

耦合有机朗肯循环的液化空气储能系统性能研究

梁子阳¹, 刘春涛¹, 董益华², 方立军¹

(1. 华北电力大学 动力工程系, 河北 保定 071003; 2. 浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121)

摘要:为解决液化空气储能系统(LAES)压缩热利用不完全的问题,构建了耦合有机朗肯循环的液化空气储能系统(ORC-LAES)。对ORC-LAES系统建立热力学性能计算模型,在设计参数下分析压缩机出口压力、膨胀机入口压力、加压水初温、加压水流量比及膨胀机级数对ORC-LAES系统性能的影响。结果表明,当压缩机出口压力由6 MPa上升到16 MPa、加压水初温从293 K上升到323 K时,系统的循环效率、炯效率和液化率均下降;当膨胀机入口压力由8 MPa上升到18 MPa时,系统循环效率和炯效率均增加;当加压水流量比由0.51上升到0.96时,系统循环效率和炯效率先增加再减少,流量比为0.71时,系统的循环效率和炯效率达到最大;在压缩热利用上耦合有机朗肯循环要优于增加膨胀机级数;ORC-LAES系统与LAES系统相比,循环效率提高4.8%,炯效率提升5.1%。

关键词:液化空气储能;有机朗肯循环;循环效率;液化率;炯效率

中图分类号:TK02 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2023.01.021

[引用本文格式]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 Zi-yang, LIU Chun-tao, DONG Yi-hua, 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.

Study on Performance of LAES Coupled with Organic Rankine Cycle

LIANG Zi-yang¹, LIU Chun-tao¹, DONG Yi-hua², FANG Li-jun¹

(1. Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003;
2. Zhejiang Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 311121)

Abstract: To solve the problem of incomplete utilization of compressed heat in liquefied air energy storage system (LAES), a LAES system coupled with organic Rankine cycle (ORC-LAES) was constructed. Thermodynamic performance calculation model for ORC-LAES system was established, and the influence of compressor outlet pressure, expander inlet pressure, initial temperature of pressurized water, pressurized water flow ratio and expander stage number on ORC-LAES system performance was analyzed under design parameters. The results show that when the outlet pressure of the compressor rises from 6 MPa to 16 MPa and the initial temperature of pressurized water rises from 293 K to 323 K, the cycle efficiency, exergetic efficiency and liquefaction rate of the system decrease; when the inlet pressure of the expander rises from 8 MPa to 18 MPa, the system cycle efficiency and exergetic efficiency increase; when the flow ratio of pressurized water increases from 0.51 to 0.96, the cycle efficiency and exergetic efficiency of the system

收稿日期:2022-04-13; 修订日期:2022-05-12

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018MS105)

Fund-supported Project: Fundamental Research Funds for the Central Universities (2018MS105)

作者简介:梁子阳(1997-),男,华北电力大学硕士研究生。

通讯作者:刘春涛(1980-),男,华北电力大学讲师。

first increase and then decrease, and when the flow ratio is 0.71, the cycle efficiency and exergetic efficiency of the system reach the maximum value; coupling ORC is better than increasing the number of expander stages in the utilization of compression heat; compared with the LAES system, the ORC-LAES system has a 4.8% increase in cycle efficiency and a 5.1% increase in exergetic efficiency.

Key words: liquefied air energy storage, organic Rankine cycle, cycle efficiency, liquefaction rate, exergetic efficiency

引 言

随着能源安全和环境问题日益突出,大力发展以太阳能、风能为主的可再生能源已逐渐成为世界各国的共识^[1-3]。但可再生能源的间歇性和不稳定性,加上传统电力峰谷差值日益增长,使电网的安全与稳定问题日渐凸显^[4-5]。储能技术的应用可有效解决可再生能源并网不稳定的问题,是推动可再生能源发展的关键技术之一^[6-8]。

近些年来,液化空气储能技术受到了广泛关注。液化空气储能技术将空气液化并进行能量和物质存储,相比压缩空气储能和抽水蓄能^[9-10],不仅提高了储能密度,且不受地理环境的限制,是应用于电网较为理想的储能方式^[11-13]。文献[14]建立了 LAES 系统的热力学模型和焓模型,对系统进行了热力学分析,得出可以提高压缩机和膨胀机的绝热效率来减少焓损失从而提高系统的循环效率。文献[15]指出高压空气的液化是 LAES 技术的关键过程,研究了液化率对于系统电-电转化效率的影响。文献[16]运用热力学知识对 LAES 系统建立数学模型,从压缩机出口压力、换热器效能、低温泵压力、换热温差等几个方面分析对 LAES 系统循环效率和液化率的影响。

