

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2021.07.002

压缩空气储能技术及其耦合发电机组研究进展

Research progress of compressed air energy storage and its coupling power generation

魏书洲^{1,2}, 李兵发³, 孙晨阳³, 周兴³, 王亚龙³, 邹一帆³, 邓靖敏³, 王金星^{4*}
WEI Shuzhou^{1,2}, LI Bingfa³, SUN Chenyang³, ZHOU Xing³, WANG Yalong³, ZOU Yifan³,
DENG Jingmin³, WANG Jinxing^{4*}

(1.三河发电有限责任公司,河北 廊坊 065201;2.河北省燃煤电站污染防治技术创新中心,河北 廊坊 065201;
3.河北师范大学 中燃工学院,石家庄 050024;4.华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

(1.Sanhe Power Generation Company Limited, CHN Energy, Langfang 065201, China; 2.Hebei Innovation Center for Coal-fired power station Pollution Control, Langfang 065201, China; 3.College of Zhongran, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 4.School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要:压缩空气储能技术是利用压缩机-燃气轮机装置,实现空气势能与热能之间转化的储能技术。由于压缩空气储能技术具有跨时空调节“源-荷”匹配性的优势,在高比例间歇性可再生能源发电并网的背景下更为重要。从储能系统有无热源、绝热、储热3个方面进行了评述;压缩空气储能工作形式主要包括无热源的非绝热空气压缩储能、带热源的非绝热压缩空气储能、带储热的空气绝热压缩储能系统。从多能源耦合的角度,分别介绍了压缩空气储能与燃气轮机、内燃机和可再生能源系统的耦合形式。最后从多种压缩空气储能形式与耦合火电机组应用现状方面进行了分析,并对比了传统压缩空气储能、绝热压缩空气储能、等温压缩空气储能、蓄热式压缩空气储能等技术的储能规模、优缺点等,为压缩空气储能的应用提供了借鉴。

关键词:压缩空气储能;可再生能源;发电机组;耦合形式;燃气轮机;CO₂减排;空气压缩机;“双碳”目标

中图分类号:X 783:TK 02 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2021)07-0009-08

Abstract: Compressed air energy storage (CAES) is an energy storage technology that uses compressors and gas turbines to realize the conversion between air potential energy and heat energy. Since CAES can regulate and distribute the "source" and "load" across time and space, the technology has become increasingly important as high-proportion intermittent renewable energy is connected to the power grid. Energy storage systems are classified from three aspects: configuration of heat sources, adiabaticity and configuration of heat storage devices. Among them, CAES has three main application modes, diabatic CAES without heat source, diabatic CAES with heat source and adiabatic CAES with heat storage system. Analyzed from multi-energy coupling modes, CAES systems' coupling with gas turbines, internal combustion engines and renewable energy systems are introduced, respectively. Furthermore, various integration forms of CAES technology and its coupling with coal-fired power plants are analyzed, which are compared with traditional CAES, adiabatic CAES, isothermal CAES and heat storage CAES technology from the energy storage scale, advantages and disadvantages. The study is expected to provide reference for the application of CAES technology.

Keywords: compressed air energy storage; renewable energy; generator; coupling mode; gas turbine; CO₂ emission reduction; air compressor; carbon peak and carbon neutrality

0 引言

绿色、低碳、清洁、高效的能源体系是世界能源发展理念和主要方向^[1-2]。高比例间歇性可再生能源

发电并网更是大势所趋。然而,新能源的随机性与波动性限制了其大规模的推广应用。储能由于其“削峰填谷”的特点,可以平衡新能源的随机性与波动性,具有很大的发展前景。2017年10月,国家发展改革委等五部委联合印发《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》指出:“储能是智能电网、可再生能源高占比能源系统、互联网智慧能源的重

收稿日期:2021-05-11;修回日期:2021-06-22
基金项目:河北省自然科学基金项目(E2020502007);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2021090)

要组成部分和关键支撑技术”^[3-4]。

压缩空气储能是一种在电网低谷负荷时利用电能压缩空气,在电网高峰负荷时将压缩空气从高压储气罐中释放出来,推动燃气轮机透平进行发电的储能方式^[5-6]。压缩空气的充放电循环只与空气压缩机和燃气轮机的机械性能有关,具有使用寿命长、运行成本低、可靠性高等优点^[7]。除此之外,由于压缩空气储能所用的原料是空气,不存在燃烧和爆炸的危险^[8]。目前,董振斌等^[9]将压缩空气储能与燃机技术进行了耦合应用,研究表明,增设压缩空气储能可以缓解电网调峰压力,提高可再生能源的入网比例。

本文首先介绍了压缩空气储能的工作形式以及其耦合发电机组的应用现状^[10]。压缩空气储能技术“削峰填谷”的特点使其与新能源耦合后极大降低电网波动、提高新能源利用率,对压缩空气储能与可再生能源、内燃机等能源的耦合形式进行分析。最后,对压缩空气储能在电厂中的应用现状进行探讨,以期为其进一步研究提供借鉴。

