

与电解水制氢和固体氧化物燃料电池耦合集成的 新型压缩空气储能系统性能分析

张利, 段福凯, 李彪, 贾开华, 樊宽鹏, 姜艳, 于云霞*
(国网山东省电力公司临沂供电公司, 山东临沂 276000)

摘要:为提高压缩空气储能系统的效率,提出了一种新型耦合系统:将压缩空气储能系统与电解水制氢系统和氢能固体燃料电池系统进行系统集成。在充电过程中,电解水制氢系统和压缩空气储能系统分别将电能存储。在放电过程中,采用氢能固体燃料电池和压缩空气储能系统进行发电。采用压缩空气储能系统排出的空气余热以及剩余的压缩热加热氢能固体燃料电池系统的给水,从而增加系统电能输出。通过以上系统集成,实现了能量梯级利用,有效提高了压缩空气储能系统的效率;同时与氢能系统集成,实现了整个过程碳零排放。对耦合系统进行了热力学分析和经济性分析,结果表明,压缩空气储能系统的往返效率、储能密度和焓效率可达70.05%、12.01 MJ/m³和66.39%;同时,耦合系统的整体效率可提高1.19%。压缩空气储能系统的动态投资回收期为3.36 a,净现值可以达到1458.01万元,具有较好的经济收益。

关键词:压缩空气储能;电解水制氢;氢能固体燃料电池;系统集成;系统性能分析

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)12-0213-08

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.12.039

Analysis on performance of a novel compressed air energy storage system coupled with electrolytic water hydrogen production and solid oxide fuel cell

ZHANG Li, DUAN Fu-kai, LI Biao, JIA Kai-hua, FAN Kuan-peng, JIANG Yan, YU Yun-xia*
(Linyi Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Linyi 276000, China)

Abstract:To improve the efficiency of the compressed air energy storage (CAES) system, a new coupling system is proposed, in which CAES system is integrated with the electrolytic water hydrogen production system and the hydrogen-driven solid fuel cell system. During the charging process, the electrolytic water hydrogen production system and CAES system separately store electrical energy. During the discharging process, the hydrogen-driven solid fuel cell system and CAES system are used to generate electricity. In addition, both the spare heat in the air discharged from CAES system and the remaining compression heat are used to heat the feedwater for the hydrogen-driven solid fuel cell system, thus increasing the electrical energy output from the system. Through such system integration, the ladder utilization of energy is realized and the efficiency of CAES system is effectively improved. Meanwhile, the integration of the hydrogen energy system achieves zero carbon emission in the whole process. It is indicated through analyzing the thermodynamic property and economy of the coupled system that the round-trip efficiency, energy storage density and exergy efficiency of the CAES system can reach 70.05%, 12.01 MJ·m⁻³ and 66.39%, respectively. Meanwhile, the overall efficiency of the coupled system can rise by 1.19 percentage points. In addition, the dynamic payback period of the CAES system is 3.36 years, and the net present value can reach RMB 14.581 million, showing a good economic return.

Key words: compressed air energy storage; hydrogen production through electrolytic water; hydrogen-driven solid fuel cell; system integration; system performance analysis

随着世界人口的快速增长以及科学技术不断发展,全球电力需求不断增加,其中约67%的发电由化石燃料提供,从而导致一系列环境问题和能源短缺^[1]。因此,构建以可再生能源为主体的绿色、低碳、清洁的能源体系已成为未来世界主要国家的选择。据相关能源报告统计,预计到2040年,全球能源需求将增长25%以上,其中可再生能源预计将占到全球能源消费的40%以上^[2]。然而,新能源发电

自身具有的不稳定性、间歇性和波动性对电网系统的稳定运行带来巨大的挑战,因此限制了可再生能源的消纳和发展。电能存储技术是一种可促进可再生能源消纳、提高电网运行稳定性的重要技术,其中压缩空气储能技术(CAES)因运行可靠性高、建设成本低以及对周围环境危害小,被认为是一种有很好的发展前景的电能存储技术^[3]。

国内外学者对压缩空气储能技术开展了大量的

收稿日期:2023-02-26;修回日期:2023-10-22

基金项目:国家自然科学基金青年项目(52106008);国网山东省电力公司科技项目(520607220002)

作者简介:张利(1975-),男,本科,高级工程师,主要从事清洁能源利用工作,ysgdzhl@163.com;于云霞(1981-),女,本科,高级工程师,主要从事清洁能源利用工作,通讯联系人,95526351@qq.com。