以上文献得到的液化空气储能技术的效率较低。为了提高效率,一些学者研究利用常规 LAES 系统的压缩热。如采用有机朗肯循环,文献[17]以循环效率、单位净输出功、循环功比等为评价指标,对 8 种有机工质进行研究分析,得出以 R134a 和 R152a 为工质的超临界有机朗肯循环具有较高的循环效率。文献[18]建立了耦合 LNG 冷能及 ORC 的 LAES 系统,进行了热力学分析和经济性评估分析,得出新型 LAES 系统比常规 LAES 系统焓效率提高

约 10%,具有经济可行性。

已发表文献的研究绝大多数认为系统中的储能介质的参数是恒定的。实际上,储能介质由于体积有限,其工作参数会一直变化。同时,利用压缩热除了耦合有机朗肯循环也需要讨论增加膨胀机级数的方法。因此,考虑参数的变化和压缩热的利用,本文构建 1 个耦合有机朗肯循环的液化空气储能系统。以系统循环效率、焓效率和液化率为性能指标,分析压缩机出口压力、膨胀机入口压力、加压水初温、加压水流量比及膨胀机级数对 ORC-LAES 系统性能的影响。

1 系统模型与评价指标

1.1 工作原理

图 1 为所构建的 ORC-LAES 系统。如图所示,当系统储能时,来自环境与冷箱的空气在 3 台压缩机中被压缩为高温高压空气(过程 1-7)。在冷箱中降温后,通过节流阀液化(过程 8-9)。这种气液混合物的液体部分储存于液化空气储罐内,而气体部分则在冷箱中与空气换热后再次进入压缩机进行工作(过程 10-11)。在压缩过程产生的热量被来自储冷器的加压水换热降温(过程 27-31)。回收的压缩热储存于储热器中,在系统释能发电时,加热空气(过程 32-35),储热器中未利用的压缩余热,被有机朗肯循环利用以提高系统的循环效率(过程 36-43)。

当系统对外做功时,液态空气被低温泵泵出(过程 12-13),经两台汽化换热器后恢复气态(过程 13-15)。为提高系统性能,采用两台蓄冷装置作为内部回热器(过程 16-19)。回收的热量存储于蓄冷装置的热端用于在汽化换热器中加热液化空气。复温后的空气进入 3 台膨胀机,加热、膨胀后发电(过程 20-25)。