1 压缩空气储能的工作形式

压缩空气储能是基于燃气轮机发电技术发展起来的一种储能技术^[11]。大功率燃气轮机通常需要连续高负荷运行以提高能源利用效率,约60%的功率需用于驱动压气机,因此压缩空气储能可以作为燃气轮机发电的“加力装置”。根据压缩过程是否绝热可分为非绝热压缩空气储能和绝热压缩空气储能。根据燃气轮机工作原理可知,提高高压空气温度有利于提高燃气轮机发电量和效率,因此根据储能过程是否存在热源或储能装置又可分为无热源、有热源和带储能装置3种,见表1^[12]。

表1 压缩空气储能的工作形式

Tab. 1 Operation forms of CAES

类型	无热源	有热源	储热
非绝热	√	√	—
绝热	—	—	√

非绝热压缩技术通常采用多级压缩级间冷却的压缩方式获得高压空气。在排气过程中利用热源对高压空气进行加热,以提高储能效率。绝热压缩空气储能技术是指空气压缩接近绝热过程。空气绝热压缩会产生大量的压缩热,如在理想状态下将空气压缩至10 MPa能够产生650℃的高温^[13]。因此,绝热压缩空气压缩储能通常无需外热源对空气进行加热就可实现压缩热的利用。

1.1 无热源的非绝热空气压缩储能

无热源非绝热压缩空气储能系统不采用外来热源和绝热装置。在进行储能时,电动机带动压气机将空气压缩并储存于储气装置中。发电时,被储存在储气装置中的高压空气释放驱动透平带动发电机发电^[14],如图1所示。由于没有外来热源释放能量时预热,储气装置温度一般处于650℃以下,储能效率一般不超过60%。

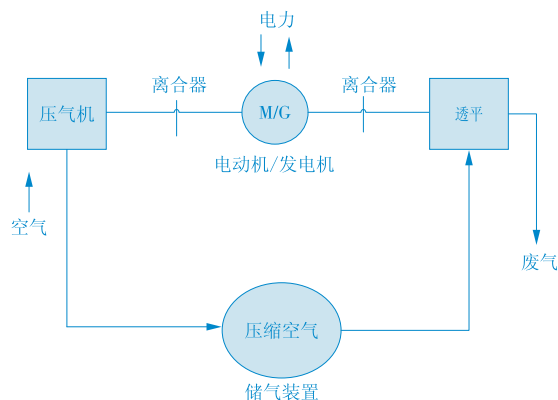


图1 非绝热无热源的压缩空气储能

Fig. 1 Diabatic CAES without heat source

1.2 有热源的非绝热压缩空气储能

德国 Huntorf 电站压缩空气储能原理如图2所示。德国 Huntorf 电站是世界上最大容量的压缩空气储能电站。机组的压缩机功率为60 MW,释能输出功率为290 MW。机组可连续充气8 h,连续发电2 h。在储能过程中空气经过两级压缩和级间冷却获得低温高压(约10 MPa)空气,并储存在地下容积达 $3.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的废弃矿洞中。在释能过程中,低温高压空气通过燃烧室的2次补燃,获得高温气体。该电站在1979年至1991年间共启动并网5 000多次,平均启动可靠性97.6%,实际运行效率约为42%。

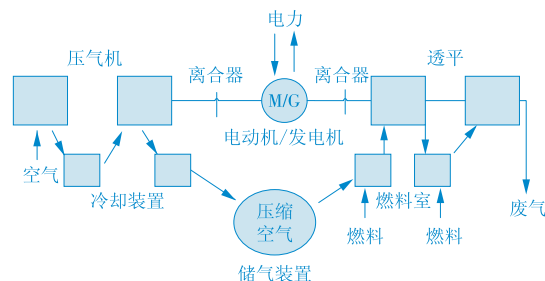


图2 燃料燃烧非绝热压缩空气储能（不带回热）

Fig. 2 Diabatic CAES for fuel combustion

(without heat recovery system)

美国 McIntosh 压缩空气储能电站是世界上第2个(1991年)投入商业运行的压缩空气储能电站。其储能压缩机功率为50 MW,发电功率为110

MW。储气洞穴在地下450 m,总容积为 $5.6 \times 10^5 \text{ m}^3$,压缩空气储气压力为7.5 MPa,可以实现连续41 h压缩空气和26 h发电,机组从启动到满负荷约9 min。该电站在德国Huntorf压缩空气储能的基础上增加一个余热转换器,余热转换器收集空气压缩热和燃气轮机排气废热来预热进入燃气轮机的压缩空气,从而可以提高系统的热效率^[15]。由于增加了回热结构,实际运行效率约为54%,McIntosh电站的单位发电燃料消耗较Huntorf电站节省了约25%^[16],原理如图3所示。

