

冷热电多联产的压缩空气储能系统性能研究

宝永生

通辽霍林河坑口发电有限责任公司 内蒙古通辽 029200

摘要: 本文介绍了一种改进的多联产压缩空气储能系统, 该系统基于传统的压缩空气储能技术, 通过高效利用余热实现了制冷和供热功能, 从而显著提升了系统的整体性能。与传统的压缩空气储能系统相比, 此改进系统在放电阶段不仅能提供 4120.72 kW 的电力输出, 还能额外供应 169.36 kW 的冷量和 989.74 kW 的热能。此改进系统的能量效率为 95.29%, 电往返效率为 74.37%, 烟效率为 75.07%, 表现出优异的热力学性能。此研究可为压缩空气储能系统的优化设计提供一定的参考。

关键词: 压缩空气储能; 多联产; 能量分析; 烟分析

1 引言

随着全球对可再生能源需求的增长和电力需求波动的加剧, 压缩空气储能 (Compressed Air Energy Storage, CAES) 作为一种高效的储能解决方案脱颖而出^[1]。它不仅能够帮助平衡电网负荷, 还能显著提升能源利用效率和系统可靠性。在电力需求较低时, CAES 系统利用多余的电力驱动空气压缩机, 将空气压缩并储存在大型地下洞穴或高压容器中。此过程类似于给一个巨大的气球充气, 但使用的是坚固的地质结构或特制的储罐。当电力需求增加时, 这些被压缩的空气被释放出来, 经过加热后进入膨胀机, 并驱动发电机产生电力^[2]incorporating the energy storage system (ESS)。CAES 技术具有寿命长、维护成本低、储能容量大、灵活性强等优点^[3]。

当前, 国内外有关压缩空气储能技术的研究进展如下: Hai 等人^[1]提出了一种集成生物质气化炉驱动的蒸汽朗肯循环的压缩空气储能系统, 实现了冷、热、电和氢气四联供, 其烟效率为 41.205%, 与基础系统相比, 往返效率提升了 30.23%。Ran 等人^[4]提出了一种太阳能补热的压缩空气储能系统, 并研究了不同运行策略下的系统性能, 结果表明策略 2 的性能最佳, 其能量存储效率和能量密度最高, 分别为 56.52% 和 19.8 MJ/m³。Fu 等人^[5]提出了一种基于有机朗肯循环的新型变压比的先进 CAES 系统, 结果表明变压比系统能够使压缩过程能耗降低 12.45%, 并使膨胀机输出功率增加 37.29%, 从而使系统循环效率从 40.16% 提升至 63.00%。结合有机朗肯循环后, 系统的循环效率高达 70.53%。李佳佳等人^[6]研究发现将压缩空气储能系统与火电机组进行耦合,

单次循环可节煤 5.39 吨, 投资回收期可缩短 11.8 年, 表现出良好的经济收益。Kanthalraj 等人^[7]energy storage will be required at larger scales. Compressed air energy storage at large scales, with effective management of heat, is recognised to have potential to provide affordable grid-scale energy storage. Where suitable geologies are unavailable, compressed air could be stored in pressurised steel tanks above ground, but this would incur significant storage costs. Liquid air energy storage, on the other hand, does not need a pressurised storage vessel, can be located almost anywhere, and has a relatively large volumetric exergy density at ambient pressure. However, it has lower roundtrip efficiency than compressed air energy storage technologies. This paper analyses a hybrid energy store consisting of a compressed air store at ambient temperature, and a liquid air store at ambient pressure. Thermodynamic analyses are then carried out for the conversions from compressed air to liquid air (forward process 研究了集成液化空气储能系统的 CAES 系统的性能, 结果表明, 只要热泵 / 热机系统的效率足够高, 可以获得 53% 的往返效率。赖茜等人^[8]提出了一种耦合钢铁生产余热的 CAES 系统, 有效提升了膨胀机的输出功率, 系统的能量效率和储能效率分别为 57.72% 和 77.60%。

上述研究表明, 通过将 CAES 系统与其他技术耦合, 可以显著提升系统的性能。此外, 对基础 CAES 系统的优化同样能够提高其性能, 但目前在这方面尤其是多联产方面的研究还不够充分。为此, 本文提出了一种基于传统 CAES 系统的冷、热、电三联产的 CAES 系统, 实现了能量的梯级利用。