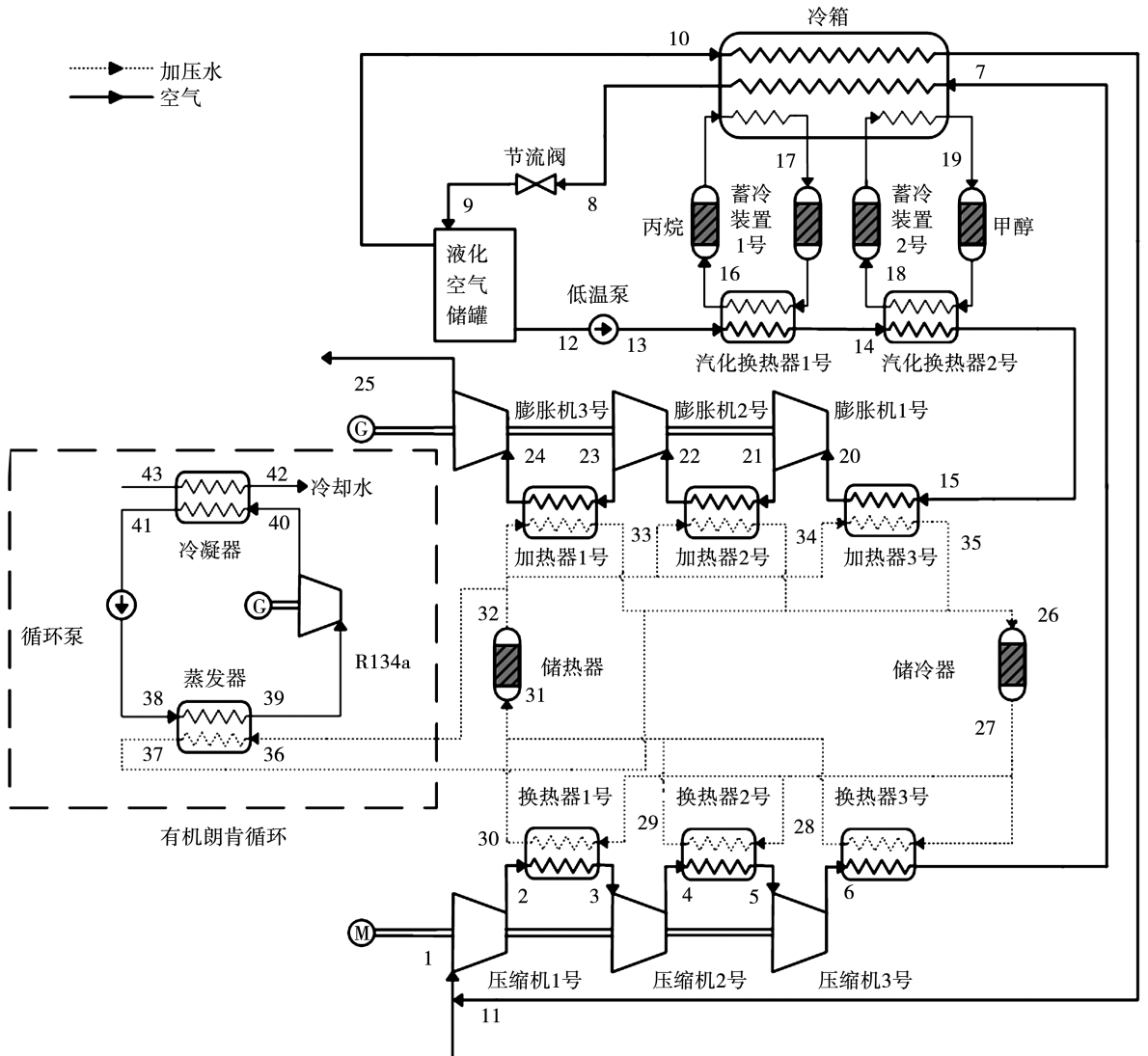


图1 ORC-LAES系统流程

Fig.1 ORC-LAES system flow chart

1.2 计算模型

针对图1的系统,为简化分析与计算,对系统模型作出以下合理的假设:空气为氧气和氮气的二元理想混合气体;压缩与膨胀过程均为实际多变过程;忽略各设备以及管路的散热损失;忽略系统中工质的流动压损。

(1) 压缩机

压缩机输出功率 P_c 为:

$$P_c = m_{air} [(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) + (h_6 - h_5)] \quad (1)$$

式中: P_c —压缩机输出功率, kW; m_{air} —流入压缩机的空气质量流量, kg/s; h_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)—图1中对应节点的空气比焓值, kJ/kg。

(2) 液化率

空气液化的比例由节流阀出口空气的比焓值确定,液化率 Y 可表示为:

$$Y = \frac{(h_{x,1} - h_{10})}{(h_{x,1} - h_{x,0})} \quad (2)$$

式中: h_{10} —节流阀出口空气比焓值, kJ/kg; $h_{x,0}$ —节流阀出口温度下饱和液态空气比焓值, kJ/kg; $h_{x,1}$ —节流阀出口温度下饱和气态空气比焓值, kJ/kg。

(3) 蓄冷装置

储能时,蓄冷装置吸收的热量 Q_1 为:

$$Q_1 = \int m_m c_{p1} (T_{19} - T_{18}) dt + \int m_p c_{p2} (T_{17} - T_{16}) dt \quad (3)$$

式中: Q_1 —蓄冷装置吸收的热量, J; t —蓄冷装置运

行时间, s; m_m —甲醇质量流量, kg/s; m_p —丙烷质量流量, kg/s; c_{p1} —甲醇比定压热容, J/(kg·K); c_{p2} —丙烷比定压热容, J/(kg·K); T_i ($i = 16, 17, 18, 19$)—图 1 中对应节点的流体温度, K。

释能时, 蓄冷装置释放的热量 Q_2 为:

$$Q_2 = \int m_{\text{air}} Y c_{p3} (T_{14} - T_{13}) dt + \int m_{\text{air}} Y c_{p3} (T_{15} - T_{14}) dt \quad (4)$$

式中: Q_2 —蓄冷装置释放的热量, J; T_i ($i = 13, 14, 15, 16$)—图 1 中对应节点的流体温度, K; c_{p3} —空气比定压热容, J/(kg·K)。