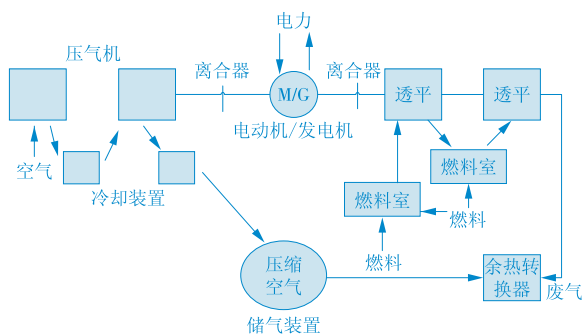


图3 燃烧燃料的非绝热压缩空气储能(带回热)

Fig. 3 Diabatic CAES for fuel combustion
(with heat recovery system)

1.3 有储热的空气绝热压缩储能系统

与非绝热压缩空气储能相比较,绝热压缩空气储能综合储能效率最高可达70%^[17],这是因为绝热压缩系统充分利用可压缩过程中的压缩热。带储热的绝热压缩空气储能工作原理如图4所示。

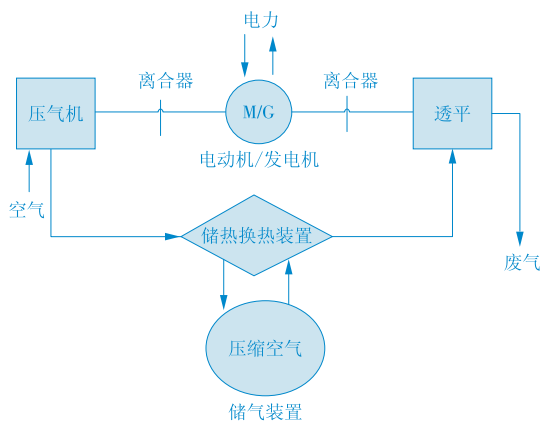


图4 带储热装置的绝热压缩空气储能装置

Fig. 4 Adiabatic CAES with heatstorage devices

由于空气压缩过程采用绝热压缩,压气机出口温度达650℃。换热、储热装置将压缩热存储起来,在其后释能过程中释放出来,用以加热压缩空气。带热源的绝热压缩空气储能系统虽然省去了燃烧室,但增加了储热装置,因此系统增加了对压气机耐热材料要求,同时带来管道和阀门数量增加。此外,高压空气的温度较高,导致储气装置体积过大。

2 压缩空气储能与多种能源的耦合

压缩空气储能本身是一种能量储存技术,其储存能量的来源有多种形式,同时释放的能量也有多种用途。本文将分别从压缩空气储能与燃气轮机、内燃机以及可再生能源系统等多能源耦合形式进行论述。

2.1 压缩空气储能-燃气轮机耦合

张新敬等^[18]提出了一种压缩空气储能-燃气轮机混合动力系统,其工作原理如图5所示。利用低谷的盈余电力驱动压缩机获得高压空气并储存在地下洞穴或地上高压容器中。在用电高峰时利用储存的压缩空气与燃气轮机联合做功进行发电补充电网用电,实现“削峰填谷”。如图5a所示,当存储的空气压力较低(1~2 MPa)时,压缩空气直接喷入燃烧室或者同燃气轮机压缩空气混合后喷入到燃烧室。如图5b所示,如果存储的空气压力较高(5~10 MPa),为了实现其能量的梯级利用,在压缩空气进入燃气轮机燃烧室之前,先与燃气轮机废气换热,进一步提高其温度。然后,进入高压涡轮膨胀做功驱动发电机进行发电。最后再同燃气轮机压缩空气混合一起进入燃烧室。Nakhamkin M等^[19]对GE 7FA燃气轮机为基础的压缩空气储能-燃气轮机混合动力系统进行了性能分析,在压缩空气流量为52.62,26.31 kg/s(混合13.61 kg/s的水蒸气)时,燃气轮机的发电热消耗率分别下降约59.0%和36.5%。

对于图5b的系统,燃气轮机的设计功率为100 MW,压缩空气储能系统依靠吸收燃气轮机的废热可以恢复70%以上的能量,如果耗电峰谷电价的比大于2.0,该系统将具有可观的经济效益。

2.2 压缩空气储能-内燃机耦合

压缩空气储能还可应用在内燃机汽车及以内燃机为动力来源的分布式能源系统中^[20]。由于单独的压缩空气储能汽车的能量密度较低、续航里程有限,有关学者提出了压缩空气储能-内燃机耦合的汽车混合动力系统^[21]。在额定工况下,气动发动机可以从内燃机排气和冷却水中吸收26%和20%的能量,从而降低内燃机的燃料消耗率。Ibrahim H等^[22]对压缩空气储能-柴油机耦合进行了经济型评价分析发现,混合系统的油耗相比于单独柴油机供电可节约27%。

如图6所示,该系统中高压储气罐中的压缩空气经过降压阀调整压力进入尾气换热器与汽车尾气进行换热(内燃机余热),形成具有温度和压力合适的气体,通过气动发动机产生轴功。气动发动机