研究,其中许多研究集中于压缩空气储能系统与多种能源系统的耦合集成。Han 等^[4]建立了一个基于压缩空气储能的冷、热、电联产系统,并通过数值模拟对该系统的热力学和经济性进行了分析。Alirahmi 等^[5]研究了基于压缩空气储能系统和太阳能定日镜及多效热蒸汽压缩脱盐装置集成的混合系统,并开发了神经网络算法对系统的性能进行分析。Wang 等^[6]提出了一个与有机朗肯循环系统相结合的新型压缩空气储能系统的设计,该系统可以满足不同用户的需求,同时具有能量密度高的优点。Zhang 等^[7]提出了一个集成生物质汽化、地源热泵和压缩空气储能的综合系统,用于实现制冷、供暖和供电。韩中等^[8]建立了压缩空气储能与太阳能相结合的集成系统,并对比研究了 2 种运行方案下集成系统的性能。李丞宸等^[9]提出了一种包括压缩空气储能与蓄能的新型储能系统,从而实现了压力能的梯级利用,实现了 41.6% 的能量转化率。李斌等^[10]为提高燃煤机组的灵活性,将压缩空气储能系统与燃煤发电机组进行耦合,并采用软件建模的方法对耦合系统的性能进行分析。席光等^[11]提出将压缩空气储能与热化学储能耦合的思路:在充电过程中采用压缩热驱动甲醇裂解产生合成气,在放电过程中合成气与高压空气混合燃烧驱动燃气轮机发电。

氢能由于具有能量密度高、低碳环保、可大量存储等优点被认为是一种拥有广阔应用前景的清洁能源^[12]。近年来,我国相继出台多项政策,鼓励各地企业加快发展稳定、便捷、成本较低的氢能供应体系。因此,探索将压缩空气储能与氢能进行耦合集成是一个很好的创新思路。

基于以上背景,本文中提出一种基于氢能的新型压缩空气储能系统,该系统主要包括电解水制氢系统、氢能固体燃料电池系统以及压缩空气储能系统。在充电过程中,电解水制氢系统将电能转化为氢气,并储存于氢气罐中;同时,压缩空气储能将电能用于压缩空气,压缩热存储于储热罐中。在放电过程中,储存在氢气罐中的氢气被送入燃料电池系统中产生电能,而来自于储气罐中的压缩空气被储热罐中的压缩热加热后在膨胀机中膨胀发电。同时采用燃料电池系统中蒸汽循环的低温给水回收压缩空气储能系统中的排气废气和储热罐中的余热。通过上述系统集成,不仅可以有效提高系统效率,而且还可以在整个充放电过程中实现零碳排放。此外,基于热力学分析和经济学分析,对所提出的耦合系

统的性能进行了评估。

1 系统介绍

1.1 电解水制氢系统

目前,常规的电解水制氢技术主要有碱性水电解制氢技术、质子交换膜电解水制氢技术以及固体氧化物电解水制氢技术。而碱性电解水制氢技术由于成熟的制氢工艺、廉价的制氢成本成为目前应用最广泛、市场规模最大的制氢技术。因此,本文中选取碱性电解水制氢系统作为研究对象,系统流程如图 1 所示,设计参数如表 1 所示^[13]。水经过泵加压至 1 MPa 后通入至碱性电解槽中,通过电能电解产生氢气和氧气。随后氢气和氧气经过压缩和冷却,分别被储存于高压储气罐中。对于所选的电解水制氢系统,每产生 1 m³ 氢气,需要消耗 5.4 kWh 的电能。

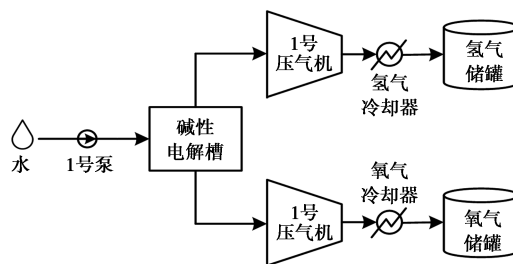


图 1 电解水制氢系统示意图

表 1 电解水制氢系统设计参数

项目	数值	项目	数值
电解水方法	碱性电解槽	能耗/(kWh·m ⁻³)	5.4
反应压力/MPa	1.0	氢气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	1.9
反应温度/℃	70	氧气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	0.95