通过这种系统，不仅可以储存和释放电能，还可以同时提供冷却和热能，从而更有效地利用能源。

2 系统介绍及性能指标

2.1 系统介绍

系统的流程如图 1 所示。此流程可分为两个阶段：①充电阶段：在电力需求较低、电网有剩余电力时，系统启动并利用电网过剩的电力来压缩空气（状态 A1-A2）。此过程中产生的热量被传递给高压液态水（状态 A2-A3、O2-O6），随后储存在高压水罐 #2 中。本研究采用四级压缩 - 冷却装置。被冷却后的空气（A9）随后进入储气室内进行存储。②放电阶段：当电力需求高峰期到来时，储气室内的高压空气被引入加热器内，并被来自高压水罐 #2 的高温水加热（A10-A11、O11-O15），随后进入空气膨胀机中做功发电（A11-A12）。本研究采用四级加热 - 膨胀装置。部分高压水（流股 O20）的热量被用于驱动吸收式制冷机，为用户提供冷能；而剩余的热量则通过换热器转化为生活热水的热能（W1 → W2），实现余热的有效利用。

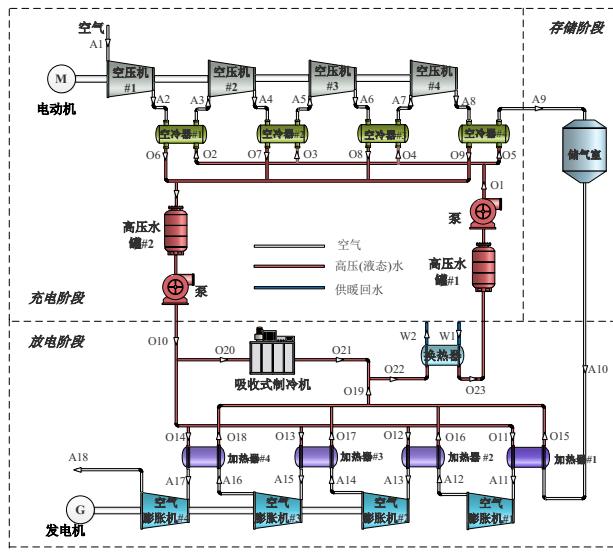


图 1 新型多联产压缩空气储能系统流程图。

系统的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 主要设计参数。

参数	单位	数值
环境温度	℃	20
环境压力	bar	1
空气质量流量	kg/s	10
末级空压机的级后压力	MPa	10
各级空压机的压比	1	3.16228
初级空气膨胀机的级前压力	MPa	10

各级空气膨胀机的膨胀比	1	0.316228
储气室压力	MPa	10
空压机的等熵效率	%	85
空气膨胀机的等熵效率	%	88
高压液态水的压力	bar	16
高压液态水的流量	kg/s	10
空冷器入口的高压液态水的温度	℃	25
空冷器出口的空气温度	℃	30
加热器的入口高压液态水和出口空气的温差	℃	5
导热油分流分率 (O11/O12/O13/O14/O20)	%	25/23/23/22/7
生活热水的入口温度 / 出口温度	℃	20/40
充电时长	h	8
放电时长	h	8

2.2 性能指标

此压缩空气储能方案代表了一种能够提供多种能源输出的综合性系统。为了全面评估这一系统的性能，本文采用了多角度的分析方法，聚焦于能量效率、电往返效率以及㶲效率等关键指标来进行考量。

(1) 系统能量效率 $\eta_{ene}^{[9]}$

$$\eta_{ene} = \frac{(W_{output} + Q_c + Q_h) \cdot t_{dis}}{W_{input} \cdot t_{ch}} \quad (1)$$

式中： W_{output} 为系统发电负荷，kW； Q_c 为系统冷能输出，kW； Q_h 为系统的热能输出，kW； W_{input} 为系统的电能输入，kW； t_{dis} 表示放电时长，h； t_{ch} 表示充电时长，h。

(2) 系统电往返效率 $\eta_{RTE}^{[9]}$

$$\eta_{RTE} = \frac{W_{output} \cdot t_{dis}}{W_{input} \cdot t_{ch}} \quad (2)$$

(3) 系统总㶲效率 $\eta_{exe}^{[9]}$

$$\eta_{exe} = \frac{(W_{output} + E_c + E_h) \cdot t_{dis}}{W_{input} \cdot t_{ch}} \quad (3)$$