与原有汽车发动机联合工作为汽车提供混合动力,该系统的工作原理与图6类似,但主要用于分布式供能和小型电网、区域电网。

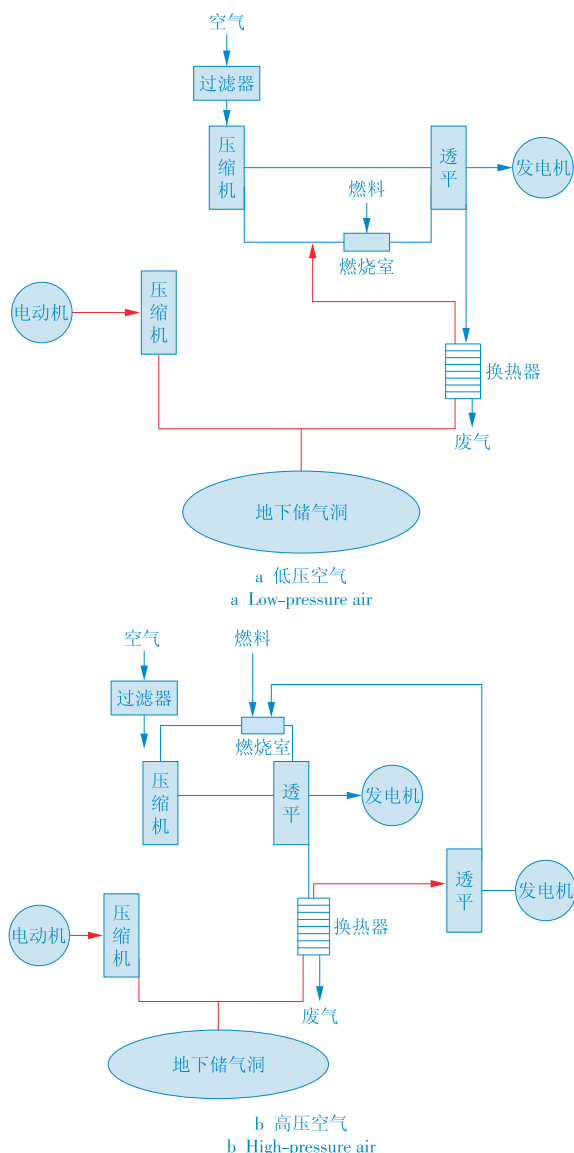


图5 低压空气与高压空气储能装置原理

Fig. 5 Energy storage principles with low-pressure air and high-pressure air

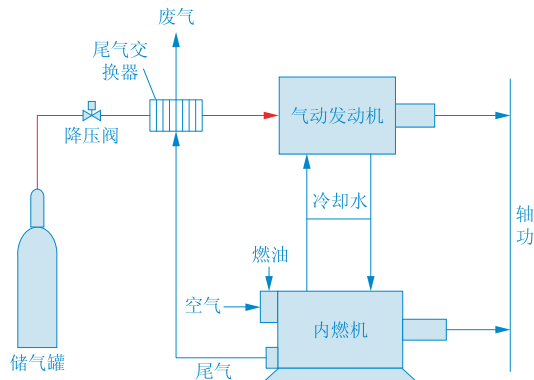


图6 压缩空气-内燃机混合动力系统

Fig. 6 Compressed air-internal combustion engine hybrid power system

2.3 压缩空气储能-可再生能源系统耦合

压缩空气储能系统可以将间歇式风能、太阳能等可再生能源“拼接”并稳定地输出,为可再生能源大规模利用提供有效的解决方案^[15]。图7展示了压缩空气储能-风能耦合系统的示意。Lerch等^[23]对压缩空气-可再生能源系统进行了性能测试,结果发现采用压缩空气储能-风能耦合的系统可将风电在电网中供电的比例提高至80%,远高于传统40%的上限。压缩空气储能系统与风力发电系统有以下2种耦合方案^[24]。

(1)电力销售侧耦合。该方案可以根据电能的消耗需求来调节储/释能,存储低谷低价电在高峰高价时段出售,从而产生优越的经济效益。

(2)风电厂侧耦合。该方案可以根据风电厂的发电功率调节储/释能,并根据风电厂的容量因子调整输电线路的载荷,而不必根据最大发电功率配置输电线路从而大幅提高输电线路的有效载荷。

但方案(2)根据发电功率调节储/释能,而不是根据电力市场的需求调节,因此比方案(1)的经济性差。

耦合太阳能的压缩空气储能系统如图8所示,利用太阳集热装置将透平进口温度提升至500℃以上,从而大大提高储能系统运行效率,同时也提供了一种利用可再生能源太阳能的思路。

