的面积代表能量转化过程中的焓损。能级定义为:

$$A = \frac{\Delta E_x}{\Delta H} \quad (16)$$

式中: A 为能级; ΔE_x 为过程中的焓变, kW; ΔH 为过程中的焓变, kW。

3 结果与讨论

下面对充放电过程、余热利用部分以及太阳能利用部分主要参数变化对 S-LAES 系统性能的影响进行分析, 并对系统进行焓分析, 进一步揭示系统节能潜力。在进行参数敏感性分析时, 无关参数保持不变。

3.1 充电过程参数影响

充电压力和液化温度是充电过程重要的影响参数。液空泵出口的液态空气温度低于 -190°C , 考虑到换热器最小温差, 液化温度最低为 -183°C 。充电压力与液化温度对液化率的影响如图 2 所示。由图 2 可见: 充电压力不变时液化率随液化温度的降低而上升; 当液化温度一定时, 充电压力增大会使液化率略有降低。可见, 并不是充电压力越高液化率越大^[4], 但充电压力过低会导致蒸发器不满足设定的最小温差。在液化温度为 -183°C 时, 充电压力

最低可达 15.5 MPa, 此时液化率达到最大值 85.3%。

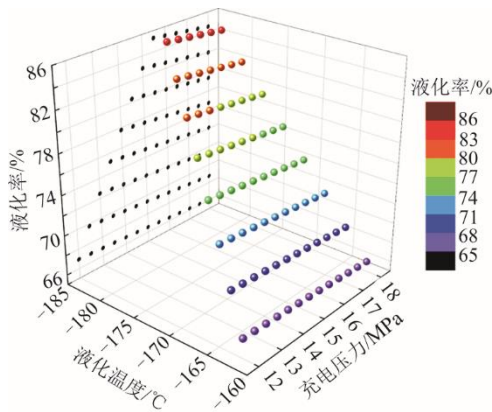


图 2 充电压力与液化温度对液化率的影响
Fig.2 Influence of charging pressure and liquefaction temperature on liquefaction rate

假设 ORC 工作压力与放电压力均为定值, 图 3 展示了充电过程参数对 RTE 的影响。与图 2 趋势类似, 液化温度降低使 RTE 增大。这是因为液化率上升, 增加了放电过程空气流量和空气透平做功; 同时, 液化率上升也会导致低温加热器导热油用量增加, 减少供给 ORC 的导热油, 使 ORC 净功减小。并且, 低温加热器出口导热油温度高于 ORC 换热器出口导热油温度, 导致高液化率对应的热电发电机入口热流温度更高, 产功增加。这 3 部分做功中空气透平做功是影响 RTE 变化的主要因素。充电压力的提高会明显降低系统的 RTE, 主要原因和前述一致。

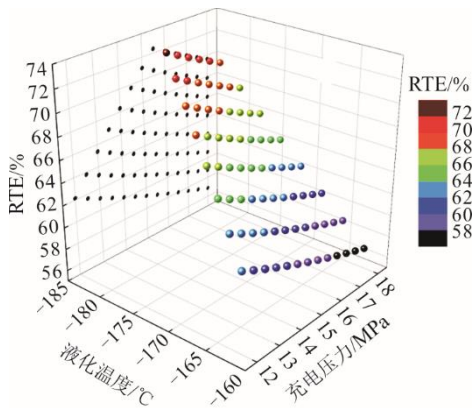


图 3 充电压力与液化温度对往返效率的影响
Fig.3 Influence of charging pressure and liquefaction temperature on RTE