储热器和储冷器的模型与蓄冷装置模型类似, 可参考公式(3)和(4)。

(4) 低温泵

低温泵的功率 P_{ep} 为:

$$P_{\text{ep}} = m_{\text{air}} Y (h_{13} - h_{12}) \quad (5)$$

式中: P_{ep} —低温泵的功率, kW; h_{12}, h_{13} —低温泵进、出口空气比焓值, kJ/kg。

(5) 膨胀机

膨胀机输出功率 P_{ex} 为:

$$P_{\text{ex}} = m_{\text{air}} Y [(h_{20} - h_{21}) + (h_{22} - h_{23}) + (h_{24} - h_{25})] \quad (6)$$

式中: P_{ex} —膨胀机输出功率, kW; h_i ($i = 20, 21, 22, 23, 24, 25$)—图 1 中对应节点的空气比焓值, kJ/kg。

(6) 有机朗肯循环

有机朗肯循环的净输出功率 P_{ORC} 为:

$$P_{\text{ORC}} = m_{\text{ORC}} [(h_{39} - h_{40}) - (h_{38} - h_{41})] \quad (7)$$

式中: P_{ORC} —有机朗肯循环的净输出功率, kW; m_{ORC} —R134a 质量流量, kg/s; h_i ($i = 38, 39, 40, 41$)—图 1 中对应节点的循环工质比焓值, kJ/kg。

1.3 系统评价指标

(1) 系统循环效率 η

定义系统循环效率为释能时系统的输出功率 P_{out} 与储能时系统的输入功率 P_{in} 之比, 即:

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{ex}} + P_{\text{ORC}} - P_{\text{ep}}}{P_c} \quad (8)$$

(2) 系统焓效率 η_e

定义系统焓效率为系统产生的收益焓 E_{out} 与系统消耗的代价焓 E_{in} 之比, 即:

$$\eta_e = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \quad (9)$$

$$E_{\text{out}} = m_m (e_{18} - e_{19}) + m_p (e_{16} - e_{17}) + P_{\text{ex}} + P_{\text{ORC}} - P_{\text{ep}} \quad (10)$$

$$E_{\text{in}} = P_c + m_m (e_{18} - e_{19}) + m_p (e_{16} - e_{17}) \quad (11)$$

式中: e_x ($x = 16, 17, 18, 19$)—图 1 中对应节点的工质焓值, kJ/kg。

2 系统性能分析

ORC-LAES 系统的基本设计参数如表 1 所示。对应的空气质量流量为 100 kg/s。

表 1 耦合 ORC 液化空气储能系统的基本设计参数

Tab. 1 Basic design parameters of coupled ORC liquefied air energy storage system

| 系统单元 | 参数 | 数值 |
|---------|----------|-----------|
| 环境 | 环境压力/kPa | 100 |
| | 环境温度/K | 293 |
| | 储气压力/kPa | 100 |
| 压缩机组 | 出口压力/kPa | 9 000 |
| | 绝热效率 | 0.85 |
| 膨胀机组 | 绝热效率 | 0.85 |
| | 换热器 | 换热效率 |
| 换热器 | 冷端窄点温差/K | 5 |
| | 热端窄点温差/K | 10 |
| | 低温泵 | 绝热效率 |
| 低温泵 | 出口压力/kPa | 12 000 |
| | 1号蓄冷装置 | 冷端温度/K |
| 1号蓄冷装置 | 热端温度/K | 185 |
| | 2号蓄冷装置 | 冷端温度/K |
| 2号蓄冷装置 | 热端温度/K | 293 |
| | ORC 循环 | 循环泵压力/kPa |
| 循环泵绝热效率 | | 0.75 |
| 膨胀机绝热效率 | | 0.85 |

根据建立的计算模型和基本设计参数, 采用 Python 对 ORC-LAES 系统进行编程计算, 分析压缩机出口压力、膨胀机入口压力、加压水初温、加压水流量比及膨胀机级数对系统性能的影响。

2.1 工作压力

2.1.1 压缩机出口压力

压缩机出口压力对系统循环效率、焓效率、液化率的影响规律如图 2 所示。

由图2可知,当压缩机出口压力由6 MPa增加到16 MPa时,循环效率从60.2%下降到51.9%,焓效率从70.3%下降到62.1%,液化率从68.5%下降到66.6%。因为,随着压缩机出口压力的增加,虽然提高了膨胀机入口空气的温度,使膨胀机组和有机朗肯循环的输出功增加,但是压缩机出口压力的增加耗费了更多的输入功,此外,液化率的降低也导致进入膨胀机组的空气质量流量减少,降低了膨胀机组的做功能力,使效率下降。