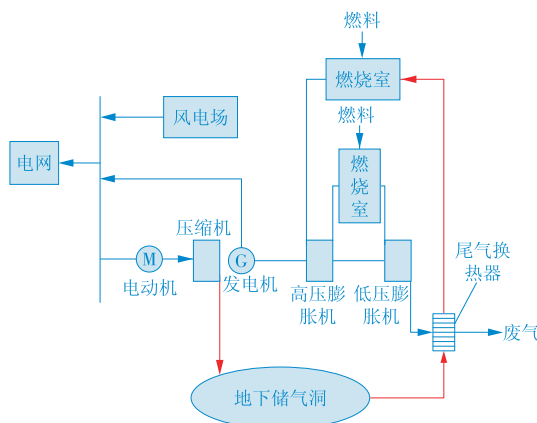


图7 压缩空气储能-风能耦合系统示意

Fig. 7 Schematic structure of CAES-wind energy system

3 压缩空气储能在电厂中的应用现状

3.1 绝热压缩空气储能

绝热压缩空气储能在电厂中发挥了重要作用,其工作原理如图9所示。例如,德国的莱恩公司建设设计容量为90 WM×4 h,大大地提高了换热效率。清华大学利用非补燃压缩空气储能技术,成功实现了带载发电,成为世界上首套实现储能发电循环的

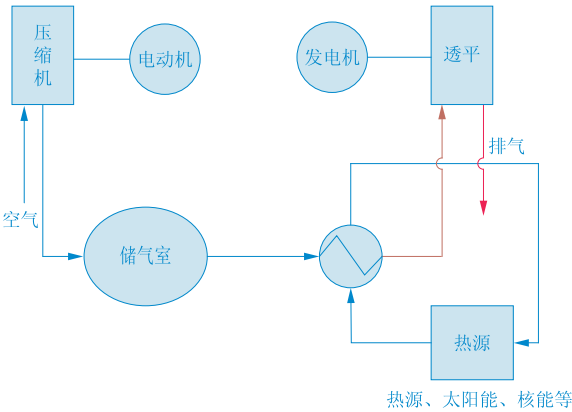


图 8 外部热源耦合压缩空气储能
Fig. 8 CAES coupled with external
heat sources

绝热压缩空气储能发电系统^[25]。

因为绝热压缩空气储能不需要化石燃料的燃烧,因此不仅有利于减少CO₂的排放,还有利于可再生能源与电网的整合^[26-31]。然而绝热压缩空气储能需要热回收装置,增加了系统的建设成本^[32]。

3.2 蓄热式压缩空气储能

蓄热式压缩空气储能能与电厂的耦合原理如图 10 所示。目前的压缩空气储能技术大多与可再

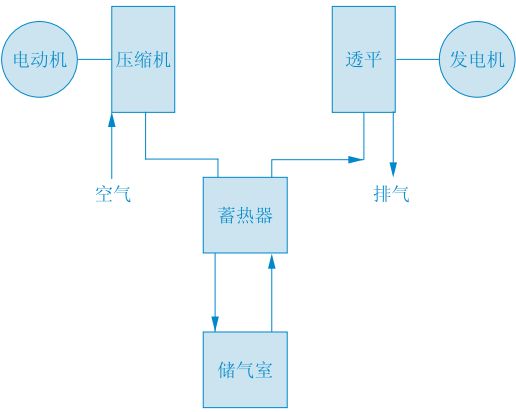


图 9 绝热压缩空气储能系统
Fig. 9 Adiabatic CAES system

生能源耦合,可利用储热装置存储太阳能,利用压缩空气储存风电,提高可再生能源的利用率及压缩空气储能系统效率。

3.3 等温压缩空气储能

等温压缩空气储能原理如图 11 所示。等温压缩空气系统用一定的控温方法,实现等温压缩过程。等温压缩空气储能过程无燃烧室和储热装置^[33],其效率可高达 80%。但部分空气溶解于水会导致部分能量损失。