1.2 氢能固体燃料电池系统

选取某典型氢能固体燃料电池系统作为研究对象,该系统流程如图 2 所示,设计参数如表 2 所

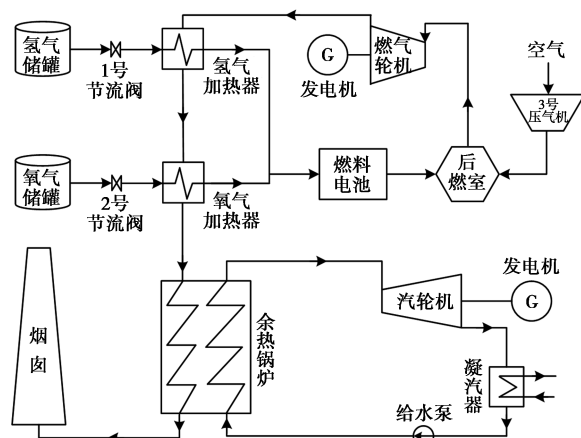


图 2 氢能固体燃料电池系统示意图

表 2 氢能固体燃料电池系统设计参数

项目	数据
燃料电池	
电流密度/(A·cm ⁻²)	0.3
燃料电池运行温度/°C	605.0
燃料电池运行压力/MPa	0.40
燃料利用率/%	85.00
加热器压降/%	4.00
燃烧室效率/%	95.00
压气机效率/%	85.00
燃气轮机	
燃气轮机效率/%	85.00
烟气流量/(kg·s ⁻¹)	107.01
发电效率/%	98.00
余热锅炉压降/MPa	0.04
余热锅炉排烟温度/°C	110
蒸汽循环	
汽轮机进汽温度/°C	505.0
汽轮机进汽压力/MPa	4.00
汽轮机进汽流量/(kg·s ⁻¹)	21.82
汽轮机排汽压力/kPa	8.00
汽轮机效率/%	92.00

示^[14]。从图 2 中可以看到,储存在高压储气罐中的氢气和氧气首先分别通过 1 号节流阀和 2 号节流阀,从而将压力控制在一个稳定的状态。随后分别被氢气加热器和氧气加热器加热,并进入固体氧化物燃料电池中发生电化学反应。一部分氢气和氧气在固体氧化物燃料电池中发生电化学反应以产生电力,剩余未发生反应的氢气和氧气被送入至后燃室。未反应的气体在后燃室中继续与补充的空气一同燃烧,产生高温烟气,然后高温烟气驱动燃气轮机做功,后经发电机转化为电能。燃气轮机排出的高温排气首先被用于加热氢气加热器和氧气加热器中的气体,以提高进入燃料电池中氢气和氧气的温度。随后,氧气加热器出口的高温废气被进一步送入到余热锅炉中加热给水产生蒸汽,最终高温烟气在温度降低至 110.0°C 后通过烟囱排入至大气中。余热锅炉产生的高温蒸汽(温度为 505°C,压力为 4.0 MPa)驱动汽轮机做功发电,汽轮机排汽则进入凝汽器中进行冷却。凝汽器出口的冷凝水被给水泵加压,然后送入到余热锅炉中继续进行换热,从而完成了蒸汽循环。

1.3 压缩空气储能系统

选取典型先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)系统进行研究,系统流程如图 3 所示^[15]。从表 3 中

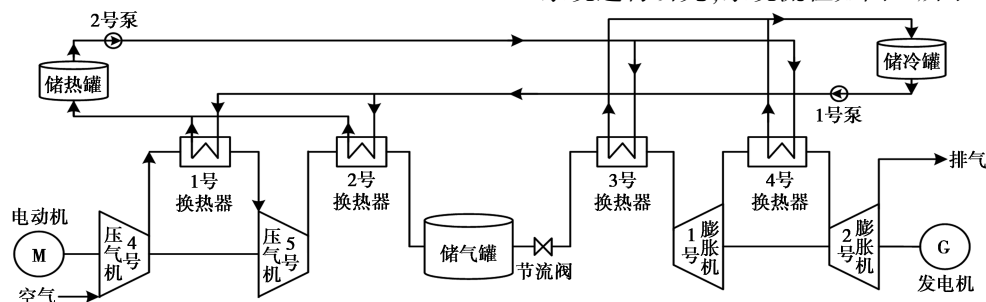


图 3 压缩空气储能系统流程

表 3 压缩空气储能系统设计参数

项目	数据
大气压力/kPa	101.33
大气温度/°C	20.0
压缩级数	2
压气机中空气流量/(kg·s ⁻¹)	0.65
压气机效率/%	85.00
空气存储压力/MPa	3.22
空气存储温度/°C	50.0
储气罐体积/m ³	1034.89
膨胀级数	2

膨胀机中空气流量/(kg·s ⁻¹)	2.6
膨胀段入口压力/MPa	1.54
膨胀机效率/%	88.00
储能时长/h	8
释能时长/h	2

可以看出,压缩空气储能系统主要包含 1 个电机、2 个压气机、1 个储气罐、1 个节流阀、2 个膨胀机、1 个蓄热罐、1 个蓄冷罐、4 个热交换器和 1 个发电机。在充电过程中,电能驱动压气机压缩空气,并将其存储于高压储气罐中,同时将压缩过程中产生的压缩热储存在蓄热罐中。在放电过程中,储气罐中的高

压缩空气被释放,采用节流阀控制其压力,从而保证进入 1 号膨胀机的压缩空气的压力恒定。随后,压力恒定的高压空气在吸收了储存在蓄热罐中的压缩热后在膨胀机中做功,并驱动发电机发电,最终做功后的空气排入至大气中。表 3 为压缩空气储能系统设计参数。