3.2 放电过程参数影响

放电过程主要的影响参数是放电压力, 即液空泵出口压力。提高放电压力会提高液空泵和蒸发器的出口温度, 这受制于选定的最小换热温差, 因此

放电压力不可一味提高。充电压力与液化温度对往返效率的影响如图 4 所示。由图 4 可见, 放电压力越高, 系统 RTE 越高。这是因为放电压力上升使空气透平净功大幅增加, 同时, 压比增加使透平排气温度降低, 影响 ORC 预热器的换热, 导致图 1 中流股 42 温度降低。为了使 ORC 透平入口温度不变, 可减小 R32 流量, ORC 做功相应减少。而流股 42 的温度降低也导致了流股 48 和 49 的温度降低, 使热电发电机做功减少。但空气透平做功依然占据主导, 且空气压缩耗功不变, 故系统总净功随释能压力提高而增加。

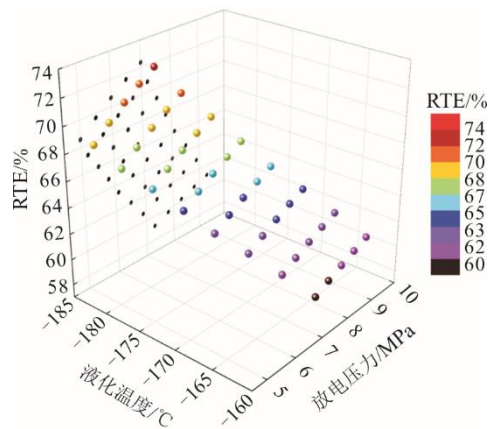


图 4 放电压力与液化温度对往返效率的影响
Fig.4 Influence of discharging pressure and liquefaction temperature on RTE

3.3 ORC 工作压力影响

ORC 透平背压为 2.1 MPa, 此时 R32 的饱和温度约为 33 °C, 可用环境水来冷却。过高的透平入口压力会导致排气干度较低, 过低的透平入口压力会降低循环效率。ORC 工作压力对系统性能的影响如图 5 所示。由图 5 可见, 随着工作压力的提高, ORC 的净输出功率先增加后减小, 在 10~11 MPa 达到最大值。同时还可以看到, 热电发电机做功随 ORC 工作压力的提高而提高, 原因是 ORC 泵出口工质温度升高导致预热器出口的工质温度升高, 同时, 增加了工质流量以控制 ORC 换热器运行在额定端差附近。流股 48 的温度随流股 42 的温度升高而升高, 导致与流股 49 混合后进入热电发电机的导热油温度略有升高, 增加了其做功。但 ORC 和热电发电机总净功的变化趋势依然是先增大后减小, 在 ORC 工作压力为 11 MPa 时达到最大值。此时, 充放电部分状态不变, 因此系统 RTE 呈现相同变化趋势。

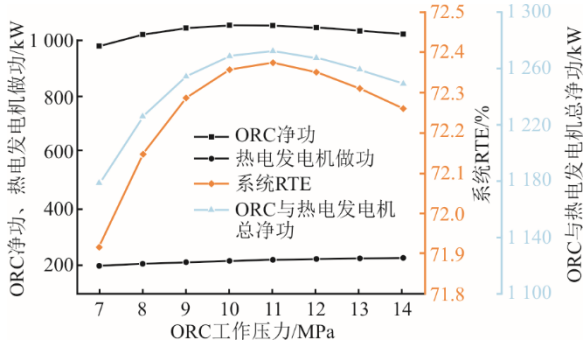


图 5 ORC 工作压力对系统性能的影响
Fig.5 Influence of ORC working pressure on system performance

3.4 DNI 的影响

集热场的入口熔盐温度设计值为 246 °C，高于太阳盐的凝固点，集热器出口熔盐温度设计值为 400 °C。在 DNI 变化时，改变熔盐流量以维持集热器进、出口温度。不同熔盐流量会影响高温加热器出口流体温度，进而影响系统性能。法向辐射强度对系统性能的影响如图 6 所示。