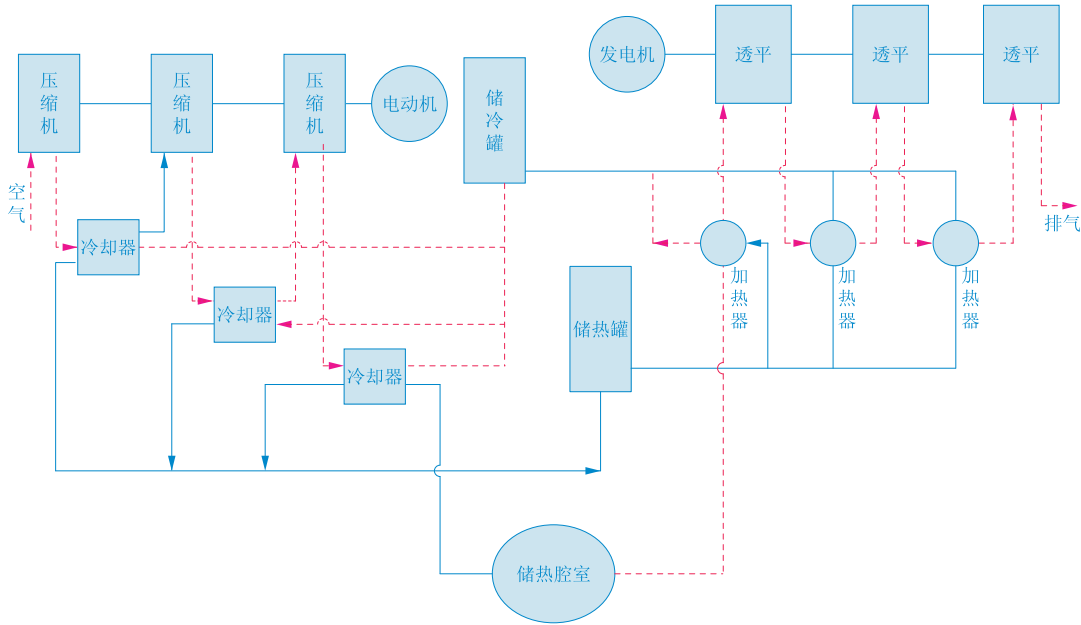


图 10 蓄热式压缩空气储能
Fig. 10 CAES with heat storage system

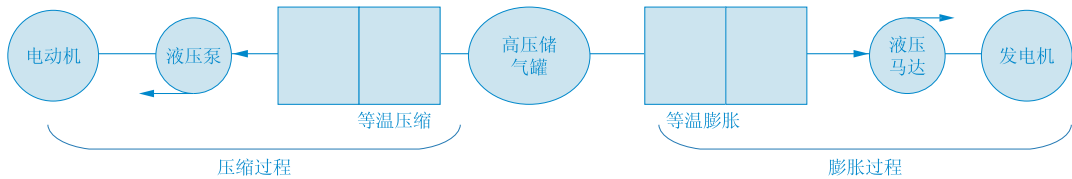


图 11 等温压缩空气储能
Fig. 11 Isothermal CAES

3.4 液态空气储能

液态压缩空气储能原理如图 12 所示。其典型代表为英国伦敦深冷压缩空气储能示范工程,设计容量为 600 kW×7 h,设计效率为 70%。但由于低温系统技术问题,该工程实际发电量仅为 350 kW,加之小型低温系统各环节损失较大,系统实际效率仅约为 8%^[34]。

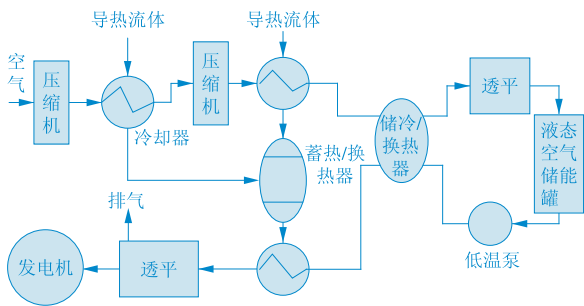


图 12 液态空气储能

Fig. 12 Liquid air energy storage

3.5 超临界压缩空气储能

图 13 展示了以中科院工程热物理所在廊坊完成 1.5 MW(压缩 0.3 MW×15 h,发电 1.5 MW×1.5 h)超临界压缩空气储能示范装置原理示意图,它以超临界压缩空气为介质,在系统不使用化石燃料的情况下,依然可以获得较高的循环效率,循环效率可以达到 67.41%^[35]。

因此,系统摆脱了对化石燃料的依赖,减少了过程中 CO₂ 的排放。系统的蓄冷容量为 10 GJ,装置容积为 60 m³,温度低至-196 ℃,装置承压达到 0.7 MPa,由此带来造价较高,且制造难度大等困难^[36]。