1.4 耦合系统

提出了一个将压缩空气储能系统与电解水制氢系统和氢能固体燃料电池系统相结合的设计,如图 4 所示。在充电过程中,电解水制氢系统消耗电能,将水电解成氢气和氧气,分别储存在储罐中。在压缩空气储能系统中,压气机消耗电力将空气压缩到储气罐中,同时压缩热被储存在储热罐中。因此,在充电过程中电能被转化为氢气的化学能、空气的内能和换热介质的热能。在放电过程中,一方面,储存在储罐中的氢气和氧气在燃料电池中进行电化学反应

应以产生电能,而剩余的未反应的燃料继续在后燃烧室中燃烧并驱动燃气-蒸汽联合循环以产生电能。另一方面,存储于储气罐中的高压空气在 3 号换热器中被储热罐的压缩热加热,后进入 1 号膨胀机中做功;随后在 4 号换热器中再次被储热罐的压缩热加热,并进入 2 号膨胀机中做功。最后,2 号膨胀机出口的空气在 5 号换热器中采用来自于蒸汽循环的低温给水进行冷却,从而回收空气的余热。此外,储热罐中的换热工质经过 3 号换热器和 4 号换热器后仍然温度较高,因此在 6 号换热器中继续加热低温给水,随后储存于储冷罐中,用于在充电过程中冷却压缩空气。基于能量梯级利用的原理,通过与电解水制氢系统和以氢能固体燃料电池系统集成,压缩空气储能系统不仅可以通过产生更多的电力来提高效率,而且在整个充放电过程中可以实现碳零排放。

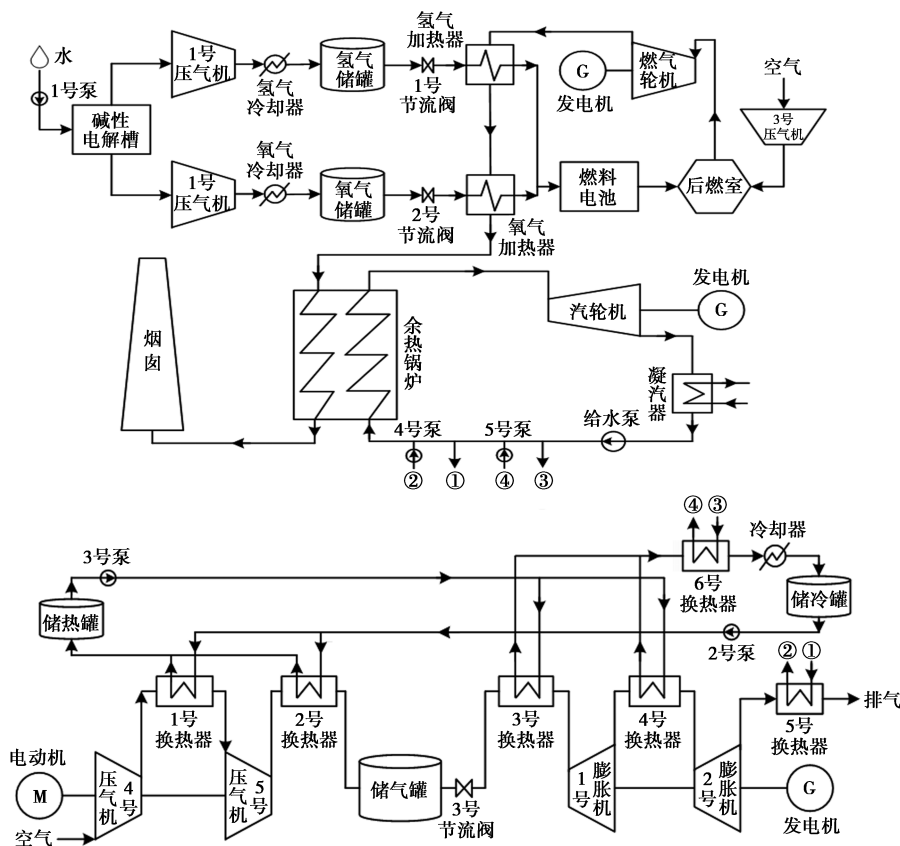


图 4 耦合系统示意图

2 系统分析方法

2.1 系统建模

为了对系统进行准确分析,采用 Aspen Plus 软件对电解水制氢系统进行建模,采用 EBSILON

Professional 对氢能固体燃料电池系统和压缩空气储能系统进行模拟。Aspen Plus 是一款适用于化工和能源部门生产领域,用于对系统进行设计、模拟和优化的仿真软件^[16]。EBSILON Professional 则拥有丰富的建模组件,可用于模拟多种能源领域的热力系

统,并能根据系统的相关设计数据建立基于能量和质量平衡的模拟模型^[17]。分别对 3 个子系统进行模拟,并将模拟结果与相关文献[13-15]的数据进行对比,如表 4 所示。从表中可以看出,模拟结果与文献数据差别较小,说明建立的仿真模型准确可靠。最后,在 3 个子系统模拟的基础上,对耦合系统进行整体模拟。