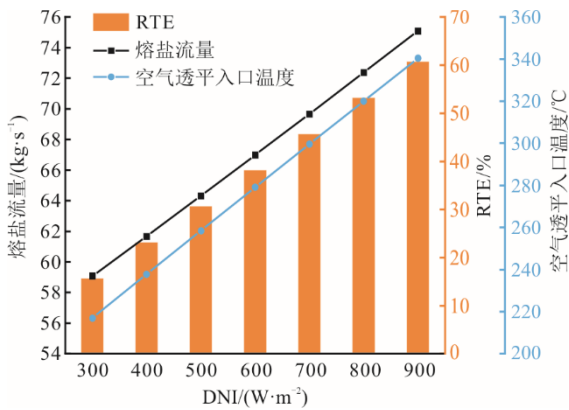


图 6 法向辐射强度对系统性能的影响
Fig.6 Influence of DNI on system performance

由图 6 可见，随着 DNI 的增长，熔盐流量和空气透平入口温度以及系统 RTE 几乎呈线性增长。这是因为 DNI 的提高使透平入口温度提高，压比不变时，空气透平出口温度也提高，使得低温加热器用油量减少，ORC 换热器的导热油用量增多，使 ORC 净功提高。而导热油经 ORC 利用后余热温度高于加热空气后的余热温度，所以高 DNI 时热电发电机入口热流体温度较高，效率和产功随之提高。

表 2 给出了在使用前几节中寻到的最优参数情况下，S-LAES 系统最优性能以及遭遇连续恶劣天气时系统以基础 LAES 模式运行时的性能参数。

表 2 S-LAES 系统性能参数
Tab.2 Performance parameters of the S-LAES system

运行模式	项目	数值
S-LAES	压缩耗功/kW	20 384
	液空泵耗功/kW	305
	空气透平入口温度/°C	320.0
	空气透平做功/kW	13 786
	ORC 净功/kW	1 051
	热电发电机做功/kW	221
	液化率/%	85.3
	RTE/%	72.4
	焓效率/%	38.0
	LAES	压缩耗功/kW
液空泵耗功/kW		305
空气透平入口温度/°C		173.6
空气透平做功/kW		10 291
ORC 净功/kW		933
热电发电机做功/kW		13
液化率/%		85.3
RTE/%		53.6
焓效率/%		53.6

3.5 焓分析

设计工况下 S-LAES 系统的焓效率为 38.0%，图 7 展示了系统主要环节的焓损失占总焓损失的百分比。由图 7 可以看到，太阳能集热场在系统中焓损占比最大，超过了其他部分的总和。因此，当系统以基础 LAES 模式运行时，由于集热场停运，系统焓效率提升。充电过程焓损占比达到了 23.6%，放电过程焓损占比为 16.1%，余热利用部分的焓损占比最小。

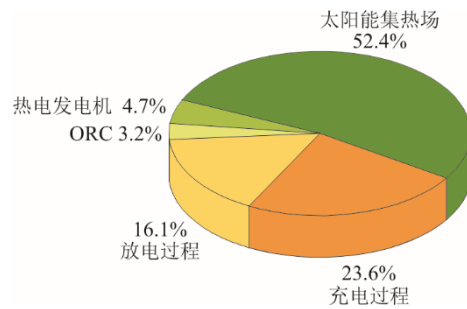


图 7 S-LAES 系统各环节焓损占比
Fig.7 Exergy destruction proportion in each part of the S-LAES system

图 8 为 S-LAES 系统主要部件的 EUD 图。从图 8 中可看到系统各部分能量转换过程中能量数量和质量的变化的。整个充电过程焓损的 35.6% 发生在节流阀中，图 8a) 展示了除节流阀以外的充电过程 EUD 图，经过多级压缩后，空气能级在冷箱中迅速下降。可以看到，冷箱 2 的阴影面积较大，其焓损也较大，是充电过程众焓损仅次于节流阀的部件。