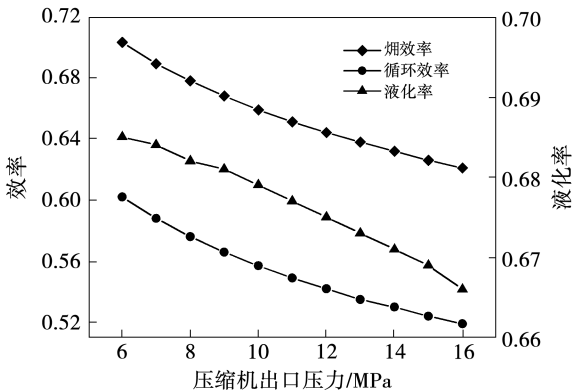


图2 循环效率、焓效率、液化率随压缩机出口压力的变化
Fig. 2 Variation of cycle efficiency, exergetic efficiency and liquefaction rate with compressor outlet pressure

2.1.2 膨胀机入口压力

膨胀机入口压力对系统循环效率和焓效率的影响规律如图3所示。

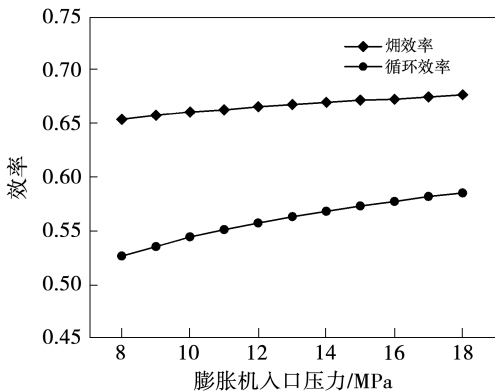


图3 循环效率、焓效率随膨胀机入口压力的变化
Fig. 3 Variation of cycle efficiency and exergetic efficiency with inlet pressure of expander

由图3可知,当膨胀机入口压力由8 MPa增加到18 MPa时,循环效率从52.6%上升到58.5%,焓

效率从65.4%上升到67.7%。因为,随着膨胀机入口压力的增加,提高了膨胀机组和有机朗肯循环的输出总功,而压缩机组耗费的输入功不变,使效率上升。

2.1.3 压缩机和膨胀机压力的综合影响

压缩机出口压力和膨胀机入口压力对系统循环效率的影响规律如图4所示。

由图4可知,当压缩机出口压力为6 MPa,膨胀机入口压力为18 MPa时,循环效率为62.4%,达到最高。当压缩机出口压力为16 MPa,膨胀机入口压力为8 MPa时,循环效率为48%,达到最低。两者相差约14%,说明压缩机出口压力和膨胀机入口压力的选择对循环效率有着很大的影响。

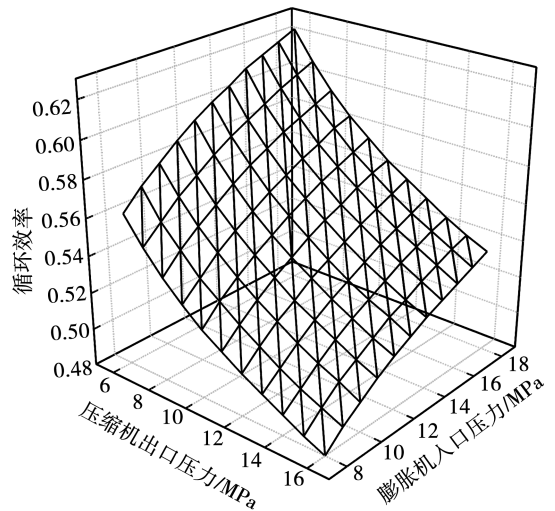


图4 循环效率随压缩机出口压力和膨胀机入口压力的变化

Fig. 4 Variation of cycle efficiency with outlet pressure of compressor and inlet pressure of expander