表 4 基于参考系统的模型验证

项目	设计值	模拟值	偏差
电解水制氢系统			
能量消耗/(kWh·m ⁻³)	5.4	5.4	0
氢气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	1.9	1.9	0
氧气流量/(km ³ ·h ⁻¹)	0.95	0.95	0
氢能固体燃料电池系统			
净发电效率/%	53.607	53.031	-1.09%
压缩空气储能系统			
电能存储功率/kW	1000.00	1000.63	0.063%
电能释放功率/kW	2387.60	2390.70	0.130%
储能时间/h	8	8	0
释能时间/h	2	2	0
循环效率	59.69%	59.73%	0.067%

2.2 能量分析

在能量分析过程中,保持电解水制氢系统耗电功率不变,分别计算原系统(没有压缩空气储能系统的方案)的耗电量和发电量、耦合系统在充电过程中的耗电量以及在放电过程中的发电量。基于热力学第一定律,采用压缩空气储能系统的往返效率(R)和能量密度(D),以及耦合系统的整体效率($\eta_{\text{耦合}}$)对系统的能量性能进行评估。

压缩空气储能系统的往返效率(R)是指在 1 个循环过程中,CAES 系统总电能输出与 CAES 系统总电能输入的比值^[18]。其中,CAES 系统的总电力输出是指在放电过程中耦合系统与原系统相比增加的电能输出,而 CAES 系统的总电能输入是指在充电时间内 CAES 系统的电能消耗。具体计算公式为:

$$R = (W_{\text{输出-1}}/W_{\text{输入-1}}) \times 100\% =$$

$$\{[(P_{\text{输出-2}} - P_{\text{输出-1}}) \times t_2] / (P_{\text{输入-1}} \times t_1)\} \times 100\% \quad (1)$$

式中, $W_{\text{输出-1}}$ 为 1 个循环过程中 CAES 系统总电能输出,MWh; $W_{\text{输入-1}}$ 为 1 个循环过程中 CAES 系统总电能输入,MWh; $P_{\text{输出-1}}$ 为原系统电能输出功率,MW; $P_{\text{输出-2}}$ 为集成系统电能输出功率,MW; $P_{\text{输入-1}}$ 为压缩空气储能系统电能输入功率,MW; t_1 和 t_2 分别为充电和放电时间,h。

压缩空气储能系统的能量密度(D)是指在 1 个循环过程中,CAES 系统总电能输出与储气罐之间的比值^[16]。具体计算公式为:

$$D = W_{\text{输出-1}}/V_{\text{储气罐}} = [(P_{\text{输出-2}} - P_{\text{输出-1}}) \times t_2] / V_{\text{储气罐}} \quad (2)$$

式中, $V_{\text{储气罐}}$ 为储气罐的体积,m³。

耦合系统的整体效率是指整个耦合系统的总电能输出与总电能量输入的比值^[19]。具体计算公式为:

$$\eta_{\text{耦合}} = (W_{\text{输出-2}}/W_{\text{输入-2}}) \times 100\% = [(P_{\text{输出-2}} \times t_2) / (P_{\text{输入-2}} \times t_1)] \times 100\% \quad (3)$$

式中, $W_{\text{输出-2}}$ 为耦合系统总电能输出,MWh; $W_{\text{输入-2}}$ 为耦合系统总电能输入,MWh; $P_{\text{输出-2}}$ 为耦合系统电能输出功率,MW; $P_{\text{输入-2}}$ 为耦合系统电能输入功率,MW。

2.3 焓分析

焓分析是一种衡量热力系统不可逆损失的常用方法。通过计算热力系统中各个部件的焓损失,可以确定导致不可逆损失发生的主要部件,从而为系统性能提升提供指导。针对 CAES 系统,系统焓效率可定义为 CAES 系统的焓输出与焓输入之间的比值^[20],计算公式为:

$$\eta_{\text{CAES}} = E_{\text{输出}}/E_{\text{输入}} \quad (4)$$

在热力系统中,对于某一稳定工质流,在不考虑其发生化学反应的情况下,工质的焓可通过以下公式计算得出^[21]:

$$E = m \times [(h - h_0) + T_0 \times (s - s_0)] \quad (5)$$

式中, m 为工质的质量流量,kg/s; h 和 h_0 分别为工质在目前状态和基准状态时的焓值,kJ/kg; s 和 s_0 分别为工质在目前状态和基准状态时的熵值,kJ/(kg·K); T_0 为基准状态对应的温度,K。

2.4 经济性分析

在对耦合系统进行经济性分析中,假设在原系统的基础上新增压缩空气储能系统,并通过系统中各个设备的成本估算得出系统总设备投资^[22]。以杭州市现行的分时电价政策为基础,在用电低谷时期,耦合系统进行存储电能;在用电高峰时期,耦合系统进行释放电能。通过低谷时段买电,高峰时段售电来实现项目盈利。因此,本文中采用动态投资回收期(Z)和净现值(N)对耦合系统的经济性进行评估。