式中： E_c 为冷能㶲输出，kW； E_h 为热能㶲输出，kW。

充电过程㶲效率 $\eta_{exe,cd}$

$$\eta_{exe,cd} = \frac{(E_{O10} - E_{O23}) + E_{A9}}{W_{input}} \quad (4)$$

式中： E_{O10} 、 E_{O23} 和 E_{A9} 分别表示流股 O_{10} 、 O_{23} 和 $A9$ 的㶲值，kW。

放电过程㶲效率 $\eta_{exe,fd}$

$$\eta_{exe,fd} = \frac{W_{output} + E_c + E_h}{(E_{O10} - E_{O23}) + E_{A10}} \quad (5)$$

(4) 其他公式^[9]

$$W_{output} = W_{T1} + W_{T2} + W_{T3} + W_{T4} \quad (6)$$

$$W_{input} = W_{C1} + W_{C2} + W_{C3} + W_{C4} \quad (7)$$

式中: W_{T1} , W_{T2} , W_{T3} , W_{T4} 分别为空气膨胀机 #1、2、3 和 4 的电能输出, kW; W_{C1} , W_{C2} , W_{C3} , W_{C4} 分别为空压机 #1、2、3 和 4 的电能输入, kW。

3 结果与讨论

系统各流股的状态参数计算结果如表 2 所示。

表 2 各流股状态参数

流股	温度 /K	压力 /bar	流量 /kg/s	烟流 /kW	工质
A1	293.15	1.00	10.00	0	空气
A2	427.55	3.16	10.00	1208.17	空气
A3	303.15	3.16	10.00	969.64	空气
A4	442.12	10.00	10.00	2223.60	空气
A5	303.15	10.00	10.00	1934.90	空气
A6	442.55	31.62	10.00	3188.61	空气
A7	303.15	31.62	10.00	2892.42	空气
A8	443.31	100.00	10.00	4149.07	空气
A9	303.15	100.00	10.00	3833.45	空气
A10	303.15	100.00	10.00	3833.45	空气
A11	416.70	100.00	10.00	4057.53	空气
A12	311.13	31.62	10.00	2896.25	空气
A13	416.70	31.62	10.00	3103.50	空气
A14	312.79	10.00	10.00	1939.62	空气
A15	416.70	10.00	10.00	2141.32	空气
A16	313.55	3.16	10.00	974.80	空气
A17	416.70	3.16	10.00	1174.53	空气
A18	313.82	1.00	10.00	6.98	空气
O1	298.15	16.00	10	19.48	水
O2	298.15	16.00	2.5	4.87	水
O3	298.15	16.00	2.5	4.87	水
O4	298.15	16.00	2.5	4.87	水
O5	298.15	16.00	2.5	4.87	水
O6	407.94	16.00	2.5	210.49	水
O7	421.35	16.00	2.5	256.99	水
O8	424.49	16.00	2.5	268.49	水
O9	432.84	16.00	2.5	300.20	水
O10	421.70	16.00	10	1033.00	水
O11	421.70	16.00	2.5	258.25	水
O12	421.70	16.00	2.3	237.59	水
O13	421.70	16.00	2.3	237.59	水
O14	421.70	16.00	2.2	227.26	水
O15	311.79	16.00	2.5	10.82	水
O16	317.90	16.00	2.3	14.33	水
O17	322.02	16.00	2.3	17.93	水
O18	319.00	16.00	2.2	14.58	水
O19	317.54	16.00	9.3	56.78	水
O20	421.70	16.00	0.7	72.31	水
O21	353.15	16.00	0.7	18.41	水
O22	320.04	16.00	10	70.15	水
O23	298.15	16.00	10	19.48	水
W1	293.15	1.00	10.94	0	水
W2	313.15	1.00	10.94	32.30	水

能量分析的计算结果如表 3 所示。由表可知, 在充电阶段, 四级空压机的输入功率分别为 1350.40 kW、1396.14 kW、1395.64 kW 和 1398.50 kW。在放电阶段, 四级空气膨胀机的输出功率分别为 1026.50 kW、1029.34 kW、1031.94 kW 和 1032.94 kW。同时放电阶段还同时产生了 989.74 kW 的热能和 169.36 kW 的冷能。由于基础 CAES 系统和多联产 CAES 系统在充放电过程的电能消耗和电能输出是一致的, 因此两者的电往返效率一致, 均为 74.37%。但由于多联产系统产生了额外的冷能和热能, 这使得相比于基础的单一电能输出的 CAES 系统, 此多联产系统的能量效率由 74.37% 提升至 95.29%。