2.2 加压水初温

加压水初温对循环效率、焓效率及液化率的影响规律如图5所示。

由图5可知,当加压水初温由293 K增加到323 K时,循环效率从54.5%下降到52.1%,焓效率从65.6%下降到63.3%,液化率从68.1%下降到62.7%。因为,随着加压水初温的增加,虽然导致膨胀机入口温度略有上升,但是液化率的降低导致其总做功量没有明显的变化,而且初温的上升使后续压缩机入口温度上升耗费了更多的压缩功,导致效率下降。

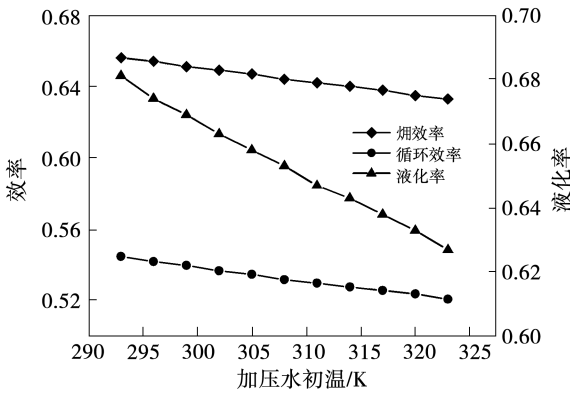


图 5 循环效率、炯效率、液化率随加压水初温的变化
Fig. 5 Variation of cycle efficiency, exergetic efficiency and liquefaction rate with initial temperature of pressurized water

2.3 加压水流量比

加压水和换热器中空气的流量比值也是影响系统运行性能的重要因素之一,加压水流量比的大小直接影响到换热的温升和机朗肯循环的做功量,其加压水流量比对循环效率、炯效率及有机朗肯循环输出功率的影响规律如图 6 所示。

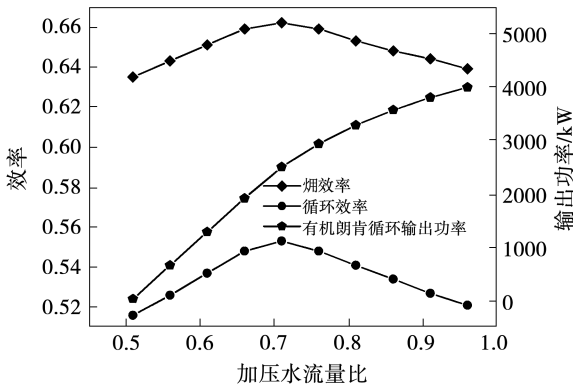


图 6 循环效率、炯效率、有机朗肯循环输出功率随加压水流量比的变化

Fig. 6 Variation of cycle efficiency, exergetic efficiency and organic Rankine cycle output power with pressurized water flow ratio

由图 6 可知,当加压水流量比由 0.51 增加到 0.96 时,循环效率和炯效率均呈现先上升后下降的趋势,循环效率由最低 51.6% 上升到最高 55.3% 再下降到 52.1%,炯效率由最低 63.5% 上升到最高 66.2% 再下降到 63.9%,有机朗肯循环的输出功率由 28.7 kW 上升到 3 989 kW。

这是因为,加压水流量过小时,虽然加压水在换热器中可以获得较大的温升,但是根据热力学第一定律和换热温差的存在,加压水流量小于一定值时,储热器温度不会上升,并且进入有机朗肯循环的流量也变小从而做功减少;加压水流量过高,储热器温度降低,使膨胀机的入口空气温度降低,导致膨胀机做功减少,虽然有机朗肯循环做功增加,但是增加量小于膨胀机做功减少量,故总体效率呈下降趋势。

2.4 膨胀机级数

针对 LAES 系统压缩热量利用不完全,除了采用 ORC-LAES 系统,增加膨胀机级数也能有效提高压缩热的利用。因此,在参数相同的条件下,对 LAES 系统采用增加膨胀机的级数和 ORC-LAES 系统进行性能对比分析。在基本设计参数下,膨胀机级数为 4 级时,能够完全利用剩余的压缩热量,当级数大于 4 级时,压缩热量不足以充分带动所有膨胀机做功,故级数最多可设为 4 级。膨胀机级数对循环效率、炯效率和膨胀机出口温度的影响变化如图 7 所示。