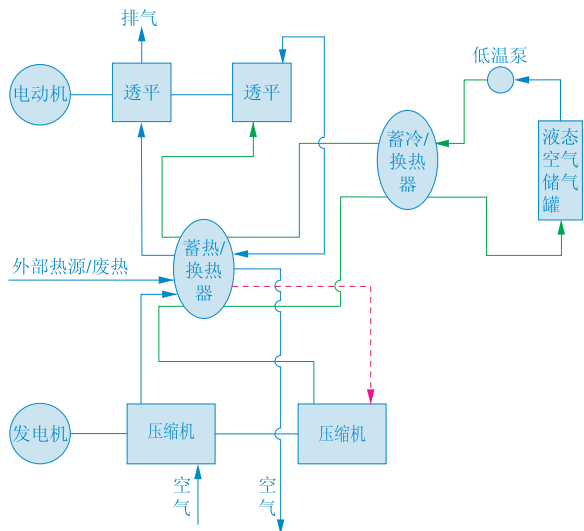


图 13 超临界压缩空气储能

Fig. 13 Supercritical CAES

压缩空气储能的分类、规模、优点及不足见表 2,据此可知压缩空气储能技术的应用现状。

表 2 压缩空气储能发电技术比较

Tab. 2 Comparison of different CAES and power generation technologies

类型	规模/MW	效率/%	优点	限制
传统压缩空气储能	110.0	54	对环境影 响小,投资少	需要高压,容量 大的储能装置
绝热压缩空气储能	0.5~300.0	>50	系统简单、 成本低、无 二次排放、 冷热电三联 供	—
蓄热式压缩空气储能	2.0	>50	提高可再生 能源利用率 和压缩空气 储能效率	—
液态空气储能	5.0	>50	能密度大	大型蓄热回冷 难度大、系统热 损失严重、成本 高、实际储能效 率低
超临界压缩空气储能	10.0	60	能密度大	大型蓄热回冷 难度大、系统热 损失严重、成本 高、实际储能效 率低

4 结论

压缩空气储能技术在高比例间歇性可再生能源发电并网的背景下具有前瞻性的战略意义。有储热的空气绝热压缩储能系统不仅综合储能效率高 70%,而且无需热源供热。相比有热源的非绝热压缩空气储能、有储热的空气绝热压缩储能系统,该技术路线无需燃烧燃料供热,因此更加容易实现 CO₂ 减排。

在“双碳”目标和可再生能源使用比例逐步提高的背景下,带有储热的绝热空气压缩储能技术与可再生能源耦合系统更具发展前景。期望本研究能够为压缩空气储能的应用提供借鉴价值。

参考文献:

[1] International Energy Agency. World energy outlook 2018. [R] Paris: 2019.

[2] Energy Information Administration US. International Energy Outlook 2018. Washington DC: US Energy Information Administration[R], 2018

[3] 国家发展改革委,财政部,科学技术部,等.关于促进储能技术与产业发展的指导意见[R], 2017.

[4] 林楚.首个储能产业发展指导纲领——《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》发布[J]. 电力系统装备, 2017, (10): 38-40.

LIN Chu. The first energy storage industry development

- guideline — "Guidelines on promoting energy storage technology and industry development" issuing [J]. Power System Equipment, 2017(10):38–40.
- [5] LUO X, WANG J, MARK D, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation [J]. Applied Energy, 2015, 137:511–536.
- [6] 梅生伟, 李瑞, 陈来军, 等. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10):2893–2907.
- MEI Shengwei, LI Rui, CHEN Laijun. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10):2893–2907.
- [7] SWIDER D. Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1):95–102.
- [8] 余耀, 孙华, 许俊斌, 等. 压缩空气储能技术综述[J]. 装备机械, 2013(1):68–74.
- YU Yao, SUN Hua, XU Junbin, et al. Summary of compressed air energy storage technology [J]. Equipment Machinery, 2013(1):68–74.
- [9] 董振斌, 蒯狄正. 以压缩空气储能耦合燃机技术促进东北新能源就地消纳[J]. 电力需求侧管理, 2017(5):28–30.
- DONG Zhenbin, KUAI Dizheng. Promote new energy consumption nearby in Northeast China with compressed air energy storage coupling gas turbine technology [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2017(5):28–30.
- [10] 赵明, 梁俊宇, 杨延举. 考虑压缩空气储能的微电网交互仿真技术研究[J]. 电工电气, 2016, (2):19–22.
- ZHAO Ming, LIANG Junyu, YANG Yanju. Research on interactive simulation technology for micro-grid considering compressed-air energy storage [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2016, (2):19–22.
- [11] 文贤馗, 张世海, 王锁斌. 压缩空气储能技术及示范工程综述[J]. 应用能源技术, 2018(3):43–48.
- WEN Xiankui, ZHANG Shihai, WANG Suobin. Summary of compressed air energy storage technology and demonstration projects [J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 2018(3):43–48.
- [12] BENJAMIN B. Technology performance report sustain smart grid program [R]. Department of Energy's National Energy Technology Laboratory, 2015.
- [13] 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 Ziwei, LUO Maji, TU Zhengkai. Survey of the isothermal compressed air energy storage technologies [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(2):1–6.
- [14] 肖定垚, 王承民, 衣涛, 等. 压缩空气蓄能(CAES)系统综述[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1):75–80.
- XIAO Dingyao, WANG Chengmin, YI Tao, et al. Review of compressed air energy storage system [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1):75–80.
- [15] NAKHAMKIN M, WOLK R, LINDEN S, et al. New compressed air energy storage concept improves the profitability of existing simple cycle, cyclecombined, energywind, and landfill gas power plants [C]//ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air.
- [16] 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.
- LI Bin, CHEN Jiling, LI Chenxin, et al. Research on coupling schemes of a compressed air energy storage system and thermal power unit [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(3):244–250.
- [17] 李丞宸, 李宇峰, 张严, 等. 一种新型蒸汽恒压抽水压缩空气储能系统及其热力学分析[J]. 西安交通大学学报, 2021(6):1–9.
- LI Chengchen, LI Yufeng, ZHANG Yan, et al. Novel steam constant-pressure pumped hydro with compressed air energy storage system and thermodynamic analysis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021(6):1–9.
- [18] 张新敬, 陈海生, 刘金超, 等. 压缩空气储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2012(1):26–40.
- ZHANG Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jinchao, et al. Research progress in compressed air energy storage system: A review [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012(1):26–40.
- [19] NAKHAMKIN M, CHIRUVOLU M, DANIEL C. Available compressed air energy storage (CAES) plant concepts [J]. Energy, 2010, 4100:81–89.
- [20] HUANG K, QUANG K, TSENG K. Study of recycling exhaust gas energy of hybrid pneumatic power system with CFD [J]. Energy Conversion & Management, 2009, 50(5):1271–1278.
- [21] CREUTZIG F, PAPSON A, SCHIPPER L, et al. Economic and environmental evaluation of compressed-air cars [J]. Environmental Research Letters, 2009, 4(4):44011–44019.
- [22] IBRAHIM H, YOUNES R, ILINCA A, et al. Study and design of a hybrid wind-diesel-compressed air energy storage system for remote areas [J]. Applied Energy, 2010, 87(5):1749–1762.
- [23] LERCH E, SIEMENS A, PTD N. Storage of fluctuating wind energy [C]. European Conference on Power Electronics & Applications, IEEE, 2008.
- [24] DENHOLM P, SIOSHANSI R. The value of compressed air