动态投资回收期是指从项目投资开始到项目累计折现现金流等于零时用的时间。该时间越短,则表明项目的投资回收期越短,计算方法为^[7]:

$$\sum_{y=1}^a (C_{\lambda} - C_{\text{出}})/(1+r)^y = 0 \quad (6)$$

式中, C_{λ} 和 $C_{\text{出}}$ 分别为项目现金流入和现金流出, 元; r 为贴现率; y 为压缩空气储能系统的寿命期, a。

净现值(N)是指在整個压缩空气储能系统的寿命期内, 项目现金收入现值与现金支出现值的差额。净现值越大, 则项目投资方案盈利能力越强, 计算方法为^[23]:

$$N = \sum_{y=1}^n (C_{\lambda} - C_{\text{出}})/(1+r)^y \quad (7)$$

式中, n 为新型压缩空气储能系统的寿命, a。

3 分析与讨论

3.1 基本假设

为了准确对系统进行模拟, 同时便于开展系统各项性能的分析, 提出了一些必要的假设^[24-25]:

- ①环境温度为 20.0℃, 环境压力为 101.33 kPa;
- ②耦合系统和参考系统中电解水的耗电量保持不变;
- ③氢能固体燃料电池堆中的电池是相同的;
- ④燃料电池排烟温度保持不变;
- ⑤空气由 21% 的氧气和 79% 的氮气组成, 化学和热机械的能量可以忽略不计;
- ⑥系统中的所有气体都遵循理想气体定律;
- ⑦膨胀机和压气机的等熵效率是不变的;
- ⑧系统运行在稳态条件下;
- ⑨周围环境对系统性能的影响被忽略了。

3.2 能量分析

根据热力学第一定律, 对原系统(仅包含电解水制氢系统和氢能固体燃料电池系统)和耦合系统进行了能量分析, 结果如表 5 所示。从表中可以看到, 在保持电解水制氢系统的电能输入不变的情况下, 由于系统集成, 耦合系统总的功率输出将发生变化。对于原系统, 在 8 h 的充电过程中, 总的电能输入功率为 82.52 MW; 而在 2 h 的放电过程中, 总的输出功率为 125.82 MW, 因此, 系统整体效率为 38.12%。对于耦合系统, 在 8 h 的充电过程中, 电解水制氢系统和压缩空气储能系统的功率输入为 82.52 MW 和 3.18 MW, 因此在 1 个循环周期内消耗电能为 685.56 MWh。在 2 h 的放电过程中, 耦合系统总的电能功率输出为 134.73 MW, 因此在 1 个循环周期内会产生电能 269.46 MWh。在整个循环过程中, 与原系统相比, 耦合系统总的电能输入率和电能输出分别增加了 25.43 MWh 和 17.82 MWh。因此, 压缩空气储能系统的往返效率(R)和储能密度(D)分别为 70.05% 和 12.10 MJ/m³; 耦合系统的整体效率可以达到 39.31%, 与原系统相比提高

了 1.19%。

表 5 耦合系统的能量分析

项目	燃煤系统	耦合系统
充电过程		
电解水制氢系统电能消耗/MW	82.52	82.52
CAES 系统电能消耗/MW	0	3.18
充电时间/h	8.00	8.00
充电过程系统电能总消耗/MWh	660.13	685.56
放电过程		
燃料电池输出功率/MW	87.29	87.29
燃气透平输出功率/W	36.05	36.05
蒸汽轮机输出功率/MW	24.23	25.23
厂用电功率/MW	21.74	21.75
整个系统输出功率/MW	125.82	134.73
放电时间/h	2.00	2.00
放电过程系统输出总能量/MWh	251.64	269.46
系统性能指标		
往返效率/%		70.05
储能密度/(MJ·m ⁻³)		12.10
系统总效率/%	38.12	39.31

3.3 焓分析

对耦合系统中的压缩空气储能部分进行了焓分析, 结果如表 6 所示, 其中包括系统焓输入、焓输出和焓损失。在 1 个循环过程中, 压缩空气储能系统的焓输入主要包括 2 部分: 电能输入(25.43 MWh)和空气输入(0.05 MWh), 而系统焓输出主要包括膨胀机产生的电能(15.82 MWh)和传递到蒸汽循环中的热能(1.10 MWh)。因此, 对于压缩空气储能系统, 总的焓输入为 25.48 MWh, 总的焓输出为 16.92 MWh, 因此系统焓效率可以达到 66.39%。

表 6 新型系统的焓分析

项目	数据/MWh	比率/%
输入焓(电能)	2.50	67.10
输入焓(空气)	1.22	32.90
系统总输入焓	3.72	100.00
输出焓(空气)	1.99	53.39
输出焓(压缩热)	0.36	9.78
系统总输出焓	2.35	63.17
焓效率/%		63.17