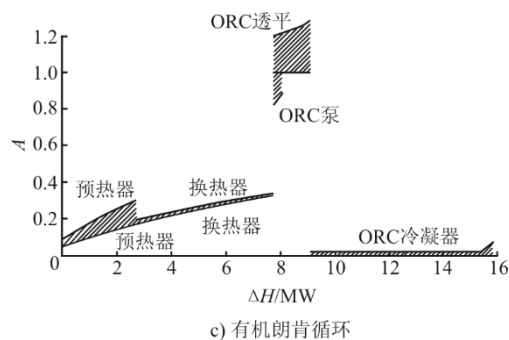
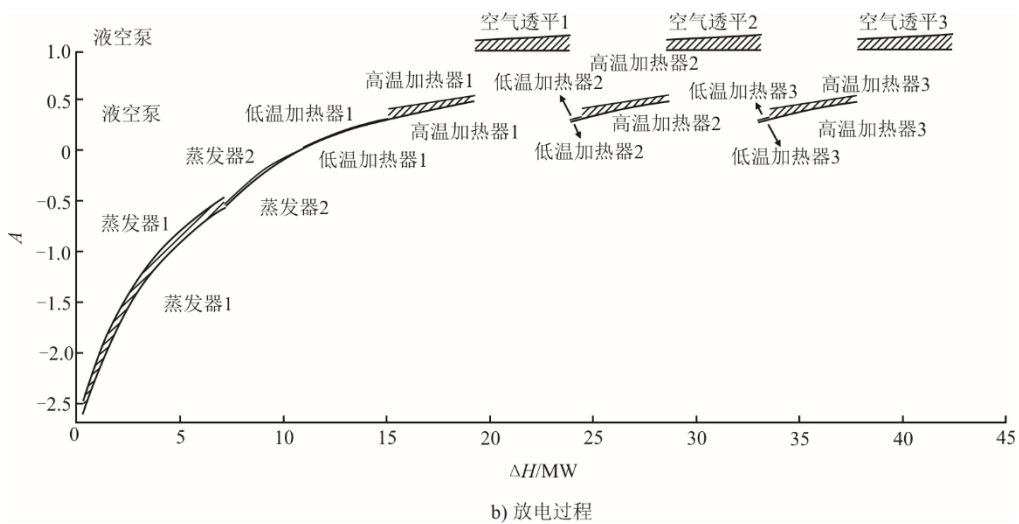
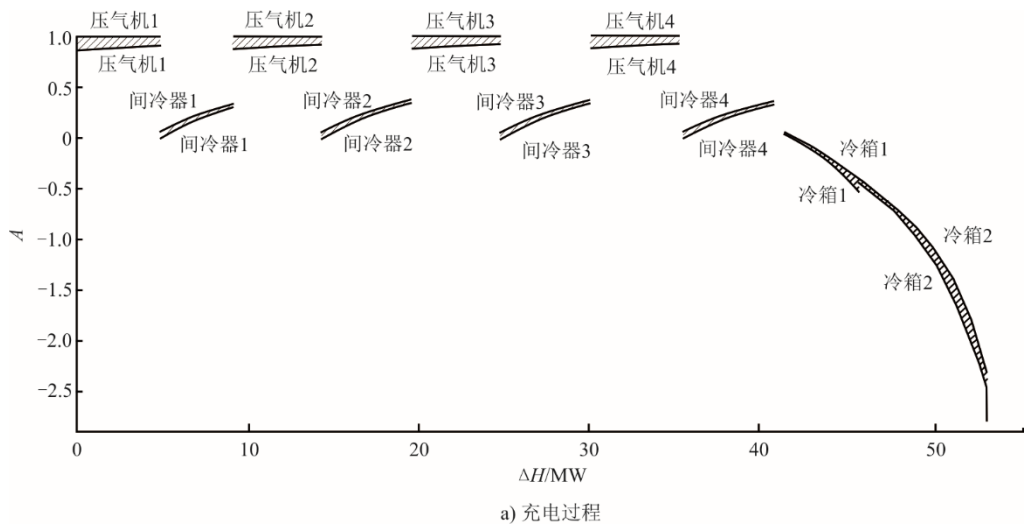