表 3 能量分析计算结果

参数 (单位)	多联产 CAES 系统	基础 CAES 系统
空压机 #1 耗功 (kW)	1350.40	1350.40
空压机 #2 耗功 (kW)	1396.14	1396.14
空压机 #3 耗功 (kW)	1395.64	1395.64
空压机 #4 耗功 (kW)	1398.50	1398.50
空气膨胀机 #1 产功 (kW)	1026.50	1026.50
空气膨胀机 #2 产功 (kW)	1029.34	1029.34
空气膨胀机 #3 产功 (kW)	1031.94	1031.94
空气膨胀机 #4 产功 (kW)	1032.94	1032.94
供热量 (kW)	989.74	-
供冷量 (kW)	169.36	-
能量效率 (%)	95.29	74.37
电 – 往返效率 (%)	74.37	74.37

表 4 展示了烟分析结果。输入系统和输出系统的电能烟分别为 5540.68 kW 和 4120.72 kW。相比于基础 CAES 系统, 此多联产系统还生产了 6.30 kW 的冷烟和 32.30 kW 的热烟。由于两系统在充电过程中的能量转换是一致的, 因此二者的充电烟效率均为 87.48%。由于多联产系统在放电过程中有额外的冷烟和热烟输出, 因此多联产系统的放电过程烟效率 (85.81%) 要高于基础系统 (85.02%), 系统的总烟效率也有所提高。

表 4 烟分析计算结果

参数 (单位)	多联产 CAES 系统	基础 CAES 系统
输入电烟 (kW)	5540.68	5540.68
输出电烟 (kW)	4120.72	4120.72
输出冷烟 (kW)	6.30	-
输出热烟 (kW)	32.30	-
充电过程烟效率 (kW)	87.48	87.48
放电过程烟效率 (%)	85.81	85.02
总烟效率 (%)	75.07	74.37

4 结论

本文介绍了一种改进的多联产压缩空气储能系统, 该系统基于传统的压缩空气储能技术, 通过有效利用余热实现

了制冷和供热功能，从而优化了能量的梯级利用。这一创新设计显著提升了系统的综合性能，不仅在放电阶段能够提供 4120.72 kW 的电力输出，还能同时供应 169.36 kW 的冷量和 989.74 kW 的热能。系统的能量效率由 74.37% 提升至 95.29%，烟效率由 74.37% 提升至 75.07%。

参考文献：

- [1] HAI T, ZOGHI M, JAVAHERDEH K. 4E analysis and optimization of a biomass-fired waste-to-energy plant integrated with a compressed air energy storage system for the multi-generation purpose[J]. Fuel, 2023, 348: 128457.
- [2] BAZDAR E, SAMETI M, NASIRI F, 等. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112701.
- [3] 李双江, 肖枫, 陈伟, 等. 先进绝热压缩空气储能系统储能阶段建模仿真和动态分析 [J]. 山东科学 : 1-12.
- [4] RAN P, WANG Y, WANG Y, 等. Thermodynamic, economic and environmental investigations of a novel solar heat enhancing compressed air energy storage hybrid system and its energy release strategies[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105423.
- [5] FU H, HE Q, SONG J, 等. Thermodynamic of a novel advanced adiabatic compressed air energy storage system with variable pressure ratio coupled organic rankine cycle[J]. Energy, 2021, 227: 120411.
- [6] 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.
- [7] KANTHARAJ B, GARVEY S, PIMM A. Thermodynamic analysis of a hybrid energy storage system based on compressed air and liquid air[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2015, 11: 159-164.
- [8] 赖茜, 梁伟, 王世彪, 等. 钢铁企业余热强化的压缩空气储能系统性能研究 [J]. 冶金能源, 2021, 40(2): 23-28.
- [9] DING X, DUAN L, ZHOU Y, 等. Thermodynamic analysis and economic assessment of a novel multi-generation liquid air energy storage system coupled with thermochemical energy storage and gas turbine combined cycle[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 60: 106614.

作者简介: 姓名: 宝永生; 出生年月日: 1998年4月27起; 性别: 男; 民族: 蒙古族; 籍贯: 内蒙古奈曼旗; 学历: 硕士; 职称: 助理工程师; 从事的研究方向: 电力系统