由此可见, 在压缩空气储能系统中存在有 8.56 MWh 的焓损失, 因此有必要对系统中发生焓损失的

组件进行分析,如表7所示。从表中可以看出,节流阀中发生的焓损失约占16.17%,是压缩空气储能系统各个部件中焓损失最大的部位,这是由于节流阀中的节流效应引起的。因此,节流阀应该是提高压缩空气储能系统效率的关键目标。此外,系统中各个膨胀机和压气机的焓损失也比较大。值得关注的是,系统中各个换热器中的焓损失较小,这是因为耦合系统设计中换热器参数的优化有效减少了换热器的传热温差。

表7 压缩空气储能系统主要部件焓损失 MW

项目	数值	项目	数值
电动机	0.76	4号换热器	0.47
4号压气机	0.97	2号膨胀机	0.92
1号换热器	0.25	5号换热器	0.06
5号压气机	0.99	6号换热器	0.37
2号换热器	0.22	冷却器	0.17
节流阀	1.38	发电机	0.17
3号换热器	0.73	排气	0.17
1号膨胀机	0.93		

3.4 经济性分析

为了对耦合系统中压缩空气储能的经济性进行评估,设置了一些基本参数,如表8^[26-28]所示。按照前文给出的经济分析方法,得出经济分析结果,如表9所示。系统的主要投资包含压缩空气储能系统中各个设备的投资,以及设备运行维护费,通过计算得出,压缩空气储能系统设备总投资为832.48万元,年度运行维护费为49.95万元。由于压缩空气储能系统在用电低谷时要消耗电能来压缩空气,因此每年耗电成本为221.26万元;而在用电高峰期间压缩空气储能系统产生电能,从而每年获得售电收入为587.93万元。进一步计算表明,耦合系统的动态投资回收期可以达到3.36a,并且在整个设备寿命期内净现值可到达1458.01万元。由此可见,耦合系统的设计具有较好的经济收益,因此该设计对推进压缩空气储能的发展是有利的。

表8 经济性分析基本参数

项目	数值
用电低谷电价/(元·kWh ⁻¹)	0.29
用电高峰电价/(元·kWh ⁻¹)	1.10
建设周期/a	1
运行周期/a	25
贴现率/%	12
年运行时间/d	300
运行维护费成本	6%设备总投资

表9 经济性分析结果

项目	数值	项目	数值
设备总投资/万元	832.48	年度售电收入/万元	587.93
年度运行维护费/万元	49.95	动态回收周期/a	3.36
年度耗电成本/万元	221.26	净现值/万元	1458.01
年度总成本/万元	271.21		

4 结论

本研究创新地提出了一个集成压缩空气储能系统、电解水制氢系统和氢能固体燃料电池系统的耦合系统。通过各系统的耦合集成,实现了能量的阶梯化,有效提高了压缩空气储能系统的效率;同时也实现了整个系统的碳零排放。对提出的耦合系统进行了热力学分析和经济性分析,得出结论如下。

(1)通过系统集成,压缩空气储能系统的往返效率可达70.05%,储能密度可达12.01 MJ/m³。此外,与原系统相比,耦合系统的整体效率可提高1.19%,达到39.31%。

(2)焓分析结果表明,压缩空气储能系统的焓效率为66.39%。系统中焓损失较大的设备主要有节流阀、膨胀机和压气机,而这些设备的优化是提高压缩空气储能系统效率的关键。

(3)压缩空气储能系统的动态投资回收期为3.36a,净现值可以达到1458.01万元。由此可见,这种耦合设计在经济性方面具有较好的收益。

参考文献

- [1] 国家统计局.中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[R].2021.
- [2] 金晨,任大伟,肖晋宇,等.支撑碳中和目标的电力系统源-网-储灵活性资源优化规划[J].中国电力,2021,54(8):164-174.
- [3] 陈海生,李泓,马文涛,等.2021年中国储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2022,11(3):1052-1076.
- [4] Han Z, Sun Y, Li P. Thermo-economic analysis and optimization of a combined cooling, heating and power system based on advanced adiabatic compressed air energy storage [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 212: 112811.
- [5] Alirahmi S M, Bashiri Mousavi S, Razmi A R, et al. A comprehensive techno-economic analysis and multi-criteria optimization of a compressed air energy storage (CAES) hybridized with solar and desalination units [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 236: 114053.
- [6] Wang P, Zhao P, Wang J, et al. Performance evaluation of a combined heat and compressed air energy storage system integrated with ORC for scaling up storage capacity purpose [J]. Energy, 2020, 190: 116405.