图 8 S-LAES 系统主要过程 EUD 图
Fig.8 EUD diagram of main process of the S-LAES system

由图 8a)可见：两级冷箱的总焓损在充电过程中占 17.4%；随后是压气机，每级焓损约占充电过程总焓损的 9.0%；级间冷却器的焓损较小。在放电过程中，随着蒸发和加热的进行，空气能级不断提

升。其中，蒸发器 1 的焓损最大，约占放电总焓损的 17.0%，随后是三级空气透平，其余换热器焓损较小。在 ORC 中，透平、预热器和冷凝器焓损较大，S-LAES 系统凭借其高往返效率、高灵活性和

可整合可再生能源的能力, 展现出广阔的应用前景, 可在风能和太阳能资源丰富的区域作为电网级储能解决方案, 提升电力系统的稳定性和效率, 尤其适用于需要持续供电的关键基础设施。但是, S-LAES 系统的实际应用也面临多重挑战。成本效益是首要考量; 其次, 系统长期运行的稳定性和可靠性需通过大规模示范项目进一步验证; 同时, 与电池储能等成熟技术相比, S-LAES 系统在能量密度和响应速度方面的提升空间仍需探索。

4 结 论

针对目前液化空气储能系统往返效率低的问题, 本文提出了一种具有灵活运行模式的耦合太阳能的液化空气储能 S-LAES 系统。

1) 本文所提 S-LAES 系统的最优往返效率为 72.4%, 相比传统 LAES 系统, 往返效率提升超过了 20.0%。在太阳辐照低的天气下, 可将太阳能热空气加热器退出运行, 系统仍能以 53.6% 的往返效率继续运行。

2) 在采用的太阳能集热场运行模式下, 熔盐入口温度和系统往返效率与太阳辐射强度正相关, 且变化趋势接近线性。

3) 对 S-LAES 系统进行的焓分析表明, 太阳能集热场的焓损失最大, 占系统全部焓损失的 52.4%。其次是节流阀和热电发电机焓损, 占比分别达 8.4% 和 4.7%。在各换热器中, 冷箱 2 和蒸发器 1 的焓损最大。

[参 考 文 献]

- [1] IEA. Renewables 2023: analysis and forecasts to 2028[EB/OL]. (2024-01-17) [2024-06-05]. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.
- [2] CHEN L, DAI Y, MIN Y, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of wind power with power electronic interface[C]//2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). 2015: 1-5.
- [3] LACHURIYA A, KULKARNI R D. Stationary electrical energy storage technology for global energy sustainability: a review[C]//2017 International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE). 2017: 1-6.
- [4] 何青, 王立健, 郝银萍, 等. 深冷液化空气储能系统的优化与方案设计[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4478-4487.
HE Qing, WANG Lijian, HAO Yiping, et al. Optimization and design of the liquefied air energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4478-4487.
- [5] 李佳佳, 李兴朔, 魏凡超, 等. 耦合火电机组的新型压缩空气储能系统技术经济性评估研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9171-9183.
LI Jiajia, LI Xingshuo, WEI Fanchao, et al. Research on techno-economic evaluation of new type compressed air energy storage coupled with thermal power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9171-9183.
- [6] 何子睿, 齐伟, 宋锦涛, 等. 耦合液化天然气的液化空气储能系统热力学分析[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1589-1596.
HE Zirui, QI Wei, SONG Jintao, et al. The thermodynamic analysis of a liquefied air energy storage system coupled with liquefied natural gas[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1589-1596.
- [7] SMITH E M. Storage of electrical energy using supercritical liquid air[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1977, 191(1): 289-298.
- [8] 梁子阳, 刘春涛, 董益华, 等. 耦合有机朗肯循环的液化空气储能系统性能研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(1): 173-180.
LIANG Ziyang, LIU Chuntao, DONG Yihua, et al. Study on performance of LAES coupled with organic Rankine cycle[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 173-180.
- [9] AMEEL B, T'JOEN C, DE KERPEL K, et al. Thermodynamic analysis of energy storage with a liquid air Rankine cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(1): 130-140.
- [10] GUIZZI G L, MANNO M, TOLOMEI L M, et al. Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system[J]. Energy, 2015, 93: 1639-1647.
- [11] 孙彧炜, 王昊成, 郭浩, 等. 混合工质制冷的液化空气储能系统分析与优化[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(11): 3032-3038.
SUN Yuwei, WANG Haocheng, GUO Hao, et al. Analysis and optimization of liquid air energy storage system based on mixed-refrigerant Joule-Thomson refrigeration[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(11): 3032-3038.
- [12] SHE X, PENG X, NIE B, et al. Enhancement of round trip efficiency of liquid air energy storage through effective utilization of heat of compression[J]. Applied Energy, 2017, 206: 1632-1642.
- [13] PARK J, CHO S, QI M, et al. Liquid air energy storage coupled with liquefied natural gas cold energy: focus on efficiency, energy capacity, and flexibility[J]. Energy, 2021, 216: 119308.
- [14] NABAT M H, ZEYNALIAN M, RAZMI A R, et al. Energy, exergy, and economic analyses of an innovative energy storage system; liquid air energy storage (LAES) combined with high-temperature thermal energy storage (HTES)[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 226: 113486.
- [15] 宋锦涛. 高效液化空气储能系统技术研究与分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2023: 3.
SONG Jintao. Research and analysis of high efficiency air liquid energy storage system technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023: 3.
- [16] DERAKHSHAN S, KHOSRAVIAN M. Exergy optimization of a novel combination of a liquid air energy storage system and a parabolic trough solar collector power plant[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2019, 141(8): 081901.