- energy storage with wind in transmission-constrained electric power systems [J]. *Energy Policy*, 2009, 37 (8): 3149-3158.
- [25] ZHANG X, XU Y, ZHOU X, et al. A near-isothermal expander for isothermal compressed air energy storage system [J]. *Applied Energy*, 2018, 225: 955-964.
- [26] BARBOUR E, WILSON I, RADCLIFFE J, et al. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 61: 421-432.
- [27] LIU J, WANG J. A comparative research of two adiabatic compressed air energy storage systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 108: 566-578.
- [28] MAZLOUM Y, SAYAH H, NEMER M. Dynamic modeling and simulation of an isobaric adiabatic compressed air energy storage (IA-CAES) system [J]. *Journal of Energy Storage*, 2017, 11: 178-190.
- [29] SCIACOVELLI A, LI Y, CHEN H, et al. Dynamic simulation of adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) plant with integrated thermal storage—Link between components performance and plant performance [J]. *Applied Energy*, 2017, 185: 16-28.
- [30] CHEN L, HU P, ZHAO P, et al. A novel throttling strategy for adiabatic compressed air energy storage system based on an ejector [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 158: 50-59.
- [31] TOLA V, MELONI V, SPADACCINI F, et al. Performance assessment of adiabatic compressed air energy storage (A-CAES) power plants integrated with packed-bed thermocline storage systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 151: 343-356.
- [32] BUDT M, WOLF D, SPAN R, et al. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments [J]. *Applied Energy*, 2016, 170: 250-268.
- [33] 董舟, 李凯, 王永生, 等. 压缩空气储能技术研究及应用现状[J]. *河北电力技术*, 2019, 38(5): 18-20.
- DONG Zhou, LI Kai, WANG Yongsheng, et al. Research and application status of compressed air energy storage technology[J]. *Hebei Electric Power*, 2019, 38(5): 18-20.
- [34] ROBERT M, STUART N, EMMA G, et al. Liquid air energy storage-analysis and first results from a pilot scale demonstration plant [J]. *Applied Energy*, 2015, 137 (3): 845-853.
- [35] GUO H, XU Y, CHEN H, et al. Thermodynamic characteristics of a novel supercritical compressed air energy storage system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 115: 167-177.
- [36] 刘佳. 超临界空气蓄热蓄冷数值与实验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2012.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

魏书洲(1981—),男,湖北十堰人,高级工程师,博士,从事燃煤机组烟气余热利用方案设计及储能参数优化研究(E-mail: shuzhou.wei@chnenergy.com.cn)。

李兵发(2000—),男,河北邯郸人,从事多级压缩空气储能运行优化研究(E-mail: 786088185@qq.com)。

孙晨阳(2000—),女,河南南阳人,从事压缩空气储能运行特性研究(E-mail: 1102567189@qq.com)。

周兴(1987—),男,河北石家庄人,讲师,工学博士,从事煤、生物质制氢研究(E-mail: zhoux@hebtu.edu.cn)。

王亚龙(2000—),男,河南许昌人,从事耦合储能装置的功率分布设计研究(E-mail: 269496271@qq.com)。

邹一帆(2000—),男,江苏常州人,从事压缩空气储能优化设计研究(E-mail: 821418824@qq.com)。

邓靖敏(2000—),女,广东佛山人,从事压缩空气储能运行优化研究(E-mail: 834692507@qq.com)。

王金星*(1985—),男,河北唐山人,讲师,博士,博士后,从事燃煤热电联产机组灵活性改造及储热优化设计研究(E-mail: wangruoguang860928@126.com)。