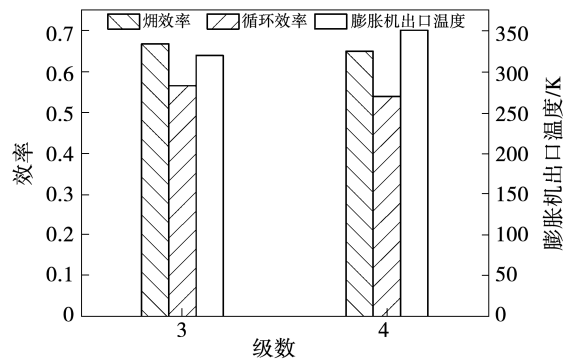


图 7 循环效率、炯效率、膨胀机出口温度随膨胀机级数的变化

Fig. 7 Variation of cycle efficiency, exergetic efficiency and expander outlet temperature with expander stage number

图 7 可知,级数为 3 级时,ORC-LAES 系统的循环效率为 56.6%,炯效率为 66.8%,膨胀机出口温度为 320 K。级数为 4 级时,LAES 系统的循环效率为 54%,炯效率为 65%,膨胀机出口温度为 351 K。可以看出,级数为 3 级的 ORC-LAES 系统循环效率和炯效率均略高于级数为 4 级 LAES 系统的数值,

膨胀机出口温度减小 30 K 左右,接近环境温度,降低了热量的损失,并且建造 4 级膨胀机组前期的建造费用和后期维修费用均会增加。综上所述,膨胀机级数为 3 级时 ORC-LAES 系统的运行性能更好。

2.5 LAES 系统比较

在基本设计参数相同的情况下,与未充分利用压缩热的 LAES 系统进行比较,ORC-LAES 系统充分利用了储热器中未利用的热量,提高系统的循环效率和焓效率,对比结果如图 8 所示。

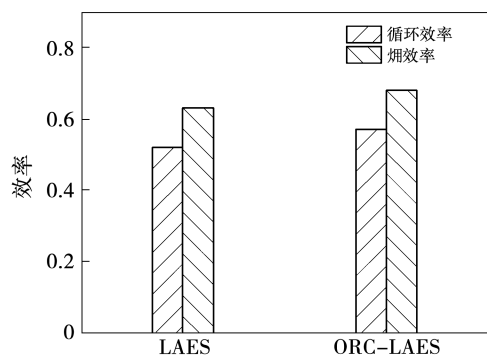


图 8 LAES 和 ORC-LAES 系统性能对比图

Fig. 8 Comparison chart of LAES and ORC-LAES system performance

由图 8 可知,LAES 系统的循环效率为 51.8%,焓效率为 61.7%,ORC-LAES 系统的循环效率为 56.6%,焓效率为 66.8%。ORC-LAES 系统的循环效率和焓效率均高于 LAES 系统 5% 左右,耦合有机朗肯循环有效提高了系统的运行效率。

3 结论

建立了 ORC-LAES 系统,给出标准工况下系统的运行参数,在基本设计参数下对 ORC-LAES 系统进行了热力学分析。讨论了压缩机出口压力、膨胀机入口压力、加压水流量比、加压水初温及膨胀机级数对系统性能的影响,得出的结论如下:

(1) 膨胀机入口压力由 8 MPa 上升到 18 MPa 时,系统的循环效率和焓效率得到提升,压缩机出口压力由 6 MPa 上升到 16 MPa 时,系统的循环效率、焓效率、液化率均下降。

(2) 加压水初温由 293 K 上升到 323 K 时,系统的循环效率、焓效率、液化率均下降。加压水流

量比由 0.51 上升到 0.96 时,系统的循环效率和焓效率呈现出先上升后下降的变化趋势。

(3) 构建的 ORC-LAES 系统在压缩热的利用上要优于增加膨胀机级数的 LAES 系统,并且与未充分利用压缩热的 LAES 系统相比,系统的循环效率和焓效率均提高了 5% 左右。

参考文献:

- [1] HASSAN A,ILYAS S Z,JALIL A,et al. Monetization of the environmental damage caused by fossil fuels[J]. Environmental Science and Pollution Research,2021,28(17):21204-21211.
- [2] AKHTAR I,KIRMANI S,JAMEEL M,et al. Feasibility analysis of solar technology implementation in restructured power sector with reduced carbon footprints[J]. IEEE Access,2021,9:30306-30320.
- [3] GÜNER F,BAER V,ZENK H. Evaluation of offshore wind power plant sustainability:a case study of Sinop/Gerze,Turkey[J]. International Journal of Global Warming,2021,23(4):370-384.
- [4] 王湘艳,张磊,杨立滨,等. 储能系统对间歇式新能源电站并网特性的影响分析[J]. 电网与清洁能源,2016,32(9):107-111.
- [5] WANG Xiang-yan,ZHANG Lei,YANG Li-bin,et al. Analysis on the effect of energy storage on grid-connection characteristics of intermittence renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy,2016,32(9):107-111.
- [6] LLAMAS B,ORTEGA M F,BARTHELEMY G,et al. Development of an efficient and sustainable energy storage system by hybridization of compressed air and biogas technologies (bio-CAES)[J]. Energy Conversion and Management,2020,210:112695.
- [7] HU S,LIU C,DING J,et al. Thermo-economic modeling and evaluation of physical energy storage in power system[J]. Journal of Thermal Science,2021,30(6):1861-1874.
- [8] KIM J,NOH Y,CHANG D. Storage system for distributed-energy generation using liquid air combined with liquefied natural gas[J]. Applied Energy,2018,212:1417-1432.
- [9] FU H,HE Q,SONG J,et al. Thermodynamic of a novel advanced adiabatic compressed air energy storage system with variable pressure ratio coupled organic Rankine cycle[J]. Energy,2021,227:120411.
- [9] 卢开放,侯正猛,孙伟,等. 云南省矿井抽水蓄能电站潜力评估与建设关键技术[J]. 工程科学与技术,2022,54(1):136-144.
- [9] LU Kai-fang,HOU Zheng-meng,SUN Wei,et al. Potential evaluation and construction key technologies of pumped-storage power stations in mines of Yunnan province[J]. Advanced Engineering

- Sciences,2022,54(1):136-144.
- [10] 何子伟,罗马吉,涂正凯. 等温压缩空气储能技术综述[J]. 热能动力工程,2018,33(2):1-6.
HE Zi-wei, LUO Ma-ji, TU Zheng-kai. Survey of the isothermal compressed air energy storage technologies[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2018,33(2):1-6.
- [11] 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.
- [12] 王维萌,葛俊,司派友,等. 10 MW 级深冷液化空气储能发电系统自动启动控制方法研究[J]. 热能动力工程,2020,35(2):9-17.
WANG Wei-meng, GE Jun, SI Pai-you, et al. Study on automatic control methods of start-up for 10 MW power generation system based on liquid air energy storage technology[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(2):9-17.
- [13] 刘佳,夏红德,陈海生,等. 新型液化空气储能技术及其在风电领域的应用[J]. 工程热物理学报,2010,31(12):1993-1996.
LIU Jia, XIA Hong-de, CHEN Hai-sheng, et al. A novel energy storage technology based on liquid air and its application in wind power[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2010,31(12):1993-1996.
- [14] 何青,王立健,刘文毅. 深冷液化空气储能系统的热力学建模及焓分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(10):127-132.
HE Qing, WANG Li-jian, LIU Wen-yi. Thermodynamic model and exergy analysis of cryogenic liquefied air energy storage system [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2018,46(10):127-132.
- [15] 安保林,陈嘉祥,王俊杰,等. 液态空气储能系统液化率影响因素研究[J]. 工程热物理学报,2019,40(11):2478-2482.
AN Bao-lin, CHEN Jia-xiang, WANG Jun-jie, et al. Study on influencing factors on liquid air energy storage system liquefaction rate[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2019,40(11):2478-2482.
- [16] 谢英柏,薛晓东. 液化空气储能与发电一体化系统的性能分析[J]. 太阳能学报,2020,41(4):333-339.
XIE Ying-bai, XUE Xiao-dong. Performance analysis on an integrated system of liquefied air energy storage and electricity production [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41 (4) : 333 - 339.
- [17] 胡芑,胡仁东,陈则韶. 超临界有机朗肯循环工质的选择[J]. 工程热物理学报,2014,35(6):1045-1048.
HU Peng, HU Ren-dong, CHEN Ze-shao. Working fluid selection for supercritical organic Rankine cycle[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2014,35(6):1045-1048.
- [18] 苏要港,吴晓南,廖博睿,等. 耦合 LNG 冷能及 ORC 的新型液化空气储能系统分析[J/OL]. 储能科学与技术:1-11. [2022-04-08]. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0700.
SU Yao-gang, WU Xiao-nan, LIAO Bo-rui, et al. Analysis of novel liquefied air energy storage system coupled with LNG cold energy and ORC[J/OL]. Energy Storage Science and Technology:1-11. [2022-04-08]. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0700.

(金圣迪 编辑)