- [17] NABAT M H, SOLTANI M, RAZMI A R, et al. Investigation of a green energy storage system based on liquid air energy storage (LAES) and high-temperature concentrated solar power (CSP): energy, exergy, economic, and environmental (4E) assessments, along with a case study for San Diego, US[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75: 103305.
- [18] VUPPALADADIYAM A K, ANTUNES E, VUPPALADADIYAM S S V, et al. Progress in the development and use of refrigerants and unintended environmental consequences[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 823: 153670.
- [19] XUE X D, ZHANG T, ZHANG X L, et al. Performance evaluation and exergy analysis of a novel combined cooling, heating and power (CCHP) system based on liquid air energy storage[J]. *Energy*, 2021, 222: 119975.
- [20] DING X, DUAN L, ZHOU Y, et al. Energy, exergy, and economic analyses of a new liquid air energy storage system coupled with solar heat and organic Rankine cycle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 266: 115828.
- [21] JI W, ZHOU Y, SUN Y, et al. Thermodynamic analysis of a novel hybrid wind-solar-compressed air energy storage system[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 142: 176-187.
- [22] IMMONEN J, POWELL K M. Dynamic optimization with flexible heat integration of a solar parabolic trough collector plant with thermal energy storage used for industrial process heat[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 267: 115921.
- [23] ZHANG S, LIU M, ZHAO Y, et al. Dynamic simulation and performance analysis of a parabolic trough concentrated solar power plant using molten salt during the start-up process[J]. *Renewable Energy*, 2021, 179: 1458-1471.
- [24] 苏要港, 吴晓南, 廖柏睿, 等. 耦合 LNG 冷能及 ORC 的新型液化空气储能系统分析[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(6): 1996-2006.
SU Yaogang, WU Xiaonan, LIAO Borui, et al. Analysis of novel liquefied-air energy-storage system coupled with LNG cold energy and ORC[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(6): 1996-2006.
- [25] ISHIDA M, KAWAMURA K. Energy and exergy analysis of a chemical process system with distributed parameters based on the enthalpy-direction factor diagram[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design & Development*, 1982, 21(4): 690-695.

(责任编辑 杨嘉蕾)