- [7] Zhang X, Zeng R, Deng Q, *et al.* Energy, exergy and economic analysis of biomass and geothermal energy based CCHP system integrated with compressed air energy storage (CAES) [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 199: 111953.
- [8] 韩中合, 孙焯, 李鹏, 等. 不同输出方式下 2 种 AA-CAES 系统性能的对比研究 [J]. *太阳能学报*, 2022, 43(5): 60-66.
- [9] 李丞宸, 贺新, 陶飞跃, 等. 一种压缩空气与抽水蓄能耦合的新型储能系统及热力学分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(4): 40-49.
- [10] 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.
- [11] 席光, 姚尔人, 仲理科, 等. 一种压缩空气与热化学耦合储能的冷热电联产系统 [J]. *西安交通大学学报*, 2021, 55(12): 1-8.
- [12] 凌文, 李全生, 张凯. 我国氢能产业发展战略研究 [J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 80-88.
- [13] Battaglia P, Buffo G, Ferrero D, *et al.* Methanol synthesis through CO₂ capture and hydrogenation: Thermal integration, energy performance and techno-economic assessment [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2021, 44: 101407.
- [14] Gogoi T K, Sarmah P, Deb Nath D. Energy and exergy based performance analyses of a solid oxide fuel cell integrated combined cycle power plant [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86: 507-519.
- [15] Jiang R, Cai Z, Peng K, *et al.* Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of polygeneration system based on advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113724.
- [16] 张晨佳, 蔡军, 张玉魁, 等. 基于热力学平衡的高温固体氧化物电解水制氢模拟 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(9): 210-217.
- [17] 薛小军, 王义函, 陈衡, 等. 利用回热系统凝结水供热的新型生物质热电联产系统的性能分析 [J]. *热力发电*, 2021, 50(3): 91-97.
- [18] Xue X, Li J, Liu J, *et al.* Performance evaluation of a conceptual compressed air energy storage system coupled with a biomass integrated gasification combined cycle [J]. *Energy*, 2022, 247: 123442.
- [19] 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.
- [20] 彭维珂, 李童宇, 武浩然, 等. 基于医疗垃圾等离子气化的零碳高效热电联产系统性能分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9): 3135-3151.
- [21] Chen H, Wu Y, Zeng Y, *et al.* Performance analysis of a solar-aided waste-to-energy system based on steam reheating [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 185: 116445.
- [22] 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.
- [23] Zhou Q, He Q, Lu C, *et al.* Techno-economic analysis of advanced adiabatic compressed air energy storage system based on life cycle cost [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 265: 121768.
- [24] 朱瑞, 徐玉杰, 李斌, 等. 太阳能蓄热式压缩空气储能系统特性分析 [J]. *太阳能学报*, 2019, 40(6): 1536-1544.
- [25] Chitgar N, Emadi M A. Development and exergoeconomic evaluation of a SOFC-GT driven multi-generation system to supply residential demands; Electricity, fresh water and hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(34): 17932-17954.
- [26] 杭州市发展和改革委员会. 省发展改革委关于进一步完善我省分时电价政策有关事项的通知 [EB/OL]. [2021-05-04]. http://drc.hangzhou.gov.cn/art/2021/9/28/art_1629199_58901482.html.
- [27] 胡珊, 刘畅, 徐玉杰, 等. 基于峰谷分时电价的压缩空气储能系统热经济性分析 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(5): 1607-1613.
- [28] Razmi A R, Heydari Afshar H, Pourahmadiyan A, *et al.* Investigation of a combined heat and power (CHP) system based on biomass and compressed air energy storage (CAES) [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 46: 101253. ■

巴斯夫与 SK On 达成协议共同评估全球锂离子电池市场合作机会

巴斯夫与 SK On 已达成协议, 将携手评估在全球锂离子电池市场的合作机会, 尤其是北美及亚太市场。合作双方将汇集强大的业务和产品开发能力, 共同开发具有行业领先优势的锂离子电池材料。

首先, 巴斯夫和 SK On 将重点对正极活性材料生产的合作可能性进行评估, 有关合作的更多细节将在稍后阶段公布。随后双方将评估电池材料价值链上的其他合作机会, 包括电池回收。巴斯夫和 SK On 将利用各自的专长, 共同推进创新解决方案开发, 支持双方企业实现强劲的增长目标。

负责电池材料与回收业务的巴斯夫催化剂业务部总裁彼得·舒马赫博士 (Peter Schuhmacher) 表示: “通过与 SK On 的合作, 我们将进一步巩固市场地位, 服务全球各地的电池制造商和电动汽车生产商。我们致力于满足电动汽车行业对更可持续解决方案的需求, 并已准备好与所有地区的客户和合作伙伴携手实现这一目标。”

SK On 首席执行官兼总裁池東燮 (Jee Dong-seob) 表示: “此次与巴斯夫的合作是 SK On 努力增强电池材料供应链的一环。我们期待扩大合作伙伴关系, 以引领电动汽车行业。” (李天宇)